LUCAS RICARDO CARDOSO MARCON

**Influência da configuração da
célula combustível microbiana na geração de energia elétrica a
partir da degradação de compostos orgânicos**

VERSÃO CORRIGIDA
São Carlos – SP
2015

LUCAS RICARDO CARDOSO MARCON

**Influência da configuração da
célula combustível microbiana na geração de energia elétrica a
partir da degradação de compostos orgânicos**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Ciências: Engenharia
Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Antonio Daniel

VERSÃO CORRIGIDA
São Carlos – SP
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M298i Marcon, Lucas Ricardo Cardoso Marcon
Influência da configuração da célula combustível
microbiana na geração de energia elétrica a partir da
degradação de compostos orgânicos / Lucas Ricardo
Cardoso Marcon Marcon; orientador Luiz Antonio Daniel .
São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2015.

1. Bioenergia. 2. Bioeletricidade. 3. Tratamento
esgoto sanitário. 4. CCM câmara dupla. 5. CCM câmara
única. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **LUCAS RICARDO CARDOSO MARCON**.

Título da tese: "Influência da configuração da célula combustível microbiana na geração de energia elétrica a partir da degradação de compostos orgânicos".

Data da defesa: 08/05/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Marcelo Zaiat**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Tsunao Matsumoto**
(Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho'/UNESP – Ilha Solteira)

Aprovado

Prof. Dr. **Fabício Butierres Santana**
(Fundação Universidade Federal do Rio Grande/FURG)

Aprovado

Profa. Dra. **Alexandra Maria Pinheiro Silva
Ferreira Rodrigues Pinto**
(Universidade do Porto/UP)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Dedico este trabalho à minha família, principalmente
as minhas irmãs Yasmin e Maria Alice.

Agradecimentos

Ao meu orientador professor Dr. Luiz Antonio Daniel, pela orientação, amizade e confiança a mim depositada ao longo de 6 anos de orientação.

As professoras Dr^a. Alexandra Pinto e Dr^a Vânia Oliveira e ao professor Dr. José Manuel Simões pelo acolhimento, orientação e amizade durante a minha estadia na FEUP.

Ao CNPq (142565/2011-3) e a FAPESP (2011/23776-9 e 2013/00285-5) concessão da bolsa de doutorado e apoio financeiro para realização dessa pesquisa.

Ao professor Dr. Marcelo Zaiat, pelos valiosos conselhos e sugestões.

Ao professor Dr. Fabricio Butierres Santana, pelas dicas, sugestões e acolhimento no Laboratório de Controle Ambiental – FURG.

À Maria Teresa Hoffmann, técnica do LATAR, pela ajuda na realização de análises e exames e principalmente pela grande amizade.

Aos colegas do LATAR, em especial: Eloá Pelegrino, Gabriel Sachi, Gabriela Palhuzi, Raphael Medeiros, Natália Fischer, Andressa Bechara, Karen Meca. Por todos os momentos vividos no querido LATAR, minha segunda casa em São Carlos.

Aos técnicos e técnicas do Laboratório de Saneamento pelo acolhimento e ensinamentos repassados e a atenção dispendida.

A Alcino de Paula e Roberto Bérghamo, pela disposição em me ajudar com montagem, alterações e manutenção dos reatores.

Aos meus colegas de república: Andreia Nasser Figueiredo, Renata Vilar de Almeida, Lafayette Candido e Maria Clara Fava pelos momentos de grande companheirismo e amizade e paciência durante a escrita da tese. E não posso esquecer a Bela que escutou minhas discussões com a tese sem nunca reclamar.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento Elaine Schornobay Lui, Rodrigo Córdoba, Amanara Potykytã, Beatriz Cruz Gonzalez, Aurélia Almeida, Dagoberto Okada, Daniel Lima, Débora Fonseca, Mariana Carosia, Narumi Abe, Tais Shinma, Adriana Maluf Braga, Filipe Vasconcelos e Tatiane Corrêa

Aos funcionários (as) do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS), em especial: André Garcia, Flávia Canova, Fernanda Struzziatto, Marcia Campos, Rosemeire Jesus Veroneze “Rose”, Valderes Aparecida Picon Terroni, Maria Cecilia Scansani Marques.

As amigadas formadas no Porto, em especial: Evelyn Zucco Soares, Petrick Soares, Maria Josefina Ferreira, Francisca Moreira, João Pereira e Joana Pereira

Ao padrinho João Pereira pela tradição acadêmica a mim confiada e repassada. *“Dura Praxis, Sed Praxis”*

A Amanda Marques, Daniela Pinto, Joana Vilas Boas e Ana Isabel da Silva pela colaboração no desenvolvimento desse trabalho e por me permitirem exercer a arte de orientar.

A Paula Pinheiro, Silvia Faia, “Carrila” Ferreira, Maria do Céu Lopes e Liliana Pereira por toda ajuda e amizade, além de compartilhar uma bola de Berlim a 4 °C.

Aos momentos que me fizeram refletir sobre o que é ser um pesquisador,

Em fim agradecer a todos aqueles que me acompanharam durante essa longa jornada chamada doutorado, que me ajudaram nas horas de indecisão, insegurança e colaboraram com uma palavra de animo, estímulo e conversa para superar cada etapa e que vibraram por cada conquista alcançada.

*“A vida é uma sequência de encontros inéditos com o mundo, e portanto
ela não se deixa traduzir em fórmulas de nenhuma espécie”*

Clóvis de Barros Filho

RESUMO

MARCON, L. R. C. **Influência da configuração da célula combustível microbiana na geração de energia elétrica a partir da degradação de compostos orgânicos**. 2015. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2015.

Nessa pesquisa foram testadas tanto CCM com membranas e sem membranas que tinham por característica reproduzir sistemas de tratamento de esgoto sanitário. A etapa experimental desse trabalho foi dividida entre o Brasil (ensaios com CCM sem a MTP e utilizando esgoto sanitário) e Portugal (ensaios com CCM tradicionais de uma e duas câmaras, utilizando água residuária sintética e a bactéria *Lactobacillus pentosus*). A execução em dois locais diferentes resultou em um maior aprofundamento e desenvolvimento da pesquisa. As CCM foram avaliadas principalmente quanto ao potencial elétrico e eficiência da degradação de compostos orgânicos (esgoto sanitário e água residuária sintética). Para os dados obtidos no Brasil, as três configurações apresentaram maior diferença na potência em função do modo de operação. A operação intermitente apresentou a maior potência (11 mW/m^2) para a CCM cilíndrica de fluxo ascendente, enquanto que operação contínua a maior potência ($4,2 \text{ mW/m}^2$) foi obtida para a CCM retangular de fluxo horizontal, a qual também apresentava uma maior facilidade na manutenção quanto aos eletrodos (adição/remoção). A CCM cúbica de fluxo ascendente devido a sua concepção simples demandava um sistema complementar para o aumento da remoção de DQO. Apesar da baixa potência mensurada para os ensaios realizados no Brasil há de se pontuar que os mesmos foram obtidos para reatores sem membranas e utilizando o esgoto sanitário, o qual apresentou grande sazonalidade. Para a etapa realizada em Portugal, foi possível realizar quinze diferentes ensaios e mais um ensaio específico de crescimento. A maior potência ($10,37 \text{ mW/m}^2$) foi obtida para CCM de câmara dupla operada de modo contínuo para um tempo de detenção hidráulico (TDH) de 20 horas. A maior potência obtida para a CCM de câmara única foi de $5,53 \text{ mW/m}^2$ quando houve a adição do extrato de levedura (função teórica de mediador). A potência da CCM, na maioria das vezes, esteve relacionada à proporção de sólidos voláteis e totais, SV/ST, quantidade de bactérias, pH, características de operação e por fim a configuração da CCM. O ensaio de crescimento revelou a correlação da potência em função da quantidade de bactérias inseridas da massa do biofilme (SV) e mostra-se como uma ferramenta na avaliação da potência das CCM.

Palavras-chave: bioenergia, bioeletricidade, tratamento esgoto sanitário, CCM câmara dupla, CCM câmara única.

ABSTRACT

MARCON, L.R.C. **Influence of microbial fuel cell configuration in the generation of electricity from degradation of organic compounds**. 2015. Thesis (Ph.D. in Hydraulics and Sanitation) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos. 2015.

In this research were tested MFC with membranes and without membrane that aimed to reproduce the characteristics of sewage treatment systems. The experimental phase of this work was divided between Brazil (MFC membrane-less using sewage) and Portugal (MFC tests with traditional single and dual chamber, using synthetic wastewater and *Lactobacillus pentosus* bacteria). The performance in two different locations resulted in a further deepening and development of research. The MFC were evaluated primarily on the electric potential and efficiency of degradation of organic compounds (sewage and synthetic wastewater). For data obtained in Brazil, the three patterns showed greater difference in power as a function of the operating mode. The intermittent operation showed the highest power ($11 \text{ mW} / \text{m}^2$) for the MFC cylindrical upflow, while operation continues the increased power ($4.2 \text{ mW} / \text{m}^2$) was obtained for the rectangular horizontal flow CCM, which also had an easier maintenance as the electrodes (addition / removal). The upflow cubic MFC because of its simple design required a complementary system to increase the COD removal. Despite the low power measured for tests conducted in Brazil there to point out that they were obtained for reactors without membranes and using the sanitary sewer, which showed a high seasonality. To step held in Portugal, was possible fifteen different tests and more individual test growth. The higher power ($10.37 \text{ mW} / \text{m}^2$) was obtained for MFC dual chamber continuously operated for a hydraulic retention time (HRT) of 20 hours. The greater potency obtained for the single chamber MFC was $5.53 \text{ mW} / \text{m}^2$ when there was the addition of yeast extract (theoretical mediator function). The potency of MFC, most often been related to the proportion of total solids and volatile, VS / TS, the amount of bacteria, pH, operating characteristics, and finally the configuration of the MFC. The growth assay revealed the correlation power as a function of the quantity of bacterial biofilm mass inserted (VS) and shows up as a tool in assessing the potency of the MFC.

Keywords: bioenergy, bioelectricity, sewage treatment, MFC dual chamber, MFC single chamber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Ilustração da CCM de câmara dupla	4
Figura 3-2. Mecanismos de transferência de elétrons. A: transferência direta; B: transferência por nanofios; C: transferência pela ação de mediadores.....	6
Figura 3-3. Curva de Polarização típica.....	7
Figura 4-1. Desenho esquemático da CCM cilíndrica de fluxo ascendente.....	20
Figura 4-2. Imagem da CCM cilíndrica de fluxo ascendente.....	20
Figura 4-3. Desenho esquemático da CCM cúbica de fluxo ascendente.....	21
Figura 4-4. Imagem da CCM cúbica de fluxo ascendente.....	21
Figura 4-5. Desenho Esquemático da CCM retangular de fluxo horizontal.....	22
Figura 4-6. Imagem da CCM retangular de fluxo horizontal.....	23
Figura 4-7. Ilustração dos eletrodos A- BP 1; B- BP $\frac{3}{4}$ e C- tecido de carbono.....	26
Figura 4-8. Ilustração da CCM de câmara única	26
Figura 4-9. Ilustração da CCM de câmara dupla	27
Figura 4-10. Fases da preparação da cultura de <i>Lactobacillus pentosus</i> . A- Crescimento em placa de Petri com MRS. B- Crescimento em MRS líquido. C- concentração da biomassa por centrifugação. D- Crescimento dos <i>Lactobacillus pentosus</i> na água residuária sintética.....	30
Figura 4-11. A - Equipamento para gerar as curvas de polarização. B – Imagem do programa de para curvas de polarização.....	32
Figura 5-1. Tensão gerada na CCM durante o primeiro ciclo.....	33
Figura 5-2. Curva de polarização no quarto dia do primeiro ciclo.....	34
Figura 5-3. Variação da potência e tensão em função da resistência externa no quarto dia do primeiro ciclo.....	35
Figura 5-4. Tensão gerada na CCM durante o segundo ciclo.....	35
Figura 5-5. Curva de Polarização no sétimo dia para o segundo ciclo.....	36
Figura 5-6. Variação da potência e tensão em função da resistência externa no 7º dia de batelada no segundo ciclo.....	36
Figura 5-7. Tensão gerada na CCM durante o terceiro ciclo.....	37
Figura 5-8. Tensão gerada na CCM durante o quarto ciclo.....	37
Figura 5-9. Comparação entre a tensão gerada na CCM nos quatro ciclos.....	38
Figura 5-10. Relação entre a DQO consumida e a tensão gerada pela CCM.....	39
Figura 5-11. Relação entre o OD catódico e a tensão gerada pela CCM.....	39
Figura 5-12. Monitoramento da tensão na CCM para diferentes dias de operação do ensaio 2.....	40
Figura 5-13. Variação da tensão durante o ensaio 3.....	43
Figura 5-14. Potência em função da área de estudo.....	44
Figura 5-15. Variação da tensão durante o ensaio 4.....	45
Figura 5-16. Potência em função da área de estudo.....	45
Figura 5-17. Polarizações realizadas para a CCM de câmara dupla para o TDH de 20 horas.....	47
Figura 5-18. Polarizações realizadas para a CCM de câmara dupla para o TDH de 10 horas.....	48
Figura 5-19. Relação entre a potência e remoção de DQO para os TDH de 10 e 20 horas.....	49
Figura 5-20. Comparação da potência para os TDH de 10 e 20 horas.....	49
Figura 5-21. Polarizações realizadas para a CCM de câmara dupla sob agitação de 250 rpm.....	50
Figura 5-22. Potência e eficiência na remoção de DQO, CCM de câmara dupla sob agitação de 250 rpm.....	51
Figura 5-23. Comparação da potência para as áreas de membrana de 25 e 42,25 cm ²	52
Figura 5-24. Eficiência de Remoção de DQO para a CCM.....	53

Figura 5-25. Potência Máxima da CCM durante a polarização	53
Figura 5-26. Comparação da curva de polarização para melhor condição de cada ensaio.	54
Figura 5-27. Relação entre a potência e remoção de DQO para a CCM de câmara dupla operada em ciclos de 24, 48 e 72 horas.	54
Figura 5-28. Potência mensurada para diferentes concentrações de extrato de levedura.....	56
Figura 5-29. Polarizações realizadas para a CCM de câmara única com o eletrodo BP1.....	57
Figura 5-30. Polarizações realizadas para a CCM de câmara única com o eletrodo BP $\frac{3}{4}$	57
Figura 5-31. Potência mensurada para dois tipos de eletrodos do anodo.....	58
Figura 5-32. Potência mensurada para as concentrações de 5 e 50 mg/L de extrato de levedura.	59
Figura 5-33. Potência mensurada para as membranas Nafion 117 e 212.....	61
Figura 5-34. Variação da potência para ensaios com variação de membrana e extrato de levedura em CCM de câmara única.....	62
Figura 5-35. Potência para diferentes durações de ensaio.....	63
Figura 5-36. Quantificação de <i>L. pentosus</i> para diferentes ensaios.....	64
Figura 5-37. Relação entre a potência e a concentração de <i>L. pentosus</i> presentes no biofilme	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1. Comparação entre ensaios realizados com substratos e CCM diversas.....	10
Tabela 4-1. Informações complementares da CCM de fluxo ascendente.....	20
Tabela 4-2. Informações complementares da CCM cúbica de fluxo ascendente	22
Tabela 4-3. Informações complementares da CCM retangular de fluxo horizontal	23
Tabela 4-4. Ensaios realizados em Portugal	28
Tabela 4-5. Composição da Água Residuária Sintética.....	28
Tabela 4-6. Duração dos experimentos com respectivos prazos de análises.	31
Tabela 5-1. Resumo das variáveis mensuradas durante o ensaio 2.	41
Tabela 5-2. Quantificação da variação de tensão (mV) comparando diferentes períodos.....	41
Tabela 5-3. Tensão e potência médias para diferentes áreas de eletrodos	43
Tabela 5-4. Tensão e potência médias para diferentes áreas de eletrodos.....	45
Tabela 5-5. Potência e remoção de DQO para a CCM dupla operada com TDH de 20 horas. 47	
Tabela 5-6. Potência e remoção de DQO para a CCM dupla operada com TDH de 10 horas. 48	
Tabela 5-7. Quantificação de Sólidos presentes no biofilme na variação de TDH	50
Tabela 5-8. Comparação da quantificação de sólidos.....	51
Tabela 5-9. Comparação da quantificação de sólidos para diferentes áreas de membrana	52
Tabela 5-10. Quantificação de sólidos aderidos ao biofilme, CCM de câmara dupla operada em batelada (24, 48 e 72 horas).	55
Tabela 5-11. Comparação de variáveis monitoradas para os ciclos de 24, 48 e 72 horas.	55
Tabela 5-12. Comparação de variáveis monitoradas para diferentes dosagens de extrato de levedura.....	56
Tabela 5-13. Comparação de variáveis monitoradas para diferentes tamanhos de eletrodos..	58
Tabela 5-14. Comparação de variáveis monitoradas para diferentes dosagens de extrato de levedura para a CCM de câmara única.	59
Tabela 5-15. Comparação da potência para as CCM de câmara única e dupla e com diferentes dosagens de extrato de levedura.....	60
Tabela 5-16. Comparação de variáveis monitoradas para diferentes espessuras de membranas	61
Tabela 5-17. Comparação de variáveis monitoradas para os ensaios com variação de membrana e extrato de levedura.	62
Tabela 5-18. Relação do pH e potência para o ensaio de crescimento em CCM de câmara única em ciclos de 72 horas.	64
Tabela 5-19. Variáveis monitoradas durante o ensaio de crescimento de <i>L. pentosus</i> para a CCM de câmara única em ciclos de 72 horas.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCM	Célula Combustível Microbiana
CEFT	Centro de Estudo de Fenômenos de Transporte
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
LATAR	Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas
MTP	Membrana de Troca de Prótons
OD	Oxigênio Dissolvido
RALF	Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado
SF	Sólidos Fixos
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
SUMÁRIO	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo Geral.....	2
2.1.2 Objetivos específicos da pesquisa realizada no Brasil.....	2
2.1.3 Objetivos específicos da pesquisa realizada em Portugal	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Generalidades	3
3.2 Célula Combustível Microbiana	3
3.3 Mecanismos de Transferência de Elétrons.....	5
3.4 Potencial da CCM	6
3.5 CCM aplicadas ao tratamento de esgoto	8
3.6 Biofilme Anódico.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1 Pesquisa Realizada no Brasil	17
4.1.1 Considerações Gerais	17
4.1.2 Local de Realização dos Ensaios	19
4.1.3 Descrição das CCM	19
4.1.4 Análises e Exames	23
4.1.5 Inóculo e Imobilização da Biomassa	24
4.2 Pesquisa Realizada em Portugal	25
4.2.1 Considerações Gerais	25
4.2.2 Local de Realização dos Ensaios	25
4.2.3 Descrição das CCM	25
4.2.4 Especificações dos Ensaios Realizados	27
4.2.5 Água residuária sintética.....	28
4.2.6 Preparação do inóculo	29
4.2.7 Ensaio de Crescimento de Biofilme.....	30
4.2.8 Análises e Exames	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33

5.1 Aspectos Gerais	33
5.3 Resultados e Discussão dos dados obtidos no Brasil	33
5.3.1 Ensaio 1: Efeito da operação intermitente em uma CCM (anaeróbia/aeróbia) de fluxo ascendente.....	33
5.3.2 Ensaio 2: Efeito da operação intermitente em uma CCM (anaeróbia) de fluxo ascendente.....	40
5.3.3 Ensaio 3: Efeito da variação da área do eletrodo do anodo em uma CCM (anaeróbia/aeróbia) de fluxo horizontal.....	42
5.3.4 Ensaio 4: Efeito da variação da área do eletrodo do anodo em uma CCM (anaeróbia) de fluxo ascendente.	44
5.3.5 Considerações finais ensaios realizados no Brasil	46
5.4 Resultados e Discussão dos dados obtidos em Portugal.....	47
5.4.1 CCM de câmara dupla, efeito TDH (ensaios 1 e 2).....	47
5.4.2 CCM de câmara dupla, efeito agitação (ensaios 1 e 3)	50
5.4.3 CCM de câmara dupla, efeito área membrana (ensaios 1 e 4)	52
5.4.4 CCM de câmara dupla, efeito operação batelada (ensaios 5, 6 e 7)	53
5.4.5 CCM de câmara dupla, efeito mediador (extrato de levedura), ensaios 6, 8 e 9... 56	
5.4.6 CCM de câmara única, efeito área do anodo (ensaios 10 e 12).....	57
5.4.7 CCM de câmara única, efeito mediador (ensaios 11 e 14).....	59
5.4.8 CCM de câmara única, efeito espessura da membrana (ensaios 11 e 13).....	60
5.4.9 CCM de câmara única, efeito membrana e mediador (extrato de levedura), ensaios 13, 14 e 15	62
5.4.10 CCM de câmara única, efeito do crescimento do biofilme	63
5.4.11 Considerações finais dos ensaios realizados em Portugal	66
6. CONCLUSÕES	67
6.1 Conclusões da pesquisa realizada no Brasil	67
6.2 Conclusões da pesquisa realizada em Portugal	67
7. Sugestões Trabalhos Futuros	68
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
9. ANEXO	77
Anexo A - Técnica de diluição seriada e plaqueamento em MRS sólido	77
10. APÊNDICE A – VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS PARA OS RESULTADOS OBTIDOS NO BRASIL.....	78
11. APÊNDICE B – VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS PARA OS RESULTADOS OBTIDOS EM PORTUGAL.....	81

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o número e o acesso a dispositivos eletrônicos crescem de maneira abrupta implicando na necessidade em se aumentar a capacidade elétrica a nível mundial. A matriz elétrica de países que utilizam combustíveis fósseis vem sofrendo pressões tanto por questões ambientais e de saúde pública.

Diversas matrizes elétricas consideradas “amigáveis” estão disponíveis, inclusive em nível doméstico como painéis solares e aero-geradores. Outras tecnologias demandam uma maior robustez para a sua implantação como, por exemplo, a recuperação energética do biogás, por meio da queima do metano. Entretanto algumas tecnologias ainda estão em desenvolvimento como o aproveitamento do bio-hidrogênio, células químicas (etanol, metanol) e células combustíveis microbianas (CCM), foco dessa tese.

A tecnologia das CCM, quando desenvolvida, apresentará a capacidade de integrar-se às estações de tratamento de esgoto (ETE) transformando-as em centrais de geração de energia elétrica. Todavia, para que essa tecnologia atinja esse objetivo faz-se necessário o desenvolvimento de métodos, técnicas, materiais e estudos que permitam o entendimento das variáveis e a interpretação dos fenômenos aos quais as CCM estão sujeitas, ou seja, vencer todas as limitações ainda existentes.

Essa pesquisa desenvolveu-se em condições de extremos, pois foram utilizadas técnicas, tipos de CCM e condições operacionais com grande diferença como, por exemplo, o uso de esgoto sanitário e esgoto sintético autoclavado, reatores com e sem membrana de troca de prótons, cultura mista e pura. Além de ser desenvolvido em dois países diferentes a permitir o contato com distintos grupos de pesquisa favorecendo o aprimoramento desse tema.

No Departamento de Hidráulica e Saneamento (EESC-USP) os estudos sobre as CCM são recentes sendo que o primeiro trabalho relatado é a dissertação de Marcon (2011) sobre a potencialidade das CCM. Em 2013 Gonzalez (2013), em sua tese de doutorado, avalia uma CCM com câmaras anaeróbias e aeróbias na geração de energia elétrica, Marques (2014) no seu trabalho de monografia também aborda as CCM aplicadas ao tratamento de efluentes e também, no mesmo ano, Ferraz (informação pessoal)¹, em sua pesquisa de pós-doutorado, estuda o uso de lixiviados de aterro sanitários nas CCM.

¹ FERRAZ, F. M. Reunião de Grupo de Pesquisa LATAR realizada em Out/2014.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar as especificidades de diferentes células combustíveis microbianas e como isso afeta a remoção de compostos orgânicos e a potência elétrica.

2.1.2 Objetivos específicos da pesquisa realizada no Brasil

- Avaliar a potencialidade de configurações de reatores biológicos que simulem sistemas de tratamento de esgoto sanitário atuando como células combustíveis microbianas que não utilizem a membrana de troca de prótons.
- Avaliar o efeito da operação em modo contínuo e intermitente na potência elétrica e no tratamento do esgoto sanitário
- Determinar a interação da área superficial do anodo na potência da célula combustível microbiana

2.1.3 Objetivos específicos da pesquisa realizada em Portugal

- Avaliar as células combustíveis microbianas de câmara única e dupla, quanto à potência elétrica quando submetida a variações de: tempo de detenção hidráulico, área de membrana, área de eletrodo do anodo, operação em modo contínuo ou em batelada.
- Avaliar a interferência do biofilme aderido ao eletrodo do anodo na potência elétrica da célula combustível microbiana
- Caracterizar o biofilme aderido ao eletrodo do anodo em função da quantidade de massa e colônias de *Lactobacillus pentosus*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Generalidades

Diariamente milhares de litros de esgoto sanitário e industriais são gerados e, infelizmente, uma grande parcela não chega a ser coletada ou mesmo tratada. A parcela que efetivamente chega a uma estação de tratamento de esgoto (ETE) passará por diferentes processos (biológicos, físicos, químicos ou a combinação desses) para a remoção dos poluentes (matéria orgânica, nitrogênio e fósforo) e diversos contaminantes biológicos para que ao retornar ao corpo receptor provoque o menor impacto possível.

Todo o processo de tratamento consumirá, em alguma etapa do processo, energia elétrica, seja no uso de bombas de recalque, de dosagem de produtos químicos, em sistemas de areação e iluminação, por exemplo. A necessidade da melhor qualidade do efluente final faz necessária a implantação de novos sistemas de tratamento que aumentam o consumo de energia elétrica e elevam o custo do tratamento.

Há décadas são investigadas tecnologias que estudam a viabilidade do aproveitamento energético dos efluentes sanitário e industriais. O aproveitamento do biogás obtido da digestão anaeróbia já é praticado a nível comercial em diferentes formas assim como a obtenção de energia elétrica e/ou térmica com a queima do lodo. Enquanto que, tecnologias como o bio-hidrogênio e as CCM ainda estão em fase laboratorial de testes.

3.2 Célula Combustível Microbiana

O conceito de uma Célula Combustível Microbiana (CCM) é o mesmo de uma pilha eletroquímica, que consiste de duas câmaras (anodo e catodo) e seus respectivos eletrodos separados por uma membrana. Numa CCM micro-organismos presentes no anodo são responsáveis por oxidar a matéria orgânica e libertar prótons e elétrons para o meio, conforme ilustrado na Figura 3-1. Os prótons permeiam a membrana enquanto que os elétrons seguem pela ligação elétrica para o eletrodo do catodo.

Figura 3-1. Ilustração da CCM de câmara dupla

Na câmara do anodo estão presentes micro-organismos que são responsáveis por decompor a matéria orgânica em condições de anaerobiose. A geometria e materiais empregados para compor o eletrodo do anodo interferem de forma significativa na libertação e transferência de elétrons e prótons.

Diferentes espécies de bactérias foram testadas quanto a sua capacidade de libertar elétrons e as que apresentam capacidade superior são denominadas bactérias geradoras de eletricidade, pois transferem diretamente os elétrons para o eletrodo. Na câmara do catodo, na maioria dos experimentos é utilizada água ou água destilada sob aeração (introdução de oxigênio por aeração artificial); existe, também, a possibilidade do emprego de compostos como: ferricianeto de potássio, permanganato de potássio, peróxido de hidrogênio entre outros. As equações 1 e 2 exemplificam a degradação da glicose na câmara do anodo e a reação no catodo. Os elétrons seguem pelo circuito externo enquanto que os prótons permeiam a membrana que está entre o anodo e catodo.

Como a reação do anodo é catalisada por micro-organismos, o seu balanço torna-se mais complexo devido à natureza dos micro-organismos que, a depender do seu estágio

biológico, podem apresentar variações em função de diferentes temperaturas, vazão, carga orgânica, metais entre outros fatores.

A potência de uma CCM é avaliada por meio de curvas de polarização e expressa em função da área de eletrodos do anodo e/ou catodo (mW/m^2) ou do volume da CCM e/ou câmara do anodo (mW/m^3). Clauwaert et al. (2008) propuseram a normalização em função do volume da câmara quando a área do eletrodo não pode ser determinada e que o aumento desse volume incorre no aumento da resistividade da CCM. A comparação numérica tem suas limitações visto que não ocorre linearidade com o aumento da área do anodo, como reportado por Dewan, et al., (2008) na qual a potência seria proporcional ao logaritmo da área da superfície do anodo. Logo, a tomada de decisão sobre a eficiência da CCM não deve estar associada unicamente à potência, haja vista a comparação de CCM com diferentes áreas de eletrodos podem levar a conclusões precipitadas. A eficiência coulômbica, que estabelece a relação entre os elétrons recuperados e o total de elétrons disponíveis no substrato, também é usada na avaliação da CCM. A conversão do substrato pode ser medida por variáveis como DQO, DBO ou pela determinação específica do substrato como acetato, glicose, amido, entre outros.

3.3 Mecanismos de Transferência de Elétrons

Com base nos trabalhos de Shukla, et al. (2004) e Rinaldi, et al. (2008) são descritos, de maneira simplificada, os mecanismos de transferência de elétrons entre os micro-organismos e o eletrodo do anodo. O primeiro refere-se à transferência direta de elétrons na qual devido à presença de determinadas proteínas (mais especificamente citocromo tipo C) o micro-organismo em contato direto com o eletrodo liberta o elétron para o eletrodo, representado pela Figura 3-2-A.

Posteriormente foi observada a formação de estruturas de ligação entre os micro-organismos e o eletrodo. Tais estruturas foram denominadas nanofios e são responsáveis por ligar o microrganismo ao eletrodo. Com essa descoberta levou-se ao entendimento da colaboração dos micro-organismos que não estejam ligados diretamente ao eletrodo. Também é sugerido que os nanofios são responsáveis por formar uma rede de escoamento dos elétrons e estão representados na Figura 3-2 – B.

Outro mecanismo de transferência de elétrons é em função dos mediadores redox. Essas substâncias tem a capacidade de capturar os elétrons dos micro-organismos e transportá-los ao eletrodo e repete-se sucessivamente o ciclo de transporte, ilustrado pela

Figura 3-2- C. Os mediadores podem ser excretados pelos próprios micro-organismos ou introduzidos artificialmente. Apesar do incremento da potência por meio de mediadores artificiais os mesmos em longo prazo tendem a apresentar inviabilidade devido a efeitos tóxicos e demandarem sua reposição quando esgotados.

Figura 3-2. Mecanismos de transferência de elétrons. A: transferência direta; B: transferência por nanofios; C: transferência pela ação de mediadores.

Fonte: adaptada de Rinaldi et al. (2008).

3.4 Potencial da CCM

A tensão teórica máxima passível de se obter com uma CCM pode ser determinada pela equação de Nersnt (3). O potencial elétrico (E) teórico reflete a máxima tensão que a CCM poderia produzir em função de seus reagentes e produtos. Entretanto, ao extrair a corrente da CCM ocorrem diferentes perdas como representado na Figura 3-3, que representa a tensão em função da corrente específica.

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (3)$$

E: potencial elétrico

E^0 : potencial normal da pilha correspondente

R: constante universal dos gases;

T: temperatura em escala absoluta;

F: carga elétrica de um mol de elétrons;

n: número de mols de elétrons transferidos;

Q: quociente de reação, razão entre a concentração de produtos e reagentes.

Figura 3-3. Curva de Polarização típica.

Na primeira região predominam de maneira mais acentuada as perdas por ativação em baixas correntes específicas e são decorrentes da ativação das reações químicas. Como forma de reduzir essas perdas é indicado o aumento da área ativa dos eletrodos como o uso de catalisadores mais eficientes e a adição de mediadores químicos (corante vermelho neutro - 3-amino-7-dimetilamino-2-metilfenazina hidrocloreto –, azul de metileno, por exemplo) ou natural (extrato de levedura) os quais funcionam como veículos de transferência dos elétrons para o eletrodo. O uso de catalisadores e mediadores químicos apresenta como desvantagens a questão de custo de manutenção e a possibilidade de efeito inibitório e/ou tóxico sobre os micro-organismos (IEROPOULOS et al., 2005; DU et al., 2007).

Na segunda região predominam as perdas ôhmicas em função do eletrólito, ligações elétricas, fluxo dos elétrons e resistência dos materiais dos eletrodos, além da resistência ao fluxo de prótons na membrana. Essas perdas podem ser reduzidas com o menor espaçamento entre os eletrodos e com o aumento da condutividade dos materiais. Para corrente específica maiores predomina a perda associada a fenômenos de transferência de massa, principalmente devido à concentração (reagentes e produtos).

A análise da curva de polarização constitui-se uma ferramenta para avaliar o quão eficaz a alteração de micro-organismos, mediadores, eletrodos, catalisadores, tipo de reator, substratos entre outras variáveis afetam a potência final da CCM.

3.5 CCM aplicadas ao tratamento de esgoto

Nas últimas décadas a comunidade científica tem dado atenção ao estudo das CCM visto o aumento da demanda energética mundial e a busca por novas fontes de energia bem como o aproveitamento energético de efluentes. A potencial utilização de efluentes sanitários e industriais como matéria prima é vista como grande oportunidade de valorização de um resíduo das atividades antrópicas.

Devido à complexidade do esgoto sanitário existem diversos estudos nos quais foram simulados esgoto sanitário com diferentes composições como Sevda et al (2013), Liu et al. (2010), Thygesen et al. (2011), Zhu et al. (2013), Jia et al. (2014) e Shahgaldi et al. (2014). O intuito de se trabalhar com um efluente sintético é realizar os ensaios em condições mais controladas possibilitando uma comparação mais fácil entre os resultados obtidos

A presença de sólidos, que ocasiona a colmatação da membrana, é uma das limitações para uso de esgoto sanitário nas CCM. Nesse sentido, CCM sem o uso de membrana foram testadas por: Du et al. (2008), Zhu et al. (2011), Tugtas et al. (2011), Lee et al. (2011) e Zhu et al (2013).

Jang et al. (2004) avaliaram uma CCM cilíndrica de fluxo ascendente (aproximadamente 7,8 L), as câmaras do anodo e catodo foram separadas por uma camada de lã de vidro. Ao utilizar um efluente sintético foi possível gerar de maneira estável uma corrente de 2 mA por quatro semanas. E ainda verificaram, pela adição de NaCl e HCl, que a disponibilidade de ions positivos para o catodo é um limitante na geração de energia elétrica pela CCM

Zhu et al. (2011) avaliaram uma CCM cilíndrica sem MTP, com volume útil de 850 mL. O diferencial da abordagem feita pelos autores é o fluxo de alimentação da CCM que ocorre no sentido do catodo para o anodo. A alteração da potência em função da variação do espaçamento dos eletrodos (5, 10 e 15 cm) e da vazão, em ambos os casos, foi atrelada à difusão do oxigênio para o anodo. A potência máxima determinada foi 37,4 mW/m².

Tutgas et al. (2011) avaliaram uma CCM cúbica a ar (230 mL) e sem membrana, durante 53 dias. A potência variou de 750 para 280 mW/m² no decorrer do experimento e esteve associada ao crescimento de biofilme sobre o anodo e a perda do catalisador de platina. Os autores concluíram que se fazem necessários mais estudos para garantir um funcionamento constante das CCM

Os resultados obtidos ainda expõem uma grande lacuna entre a pesquisa em laboratório e a ampliação de escala bem, como aplicação em escala plena. Muitas variáveis e fenômenos ainda não foram completamente descritos ou testados, revelando o grande campo de trabalho ainda a ser percorrido em diversas frentes. Rittmann (2008), Pant et al.(2010), estimam que a viabilidade das CCM depende crucialmente da fabricação dos materiais (eletrodos e membranas) que apresentem melhores condições de transferência de elétrons e prótons, compatibilidade aos micro-organismos, e não sofram corrosão (eletrodos). A Tabela 3-1 apresenta diversos ensaios realizados para diferentes substrato e tipos de CCM.

Dentre os desafios está a combinação dos materiais para os eletrodos, sendo já testados diferentes materiais como: véu de carbono (WINFIELD et al. 2013), papel de carbono (ZHANG et al. 2012; JIA 2014; feltro de carbono (CUI et al. 2014), feltro de grafite (GIL et al. 2003; ZHANG et al. 2012) espuma de grafite (KRAMER, 2012) e barras de grafite (MARCON, 2011; CAI et al. 2013), malha de carbono (LARROSA-GUERRERO et al. 2010; LIU et al. 2012; REN et al. 2014). O carbono tem seu destaque em função da biocompatibilidade, ser bom condutor, inerte e em algumas formas o custo associado ser baixo.

A fabricação e estudo das membranas também têm sido foco de outros pesquisadores (KIM et al. 2012, BEHERA et al. 2010, WINFIELD et.al., 2013). O seu papel é crucial na separação entre as câmaras do anodo e catodo e, a depender do material e espessura, pode causar o aumento da resistência e a diminuição do fluxo de prótons ou permitir o transpasse do oxigênio do catodo ao anodo, ambos ocasionando a perda da potência da CCM.

Outras variáveis importantes estão relacionadas às interferências no crescimento, multiplicação e manutenção dos micro-organismos na CCM como o pH, temperatura, concentração de substrato, vazão e agitação, os quais, em sua generalidade, são bem compreendidos pela literatura.

Tabela 3-1. Comparação entre ensaios realizados com substratos e CCM diversas

Substrato	Tipo de Reator	Volume Reator (mL)			TDH (h)	Potência mW/m ²	Potência W/m ³	EF (%)	Modo Operação	Referência bibliográfica
		Anodo	Catodo	Total						
Resíduo de Alimentos	SC	28	0	28	-	556	18	27	B	Jia et al. (2013)
Esgoto Sintético	SC	45	0	45	40	60	-	-	B	Velasquez-Orta et al. (2011)
Lixiviado de resíduos de alimentos	DC	75,6	75,6	151,2	-	-	0,432	20	B	Li et al (2013)
Efluente de Laticínio	SC	90	0	90	48	-	20	26,87	B	Mardanpour et al (2012)
Efluente Cervejaria	SC	180	0	180	2,13	669	24,1		C	Wen et al (2010)
Efluente Suinocultura	SC	295	0	295	5,7	226,3	0	-	C	Zhuang et al (2012a)
Efluente Sintético	DC	300	300	600	-	156	-	16	-	Thygesen et al (2011)
Efluente de Laticínio	DC	310	310	620	500	46	-	11,3	B	Tremouli et al. (2013)
Efluente de Laticínio	DC	310	310	620	50	18,4	-	1,9	B	Antonopoulo et al (2010)
Acetato	SC	520	0	520	11,3	695	-		C	Liu (2008)
Efluente de Laticínio	TC	617	321	938	-	-	15	17,3	B	Zhang et al (2012)
Indústria de Processamento de Alimentos	DC	1000	125	1125	-	502	-	18,5	B	Herrero-Hernandez et al. (2013)
Lixiviado de resíduos de alimentos	DC	1200	1200	2400	96	-	15,14	66	B	Rikame et al. (2012)
Efluente de Abatedouro	SC	1200	0	1200	72	-	2,19	-	C	Li et al (2013)
Glicose	DC	1400	1050	2450	6	2003	-	22	C	Rahimnejad et al. (2012)
Indústria de proteína alimentar	DC	1500	1500	3000	125	230	-	15	C	Mansoorian et al. (2013)
Esgoto Sintético	DC	1870	1870	3740	6,23	-	23,8	82,3	C	Zhu et al (2013)
Efluente de Destilaria	SC	3270	0	3270	20	597	-	22,7	B	Sonawanea et al. (2013)
Efluente Suinocultura	DC	3600	1000	4600	24	-	164,2		C	Ryu et al. (2013)
Esgoto Sanitário	SC	5700	0	5700	6	753	-	12	C	Yu et al (2012)
Efluente Cervejaria	SC	10000	0	10000	48	-	6	7,6	C	Zhuang et al (2012b)

SC: CCM de câmara única; DC: CCM de câmara dupla; TC: CCM de câmara tripla; B: batela; C: contínuo; EF: eficiência remoção de substrato

A literatura descreve diferentes aspectos pesquisados como relatado por Mansoorian *et al.* (2013) que avaliaram uma CCM de câmara dupla no tratamento de efluente de indústria alimentícia variando a vazão de 0,1 a 1,6 mL/min. Nas condições usadas por Mansoorian *et al.* (2013), a maior potência, de 230 mW/m², foi obtida com vazão de 0,2 mL/min). O incremento da vazão não resultou em aumento substancial da potência e a partir de 0,4 mL/min ocorria diminuição da potência, a qual foi correlacionada com o excesso de material a ser degradado que diminuiu a capacidade de degradação desses compostos pelos micro-organismos presentes no anodo.

Devido a diversas limitações, uma única CCM não possui capacidade de gerar potência adequada ao funcionamento de dispositivos eletrônicos. Uma solução estudada por diferentes autores é a associação de CCM em serie (aumento de corrente) e/ou paralelo (aumento da tensão), fornecendo assim energia suficiente para alguma aplicação específica. Rahimnejad *et al.* (2012), que testaram uma CCM que possuía 4 câmaras anódicas e 3 câmaras catódicas, sendo que uma câmara do catodo fazia a interface com duas câmaras anódicas, reduzindo a necessidade de espaço. Empregando glicose como substrato, vermelho neutro como mediador e permanganato de potássio como agente oxidante no cátodo a MFC produziu a potência máxima 2.003 mW/m² (6.447 mA/m²) para um TDH de 6 horas. Os autores indicam que o emprego de MFC agrupadas em series e/ou paralelo devem ser estudadas para avaliar a ampliação de escala das MFC. Winfield *et al.* (2012) avaliaram sistemas em série, analisaram a viabilidade de ampliação de escala do sistema testado e concluíram ser vantajosa essa associação, diferentemente do que era promulgado por Alterman *et al.* (2006) e Oh & Logan, (2007), que a associação de CCM em série e ou em paralelo poderia ocasionar a inversão de polaridade de uma ou mais CCM reduzindo a eficiência da CCM.

Zhuang *et al.* (2012) testaram uma CCM tubular dividida em 5 câmaras com o catodo exposto ao ar. Quando os circuitos elétricos dessas unidades foram associados, tanto em série como em paralelo, a potência resultante foi semelhante à da operação de apenas uma unidade, enquanto que houve perdas de 15 a 35 % no valor da tensão. A potência de geração de energia era proporcional à carga orgânica aplicada (1,2 e 4,9 kg DQO/m³dia). Com carga orgânica de 4,9 kg DQO/m³dia, a potência medida em cada unidade variou de 56 até 226 mW/m² para a ultima unidade, sempre apresentando valores crescentes entre as unidades. O mesmo fenômeno foi observado para a carga de 1,2 kg DQO/m³dia, porém com intervalo menor (15 a 65 mW/m²). Aparentemente, ao passar pelas câmaras, a comunidade microbiana tinha maior capacidade de libertar elétrons e também foi mensurada uma menor resistência

interna nas unidades finais o que facilitaria o deslocamento dos elétrons. Choi (2013), ao associar CCM em paralelo, obteve melhores resultados obtendo a potência máxima de 420 mW/m².

CCM multi-câmaras também foram estudadas por Sonawanea et al (2013). O reator, dividido em 6 câmaras anaeróbias e operado em bateladas com duração média de 20 dias gerou potência máxima de 597 mW/m², (remoção de DQO de 43 % e 23 de eficiência coulombica). Os autores reportam a necessidade de avaliar mais claramente como o crescimento da biomassa que está aderida à MTP pode interferir na passagens de prótons.

Kaewkannetra (2011), ao avaliar uma CCM de grande volume (30 L) empregando lâ de vidro em substituição à tradicional membrana Nafion[®] (DuPontTM) conseguiram uma potência máxima de 1.800 mW/m² para uma área de 0,16 m² de eletrodos do anodo. Os autores sugerem que futuras investigações devem ser exploradas para melhor compreender a ampliação de escala. Hashemi & Samimi (2012) avaliaram uma CCM de fluxo ascendente e obtiveram potência máxima de 5,31 mW/m³, verificando a relação de maior potência com o aumento da carga orgânica aplicada em pH neutro. Os autores relacionaram as fases lag e log com a variação da potência.

Tremouli et al. (2013) estudaram uma CCM de câmara dupla com MTP operada em ciclos e alimentada com efluente de laticínios com concentrações variando de 0,35 a 6,7 g DQO/L. Nessas condições a potência não teve alteração significativa em função da alteração da carga orgânica de 0,35; 0,7; 1,5; e 2,7 g DQO/L, porém a maior potência, de 46 mW/m², foi obtida com 6,7 gDQO/L. Entretanto, Jia et al. (2013), ao avaliarem uma CCM com catodo exposto ao ar operada em batelada para efluente de restaurante, observaram não haver diferença significativa na potência – 556 mW/m² (18,3 W/m³) – ao variar a DQO de 2000 a 4900 mg/L. Rikame et al. (2012) também empregaram efluente com concentração similar ao utilizado por Jia et al. (2013), porém aplicado a uma CCM de câmara dupla com MTP e obtiveram a potência de 448,6 mW/m² (15,14 W/m³). Aparentemente Jia et al. (2013) e Rikame et al. (2012) obtiveram potências equivalentes, porém o volume de câmara do anodo são desproporcionais: a MFC de Jia et al. (2013) possuía 22 mL e a utilizada por Rikame et al. (2012) apresentava 1200 mL. Assim, fica evidente que a sutil comparação entre as potências normalizadas pode incorrer em conclusões precipitadas referente os resultados obtidos.

Liu et al (2008), ao avaliarem duas MFC com volumes distintos de 28 e 520 mL, e ao observaram o aumento de apenas 15 % na potência, destacaram que a área do catodo foi o fator limitante na geração de energia. Os autores também verificaram a interferência do TDH

para a CCM, observando que para o TDH de aproximadamente 4 horas a potência foi de 17 W/m^3 passando para 22 W/m^3 para o TDH de 11,3 horas. Ao aumentarem o TDH para 16 horas a potência diminuiu para 20 W/m^3 e concluíram que fatores como a variação da concentração do substrato e da quantidade de microrganismo devem ser investigados na otimização dos reatores. A redução da potência e aumento da remoção de DQO com o aumento do TDH também foi verificada por Yu et al (2012). Durante o experimento, ao alterarem de água residuária sintética para um efluente real, foi verificada uma diferenciação significativa na comunidade microbiana que, segundo os autores, foi favorecida pelos intermediários da degradação do efluente.

Dentre os fatores a serem observados durante a ampliação de escala de um reator, o fator duração do ensaio deve ser considerado, visto que os reatores em escala plena devem operar por longos períodos, serem de fácil manutenção e apresentarem níveis estáveis de geração de energia. Nesse sentido, Zhuang et al (2012) testaram o acoplamento de 40 CCM de câmara única com eletrodos expostos ao ar durante o período de 180 dias. O aumento da potência foi verificado até o trigésimo dia, ($4,1 \text{ W/m}^3$) decrescendo até $1,6 \text{ W/m}^3$. Dentre os fatores que apresentaram interferência na configuração testada estão: a conexão hidráulica entre os compartimentos, o fluxo contínuo do efluente e a alcalinização do catodo.

A disposição e forma de reatores também apresenta grande interferência na eficiência numa CCM. Mardanpour et al. (2012) reportaram que ao utilizar um anodo em forma espiral foi possível aumentar a área de superfície e também reduzir a resistência interna quando comparado às pesquisas de Velasquez-Orta et al. (2011), Mohan et al. (2010) e Antonopoulou et al. (2010).

Zhang et al. (2012) otimizaram o modelo de uma CCM de câmara tripla, composta de um anodo central e dois catodos laterais, aumentando a área de membrana e com operação em batelada foi obtida a potência máxima de 15 W/m^3 . O acúmulo de sólidos na membrana diminuiu a potência da CCM, como verificado por Rikame et al. (2012) que observaram perda de até 30% de potência.

O uso de catalisadores no catodo também é uma estratégia para maior rendimento da CCM. Li et al. (2013) aplicaram efluente do tratamento de carcaças de animais em uma CCM tubular de fluxo ascendente e avaliaram a adição de MnO_2 como catalisador, em três condições 0; 4 e 8 mg/cm^2 . A potência máxima de $2,19 \text{ W/m}^3$ foi obtida com a aplicação de 4 mg/cm^2 de MnO_2 .

Hays et al (2011) compararam diferentes anodos (plano e escovilhão) com área de 7 cm^2 e relataram que o escovilhão apresenta resultados mais consistentes e seguros

para a utilização em MFC do que eletrodos planos, devido a maior adesão de micro-organismos e a melhor troca de produtos e reagentes. Todavia, os autores destacam que são necessários mais estudos para assegurar um desempenho estável e a longo prazo no tratamento de águas residuárias.

Jiang et al. (2011) testaram uma CCM com múltiplos eletrodos em um volume de 20 L, aplicando esgoto sanitário real e mensuraram uma média de potência entre 300 à 380 mW/m². O aumento do número de eletrodos numa CCM levou à maior geração de energia. Após várias semanas de operação o catodo apresentou incrustações nos eletrodos, causada principalmente pela deposição de cálcio.

Zhu et al (2013) testaram o efeito da distribuição dos eletrodos do anodo e do catodo, de forma alinhada ou escalonada em uma CCM de câmara dupla com MTP. A potência com as barras escalonadas foi cerca de 24 % maior, havendo também melhores resultados para a remoção da DQO e da eficiência coulômbica. A distribuição escalonada favoreceu o fenômeno de transferência de massa. Portanto, além da necessidade de estudar diferentes materiais, pode ser observado que a disposição do mesmo material pode influenciar a potência final da CCM.

Antonopoulou et al (2010) verificaram o uso do soro do leite em uma CCM de câmara dupla. A potência máxima foi de 18,4 mW/m² (TDH 50 horas); entretanto, a eficiência coulômbica (EC) foi de apenas 1,9 % o que, segundo os autores, foi devida à presença de micro-organismos que não apresentavam grande potencialidade para geração de energia elétrica. Potenciais semelhantes também foram encontrados quando o soro de leite foi substituído por glicose ou apenas lactose, porém com EC de 28 % e 22 % respectivamente. Os autores concluíram que devem ser realizadas otimizações quanto à configuração da CCM com objetivo de minimizar as perdas ôhmicas do sistema, aliado com um pré-tratamento do soro do leite.

Apesar das relações estreitas entre o tipo de águas residuárias e desempenho da CCM, muito pouca atenção tem sido dada às limitações de processos que podem ocorrer quando se utiliza diferentes efluentes na CCM. Além disso, as comparações diretas entre os estudos relatados na literatura são difíceis devido às diferentes configurações e condições de reatores utilizados em cada estudo. (Velasquez-Orta et al., 2011).

Outros usos das CCM têm sido relatados na literatura. Yu et al. (2011) abordaram o tratamento de esgoto sintético com remoção de nitrogênio em uma CCM e apontaram como promissor o potencial de uso da CCM. Peixoto et al. (2011) mencionam o uso da CCM como biosensor para águas residuárias de baixas e médias concentrações de carbono orgânico

enquanto que Huang et al. (2011) sugeriram a associação das CCM com o sistema de membranas filtrantes. Villaseñor et al (2013) sugerem o uso dos sistemas de *wetland* em conjunto com as CCM.

Wang (2012) testou a associação do sistema de membranas filtrantes a uma CCM. A densidade de potência máxima atingiu $6,0 \text{ W/m}^3$. Além disso, foram adotados materiais de baixo custo para a construção do sistema, o que sugere uma alta atratividade econômica e aplicabilidade prática deste sistema. No entanto, novas melhorias no projeto do sistema e condições de funcionamento ainda são necessárias para permitir um melhor desempenho do tratamento de águas residuárias e de maior geração de energia.

Fangzhou et al. (2011) verificaram que em uma CCM, ao se usar fezes humanas, poderia chegar a uma potência máxima de 240 mW/m^2 para uma área de eletrodo de catodo de 12 cm^2 . Quando comparado com CCM alimentada com glicose o substrato de fezes humanas tem menor eficiência de geração de eletricidade e seu desempenho não é estável. Um pré-tratamento como a fermentação, o aumento da área de eletrodos e a diminuição da distância entre os eletrodos pode melhorar o desempenho da CCM.

Mardanpour et al. (2012) apresentam um novo modelo de CCM ao utilizar o anodo em forma de espiral com malha de aço inoxidável com revestimento de carbono grafite. Este estudo demonstra que com a sua boa fixação de biofilme, alta área específica por unidade de volume, a malha de aço inoxidável espiral com revestimento de grafite sugere uma alternativa promissora para os eletrodos convencionais para geração de energia na CCM. O custo muito menor do eletrodo introduzido torna mais atraente para aplicações de grande escala.

3.6 Biofilme Anódico

Os micro-organismos presentes na câmara do anodo são a base do funcionamento da CCM, mais especificamente aqueles aderidos ao eletrodo, denominado biofilme. Ledezma et al. (2012) complementam que compreender o processo de crescimento do biofilme é a chave para controlar as reações que ocorrem na CCM e otimizar o seu desempenho.

Characklis (et al., 1981) reportam que a composição dos biofilmes é resultado de uma mistura de água, substâncias poliméricas extracelulares além de partículas adsorvidas e dissolvidas. Costerton et al. (1995) definem biofilmes como micro-organismos contidos em uma matriz de polissacarídeos, podendo aderir-se a outros micro-organismos e/ou a uma superfície.

Segundo, após a revisão de Marshall et al, (1971)², Daniels (1980)³, Calleja (1984)⁴, Van Loosdrecht et al, (1987)⁵, Rouxhet & Mozes (1990)⁶, Liu (1995)⁷, Liu & Wan (1996)⁸ apud Liu & Tay (2001) são englobados os fatores físico-químicos e biológicos que resumem o processo de formação do biofilme em 4 etapas descritas a seguir:

“Passo 1: Ocorre o transporte físico das células contidas no líquido para a superfície. As seguintes forças geralmente estão envolvidas nesse passo: hidrodinâmica; difusa; gravidade; termodinâmica, como o movimento Browniano e de movimento das células.

Passo 2: Forças atrativas iniciais para reter as células na superfície do suporte e outros para promover contatos multicelulares estáveis. Estas forças atrativas são: (a) as forças físicas: forças de Van der Waals; atração de carga oposta; forças termodinâmicas, incluindo a energia livre da superfície; tensão superficial e a hidrofobicidade. (b) as forças químicas: ligações de hidrogênio; formação de pares iônicos; formação de tripleto iônico.

Passo 3: Forças microbianas para amadurecimento das células imobilizadas: produção de exopolímeros, como exopolissacarídeos etc; crescimento de aglomerado celular; alterações metabólicas e variações genética induzidas pelo ambiente, que facilitam e reforçam ainda mais a interação célula-célula, e resultam na alta densidade de células aderentes.

Passo 4: O estado de equilíbrio das células imobilizadas leva à formação de uma estrutura tridimensional em função das condições hidrodinâmicas. Os biofilmes são moldados pelas forças de cisalhamento hidráulico, caso a tensão de cisalhamento seja alta ocorre desagregação e inibição do desenvolvimento de biofilmes”.

O tipo e a formação do biofilme são influenciados por diferentes fatores. Patil et al. (2010) reportam que a temperatura tem grande impacto sobre o tempo de formação e estabilização de biofilmes de cultura mista. Demonstrou-se ainda que os biofilmes podem ajustar rapidamente e reversivelmente com as flutuações de temperatura (0 a 45 °C).

² MARSHALL, K. C.; STOUT, R.; MITCHELL, S. R. Mechanism of initial events in the adsorption of marine bacteria to surface. **Journal of General Microbiology**, v. 68, p. 337-348, 1971.

³ DANIELS, S.L. **Mechanisms involved in sorption of microorganisms to solid surface. Adsorption of Microorganisms**, eds. Bitton, G & Marshall, K. C. New York: John Wiley & Sons, ISBN 0-471-03157-7. p 8-57, 1980.

⁴ CALLEJA, G. B. **Microbial Aggregation**. Florida: CRC Press. ISBN 0-84935708-X, 1984

⁵ Van LOOSDRECHT, M. C. M.; LYKLEMA, J.; NORDE, W.; SCHRAA, G.; ZEHNDER, A. J. B. The role of bacterial cell wall hydrophobicity in adhesion. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 53, p. 1893-1897, 1987.

⁶ ROUXHET, P. G.; MOZES, N. Physical chemistry of the interaction between attached microorganisms and their support. **Water Science and Technology**, v. 22, p. 1-16, 1990.

⁷ LIU, Y. Adhesion kinetics of nitrifying bacteria on various thermoplastic supports. **Colloids and Surface B: Biointerfaces**, v. 5, p. 213-219, 1995.

⁸ LIU, Y.; WANG, Q. D. Surface modification of bio-carrier by plasma oxidation-ferric ions coating technique to enhance bacterial adhesion. **Journal of Environmental Science and Health**. v. A31, p 869-878, 1996

Yuan et al. (2011) verificaram que a transferência de elétrons no biofilme do anodo foi afetada pelo pH da câmara do anodo e sugerem que condições mais alcalinas favorecem o desempenho da CCM.

Zhang et al. (2011) reportam que o aumento da resistência externa da CCM leva à formação de um biofilme com estrutura compacta e menos ativa, limitando a potência. A resistência externa ótima foi determinada em 10Ω . Abaixo desse valor o biofilme formado apresentou menor redução da coesão e uma estrutura mais solta, também resultado na redução da potência.

O emprego de técnicas de caracterização morfológica, de determinação de micro-organismos e a análise de voltametria podem ser utilizadas na avaliação do biofilme e na determinação dos mecanismos de transferência de elétrons. (YANG et al., 2011)

Ledezma et al. (2012) determinaram a relação entre a taxa de crescimento de biofilme e a produção de eletricidade em CCM. Yang et al. (2012) concluem que as alterações da composição ou estrutura do biofilme influenciam as características eletroquímicas do anodo e consequentemente, o funcionamento da CCM.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Pesquisa Realizada no Brasil

4.1.1 Considerações Gerais

O foco da pesquisa realizada no Brasil foi a adaptação do conceito de estações de tratamento de esgoto à CCM, visando o tratamento de esgoto sanitário e geração de energia elétrica. Para tanto foram desenvolvidas três configurações de CCM e realizados 4 ensaios:

- Ensaio 1: Efeito da operação intermitente em uma CCM (anaeróbia/aeróbia) de fluxo ascendente. Foram realizados 4 ciclos, e cada ciclo teve duração de 9 dias dos quais em 2 dias a CCM recebia esgoto sanitário com uma vazão constante de $2,4 \text{ L h}^{-1}$ e depois permanecia por 7 dias sem receber esgoto sanitário. A CCM esteve sobre o efeito de uma resistência externa de 50Ω e os ensaios foram conduzidos em uma câmara térmica a $28 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Ensaio 2: Efeito da operação intermitente em uma CCM (anaeróbia) de fluxo ascendente. A operação intermitente consistiu em ciclos de 12 horas, em que 6 horas a CCM recebia esgoto sanitário com vazão de 5 L h^{-1} e depois permanecia 6 horas sem receber esgoto sanitário, reiniciando sucessivamente por um período de 56 dias. A CCM esteve sobre o efeito de uma resistência externa de 50Ω e os ensaios foram conduzidos em uma câmara térmica a $28 \pm 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Ensaio 3: Efeito da variação da área do eletrodo do anodo em uma CCM (anaeróbia/aeróbia) de fluxo horizontal. Durante o ensaio foi mantida vazão tal que o TDH da câmara anaeróbia fosse de 3 horas, e os eletrodos da câmara do anodo foram adicionados ou retirados para se obter as seguintes áreas: 0,078; 0,047 e $0,0094 \text{ m}^2$. A CCM esteve sobre o efeito de uma resistência externa de 50Ω e os ensaios foram conduzidos em uma câmara térmica a $28 \pm 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Ensaio 4: Efeito da variação da área do eletrodo do anodo em uma CCM (anaeróbia) de fluxo ascendente. Durante o ensaio foi mantida vazão tal que o TDH da CCM manteve-se em 3 horas, e os eletrodos da câmara do anodo foram adicionados ou retirados para se obter as seguintes áreas: 0,094; 0,056 e $0,018 \text{ m}^2$. A CCM esteve sobre o efeito de uma resistência externa de 50Ω e os ensaios foram conduzidos em uma câmara térmica a $28 \pm 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

O ensaio 1 é caracterizado por avaliar uma concepção compacta de sistema de tratamento, na qual em uma única CCM desenvolve-se condições anaeróbias e aeróbias. No ensaio 2 foi testada uma condição que se aproxima com a operação de sistemas de tratamento de esgoto em escala plena e tem por base o conceito de reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de esgoto sanitário. Os ensaios 3 e 4 derivam das principais observações dos resultados dos ensaios 1 e 2. No ensaio 3 foi utilizado um reator que usa a mesma abordagem de sistemas de tratamento de esgoto nos quais são empregados reatores anaeróbios e aeróbios sequencialmente. Esse reator foi projetado de forma a permitir também remover ou adicionar

eletrodos com maior facilidade do que encontrado nos modelos de reatores utilizados nos ensaios 1 e 2.

4.1.2 Local de Realização dos Ensaios

As CCM foram alocadas na área de pesquisa da unidade experimental Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da área 1 do Campus USP/São Carlos que recebe os efluentes líquidos gerados dentro do campus por sanitários, restaurantes, laboratórios, cantinas e lavatórios e descartes em geral. As análises e exames foram realizados no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR).

4.1.3 Descrição das CCM

As três concepções de CCM testadas e suas características são apresentadas nos itens a seguir.

4.1.3.1 CCM (anaeróbia/aeróbia) de fluxo ascendente

Considerando a tendência em se pesquisar unidades de tratamento de esgoto compactas, justificada por uma futura limitação de espaço e aumento do custo relativo a área necessária para implantação de ETE, optou-se por investigar o uso da CCM cilíndrica de fluxo ascendente. Nessa configuração a CCM é dividida em duas câmaras, uma inferior anaeróbia e outra superior aeróbia, conforme detalhado nas Figura 4-1 e 4.2

Figura 4-1. Desenho esquemático da CCM cilíndrica de fluxo ascendente.

Figura 4-2. Imagem da CCM cilíndrica de fluxo ascendente.

As barras de grafite carbono foram instaladas nas câmaras do anodo e catodo como eletrodos e unidas por fios de cobre isolados com silicone gel para reduzir a oxidação provocada pela ação do meio. Anéis de plástico corrugado promoveram uma interface de separação entre as câmaras (câmara intermediária). Uma bomba peristáltica bombeava o efluente para a base do reator. A aeração da câmara aeróbia era realizada por meio de um soprador e o ar era disperso com auxílio de uma pedra porosa. Na Tabela 4-1 estão apresentadas algumas características da CCM cilíndrica de fluxo ascendente.

Tabela 4-1. Informações complementares da CCM de fluxo ascendente

Variável	Valor
Volume útil total (L)	29,88
Anaeróbio	9,35
Intermediária	2,83
Aeróbio	14,86
Número de Eletrodos	
Anodo	20
Catodo	20
Área de Eletrodos (m²)⁹	
Anodo	0,183
Catodo	0,240

⁹ Barras cilíndricas de carbono grafite com diâmetro de 1 cm, 29 cm de comprimento para o anodo e 38 cm de comprimento para o catodo.

4.1.3.2 CCM (anaeróbia) de fluxo ascendente

Esse formato de CCM foi tomado como objeto de estudo por poder representar o conceito dos reatores anaeróbios semelhantes ao reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* ou Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo) e RALF (Reator anaeróbico de lodo fluidizado) utilizados no tratamento de esgoto sanitário no Brasil, o que permite avaliar a possibilidade de adaptação de estações em escala plena ao modelo de CCM. Na Figura 4-3 está ilustrada a CCM, a qual é composta de uma única câmara com eletrodos instalados na base e no topo (parcialmente mergulhados na massa líquida).

Figura 4-3. Desenho esquemático da CCM cúbica de fluxo ascendente.

Figura 4-4. Imagem da CCM cúbica de fluxo ascendente.

Na Tabela 4-2 estão apresentadas algumas informações complementares da CCM cúbica de fluxo ascendente.

Tabela 4-2. Informações complementares da CCM cúbica de fluxo ascendente

Variável	Valor
Volume útil total (L)	14,7
Anaeróbio	14,7
Número de Eletrodos	
Anodo	12
Catodo	12
Área de Eletrodos (m²)¹⁰	
Anodo	0,094/0,056/0,018
Catodo	0,095

4.1.3.3 CCM (anaeróbia/aeróbia) de fluxo horizontal

Outra concepção testada, a CCM retangular de fluxo horizontal, visou reproduzir a associação de reatores anaeróbios e aeróbios no tratamento de efluentes. Nesse caso a CCM era composta de 3 câmaras (anaeróbia, aeróbia e decantador) conectadas hidraulicamente umas às outras, conforme representado na Figura 4-5 e com informações complementares apresentadas na Tabela 4-3.

Figura 4-5. Desenho Esquemático da CCM retangular de fluxo horizontal.

¹⁰ Barras cilíndricas de carbono grafite com diâmetro de 1 cm e 25 cm de comprimento.

Figura 4-6. Imagem da CCM retangular de fluxo horizontal.

Tabela 4-3. Informações complementares da CCM retangular de fluxo horizontal

Variável	Valor
Volume útil total (L)	58,32
Anaeróbio	16,98
Aeróbio	29,74
Decantador	11,6
Número de Eletrodos	
Anodo	10
Catodo	10
Área de Eletrodos (m²)¹¹	
Anodo	0,078; 0,047; 0,0094
Catodo	0,078

A entrada do esgoto era realizada pela parede lateral da câmara anaeróbia. Difusores porosos conectados a sopradores eram responsáveis por injetar ar na câmara aeróbia. Os eletrodos foram instalados perpendicularmente ao fluxo em ambas as câmaras.

4.1.4 Análises e Exames

As variáveis monitoras foram definidas com o objetivo de se avaliar o comportamento da resposta das CCM nas condições de operação e possibilitar a comparação entre os ensaios em duas avaliações: eficiência da CCM no tratamento de esgoto sanitário e avaliação do potencial elétrico da CCM.

Para avaliar o funcionamento da CCM para o tratamento de esgoto sanitário foram monitoradas as seguintes variáveis: pH, potencial redox, condutividade elétrica, sólidos totais, sólidos suspensos totais, que seguiram os procedimentos descritos em APHA (2005). As análises de alcalinidade seguiram a metodologia proposta por Ripley et al. (1986). Essas

¹¹ Barras cilíndricas de carbono grafite com diâmetro de 1 cm e 25 cm de comprimento

variáveis permitem analisar o estado de funcionamento da CCM e também possibilitam a comparação com outros sistemas.

O funcionamento do reator como CCM foi avaliado pelo monitoramento da diferença de potencial, de forma contínuo, associado a resistências externas conectadas as CCM. Curvas de polarização também foram geradas empregando diferentes resistências externas (0 a 650 Ω). A potência foi normalizada pela área de eletrodos do anodo e determinada considerando a equação (4). A corrente foi estimada pela lei de Ohm – equação (5).

$$P: \frac{U \cdot i}{a} \quad (4)$$

$$i: \frac{U}{R} \quad (5)$$

P: potência (mW/m²)

U: tensão (V)

i: corrente (A)

a: área de eletrodo do anodo (m²)

R: resistência externa aplicada ao circuito (Ω)

4.1.5 Inóculo e Imobilização da Biomassa

Para inoculação da câmara e eletrodos do anodo foi utilizado lodo anaeróbio proveniente de reator anaeróbio do tipo UASB da ETE USP São Carlos, enquanto que a câmara e eletrodos do catodo foram inoculados com lodo aeróbio coletado do tanque de aeração utilizado por Medeiros (2013).

O procedimento de imobilização da biomassa, para os eletrodos (anodo e catodo), consistiu em colocar os eletrodos de grafite em um recipiente, juntamente com lodo. O lodo anaeróbio foi aplicado aos eletrodos do anodo e os eletrodos do catodo ficaram em contato com o lodo aeróbio, o qual foi aerado continuamente.

Os eletrodos permaneceram em contato com os seus respectivos lodos por um período de 24 horas em temperatura controlada (30 ± 2 °C). Decorrido esse período, os eletrodos foram retirados dos recipientes e colocados em cada câmara da CCM.

No início da operação das CCM foi utilizada vazão de alimentação inferior à prevista para operação, com o intuito de adaptar a biomassa ao esgoto sanitário e evitar o arraste excessivo de biomassa. Cada câmara também foi inoculada com lodo anaeróbio (câmara do anodo) e aeróbio (câmara do catodo) com volume equivalente a 20 % de seu volume total.

4.2 Pesquisa Realizada em Portugal

4.2.1 Considerações Gerais

Os ensaios realizados em Portugal abordaram os conceitos de CCM mais triviais, a CCM de câmara dupla e a de câmara única, ambas com a presença da membrana de troca de prótons (Nafion 212, QuinTech, Germany). Procurou-se ao longo do período otimizar e investigar diferentes variáveis, desde tempo de detenção hidráulico, mediador, estresse hidrodinâmico e espessura da membrana, para as CCM em estudo.

Na pesquisa realizada em Portugal, diferentemente daquela realizada no Brasil, as CCM investigadas não apresentam analogia em sua concepção com sistemas de tratamento biológico de efluentes além de utilizarem condições específicas, um único micro-organismo de interesse (*Lactobacillus pentosus*) e efluente autoclavado, características que permitem a redução do número de variáveis interferentes e maior controle sobre as mesmas favorecendo a reprodutibilidade das condições dos ensaios e a comparação entre as condições testadas de maneira facilitada.

4.2.2 Local de Realização dos Ensaios

A pesquisa de doutorado foi parcialmente realizada em Portugal na Universidade do Porto, junto ao Centro de Estudo de Fenômenos de Transporte (CEFT) integrado ao Departamento de Engenharia Química.

4.2.3 Descrição das CCM

As duas concepções de CCM testadas e suas características são apresentadas nos itens a seguir. Para eletrodo do anodo foi adotado um escovilhão de carbono grafite com haste de aço inoxidável, sendo testados dois modelos (BP 1" e BP 3/4") conforme ilustrado na Figura 4-7 - A e B. Para o catodo foi utilizado tecido de carbono retangular com dimensão 10 cm x cm impregnado com platina – $1\text{mg}/\text{cm}^2$ –, Figura 4-7 - C.

Figura 4-7. Ilustração dos eletrodos A- BP 1; B- BP $\frac{3}{4}$ e C- tecido de carbono.

4.2.3.1 CCM de câmara única

A CCM de câmara única, fabricada em acrílico e com volume útil de 1 L, possuía uma entrada na base lateral e uma saída no topo oposto à entrada. Conforme representado na Figura 4-8 era possível alterar a membrana, eletrodos do anodo e catodo facilmente devido à sua configuração em módulos.

Figura 4-8. Ilustração da CCM de câmara única

4.2.3.2 CCM de câmara dupla

A CCM de câmara dupla consistia em acoplar duas CCM de câmara única, face a face, tornando uma câmara anaeróbia e outra aeróbia, conforme representado na Figura 4-9.

Figura 4-9. Ilustração da CCM de câmara dupla

4.2.4 Especificações dos Ensaios Realizados

As CCM descritas no item 4.2.3 foram testadas conforme as condições apresentadas na Tabela 4-4. Para os ensaios em modo contínuo a vazão foi mantida constante por meio de uma bomba peristáltica previamente calibrada para o atendimento do TDH estipulado pelo ensaio. As polarizações, análises e exames eram realizados uma vez por semana e cada ensaio tinha duração de 30 dias. Os ensaios em batelada foram realizados em ciclos de 24, 48 e 72 horas. Encerrada a batelada era realizada a polarização da CCM e retirado 70 % do volume da câmara do catodo e feita a reposição com água residuária sintética (item 4.2.5) e cada ensaio tinha duração de 15 dias.

Tabela 4-4. Ensaios realizados em Portugal

Ensaio	Câmara CCM	Modo	Área Membrana (cm ²)	TDH (horas)	Observação
1	Dupla	C	25	20	
2	Dupla	C	25	10	
3	Dupla	C	25	20	com agitação de 250 rpm
4	Dupla	C	42,25	20	
5	Dupla	B	42,25	24	
6	Dupla	B	42,25	48	
7	Dupla	B	42,25	72	
8	Dupla	B	42,25	48	com 10 mg/L extrato de levedura
9	Dupla	B	42,25	48	com 50 mg/L extrato de levedura
10	Única	C	25	20	
11	Única	B	25	48	
12	Única	C	25	20	eletrodo do anodo BP ¾
13	Única	B	25	48	com Nafion 117
14	Única	B	25	48	com 50 mg/L extrato de levedura
15	Única	B	25	48	com 50 mg/L de extrato de levedura + Nafion 117

C: contínuo; B: batelada

4.2.5 Água residuária sintética

A água residuária sintética utilizada foi preparada em tambor de 10 L ou em frasco schott de 1 L, autoclavados a 120 °C por 20 min e com a composição apresentada na

Tabela 4-5.

Tabela 4-5. Composição da Água Residuária Sintética

Reagente	Concentração (mg/L)
Glicose	85
Extrato de Levedura	5
Leite em Pó	1300
Amido	5
Cloreto de Amônio	50
K ₂ HPO ₄	22
KH ₂ PO ₄	11
MgSO ₄ ·7H ₂ O	78
CaCO ₃	35

4.2.6 Preparação do inóculo

Foi utilizada a bactéria *Lactobacillus pentosus*, caracterizada por ser Gran-positiva e anaeróbia facultativa ou microaerofílica e em forma de bastonete. As bactérias estavam imersas em glicerol (30%), armazenadas em tubo eppendorf e congeladas a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. A preparação do inóculo obedeceu a seguinte sequência:

1 – Crescimento em MRS sólido: retirada do tubo de eppendorf da câmara criogênica e com o auxílio de uma alça de inoculação foi feita a raspagem para placa de Petri com meio MRS (o meio foi preparado conforme instruções do fabricante). A placa de Petri foi levada à incubadora por dois dias a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. A Figura 4-10-A representa a placa de petri após dois dias de incubação.

2 – Crescimento em MRS líquido: com o auxílio de uma alça de inoculação as colônias formadas foram removidas e adicionadas em um erlenmeyer contendo cerca de 500 mL de MRS líquido (preparado conforme instruções do fabricante). O erlenmeyer foi levado à incubadora por 2 dias a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. A Figura 4-10- B representa a biomassa após dois dias de incubação.

3 – Crescimento na água residuária sintética: a solução contida no erlenmeyer foi homogeneizada manualmente e distribuída em tubos Falcon (Figura 4-10-C), (previamente desinfetados com álcool 70 %) e centrifugada por 40 min em 2500 rpm. O sobrenadante foi descartado e com o auxílio de uma alça de inoculação e um pouco da água residuária sintética o concentrado de biomassa foi ressuspensionado utilizando vortex. Após a ressuspensão o volume foi adicionado em um novo erlenmeyer (previamente autoclavado a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 20 min) e completado para 350 mL com a solução de água residuária sintética. O erlenmeyer (Figura 4-10-D) foi levado à incubadora por 2 dias a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4 – Transferência para a CCM: o volume contido no erlenmeyer foi homogeneizado e transferido para a câmara do anodo.

Todas as fases supracitadas foram realizadas em presença de chama e seguiam a normatização de segurança microbiológica desenvolvida pelo laboratório.

Figura 4-10. Fases da preparação da cultura de *Lactobacillus pentosus*. A- Crescimento em placa de Petri com MRS. B- Crescimento em MRS líquido. C- concentração da biomassa por centrifugação. D- Crescimento dos *Lactobacillus pentosus* na água residuária sintética

4.2.7 Ensaio de Crescimento de Biofilme

Após a realização das experiências descritas no item 4.2.1 foi verificada a necessidade de melhor estudar o efeito do crescimento da biomassa aderida ao eletrodo do anodo e a relação com a potência da CCM. Para atender a esse objetivo foi definido o planejamento dos ensaios de crescimento realizado em uma CCM de câmara única (4.2.3.1) operada em batelada com ciclos de 72 horas. Foram realizados 5 experimentos, sendo o primeiro com duração de 3 dias, o segundo com duração de 6 dias, e assim sucessivamente. O monitoramento das variáveis ocorreu sempre ao final de 72 horas, a exceção da extração de biofilme que ocorreu apenas ao final de cada experimento (3,6,9, ... dias) conforme visualizado na Tabela 4-6.

Tabela 4-6. Duração dos experimentos com respectivos prazos de análises.

Experimento		Dia					
		0	3	6	9	12	15
1	Variáveis Extração	■	■				
2	Variáveis Extração	■	■	■			
3	Variáveis Extração	■	■	■	■		
4	Variáveis Extração	■	■	■	■	■	
5	Variáveis Extração	■	■	■	■	■	■

Variáveis: pH, temperatura, potência elétrica, contagem de *Lactobacillus Pentosus* e quantificação de sólidos presentes no biofilme.

A cada 72 horas era retirado 70 % do volume da câmara do anodo e repostado com uma nova solução de água residuária sintética, repondo os reagentes e retirando os produtos metabólicos. Ao final de cada experimento a CCM era esvaziada e limpa para o início do próximo experimento.

4.2.8 Análises e Exames

De mesma maneira do item 4.1.4 as variáveis foram definidas com o objetivo de se avaliar o comportamento da resposta das CCM nas condições de operação e possibilitar a comparação entre os ensaios em duas avaliações: eficiência da CCM ao tratamento do substrato e avaliação do potencial elétrico da CCM.

Para avaliar a eficiência da CCM em relação ao tratamento foram utilizadas como variáveis: DQO afluente e efluente (centrifugada a 4000 rpm por 15 min, para simular um sistema complementar), pH, temperatura, sólidos totais, sólidos totais voláteis, sólidos totais fixos. As análises foram feitas seguindo os procedimentos descritos em APHA (2005). A quantificação de *Lactobacillus pentosus* empregou a técnica de diluição seriada e plaqueamento (anexo A) em meio sólido MRS e posterior contagem das colônias formadas após incubação por 48 horas e a extração do biofilme aderido ao eletrodo do anodo tem sua metodologia descrita por Frølund, et al., (1996) e Simões, et al., (2007).

As curvas de polarização foram determinadas numa estação de trabalho eletroquímica (Zahner - Electric GmbH & Co.), Figura 4-11 – A, e o teste foi realizado no modo galvanostático (corrente imposta para a resposta da voltagem da célula), Figura 4-11 – B.

Figura 4-11. A - Equipamento para gerar as curvas de polarização. B – Imagem do programa de para curvas de polarização.

A potência foi normalizada pela área da membrana, considerada a dificuldade em calcular a área dos escovilhões e calculada pela equação 6.

$$P: \frac{U \cdot i}{a_m} \quad (6)$$

P: potência (mW/m²)

U: tensão (V)

i: corrente (A)

a_m: área da membrana (m²)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Aspectos Gerais

De modo a facilitar a compreensão, os resultados são apresentados e discutidos em dois grandes tópicos: ensaios realizados no Brasil e ensaios realizados em Portugal, subdivididos em seus respectivos ensaios. Dados complementares são expostos no apêndice a fim de complementar a apresentação dos resultados.

5.3 Resultados e Discussão dos dados obtidos no Brasil

5.3.1 Ensaio 1: Efeito da operação intermitente em uma CCM (anaeróbia/aeróbia) de fluxo ascendente

Esta seção refere-se à condição de ensaio na qual a CCM era alimentada por dois dias com vazão constante de $2,4 \text{ L h}^{-1}$ (TDH anaeróbio 4 horas e TDH aeróbio 6,2 horas) e depois permanência durante 7 dias com alimentação suspensa. Cada conjunto de 9 dias foi denominado ciclo e foram realizados 4 ciclos consecutivos. Durante todos os ciclos a CCM foi mantida sob ação de uma resistência externa de 50Ω , a exceção durante a curva de polarização a qual foi variada de zero a 650Ω .

Esse ensaio, por hipótese, favoreceu uma situação de estresse na biomassa, tendo por objetivo verificar qual seria a tendência de libertação ou não de elétrons com o consumo da matéria orgânica ao longo do tempo e em estágio de endogenia. O monitoramento da tensão durante o primeiro ciclo está representado na Figura 5-1.

Figura 5-1. Tensão gerada na CCM durante o primeiro ciclo.

No primeiro dia foi verificado aumento da tensão com média de 250 mV. Para os outros dias a tensão média foi de 630 mV. Destaca-se que entre o 5º e 7º dias a diferença entre o menor e o maior valor mensurado foi de apenas 25 mV mostrando uma estabilidade da CCM. A potência da CCM também foi mensurada em diferentes dias sendo, em média, próxima a $3,7 \text{ mW m}^{-2}$ e o maior valor determinado em 11 mW m^{-2} .

Durante o ciclo o pH manteve-se próximo à neutralidade na câmara do anodo (6,8) e apresentou tendência de elevação na câmara do catodo (7,6). A eficiência na remoção da DQO foi de 70 %, sendo que a maior parte foi removida na câmara do anodo (64 %). O potencial redox variou de -289 mV no anodo para $+125 \text{ mV}$ no catodo; foi detectado oxigênio dissolvido (OD) no tanque aeróbio chegando até $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ no anodo e de $7,0 \text{ mg L}^{-1}$ para o catodo implicando em uma condição próxima à saturação do meio.

A Figura 5-2 representa a curva de polarização enquanto a Figura 5-3 relaciona a potência e resistência externa da CCM, ambas para o 4º dia do primeiro ciclo.

Figura 5-2. Curva de polarização no quarto dia do primeiro ciclo.

Figura 5-3. Variação da potência e tensão em função da resistência externa no quarto dia do primeiro ciclo.

No segundo ciclo a tensão média foi de 585 mV em circuito aberto, tensão inferior a primeira condição. Entretanto, essa tensão ficou estável por 3 dias e a diferença entre o menor e o maior valor mensurado da tensão diminuiu de 25 para 20 mV. No sétimo dia após a interrupção da alimentação do reator a bomba de alimentação foi novamente acionada e observou-se a inversão dos polos da CCM (valores de tensão negativos). A potência média da CCM variou de 7 a $7,4 \text{ mW m}^{-2}$. Na Figura 5-4 está representada a variação da tensão gerada no segundo ciclo, na Figura 5-5 a curva de polarização e na Figura 5-6 a potência em função da resistência externa.

Figura 5-4. Tensão gerada na CCM durante o segundo ciclo.

As características físico-químicas do esgoto sanitário aplicado na CCM apresentaram comportamento semelhante ao da primeira batelada para o pH e remoção de DQO. Entretanto, ocorreu aumento da concentração de oxigênio dissolvido no catodo, com valores superiores a 10 mg L^{-1} . No anodo a concentração de oxigênio dissolvido manteve-se em $1,5 \text{ mg L}^{-1}$. O potencial redox variou de -190 no anodo para $+180 \text{ mV}$ no catodo.

Figura 5-5. Curva de Polarização no sétimo dia para o segundo ciclo.

Figura 5-6. Variação da potência e tensão em função da resistência externa no 7º dia de batelada no segundo ciclo.

Ao analisar a Figura 5-5 e Figura 5-6 há indicação que as resistências externas aplicadas não foram suficientes para desenvolver toda a curva de polarização típica e, portanto, não se pode afirmar que a potência máxima fora determinada.

No terceiro ciclo a carga orgânica do esgoto estava mais elevada e foi responsável por reduzir consideravelmente o oxigênio dissolvido da câmara do catodo, o qual ficou próximo a zero no primeiro dia e após o terceiro dia apresentou elevação até se estabilizar em 7 mg L^{-1} . A diminuição da concentração de oxigênio dissolvido está associada à maior demanda exercida pela DQO mensurada em 900 mg L^{-1} o que afetou a tensão gerada pela CCM, representada na Figura 5-7.

Figura 5-7. Tensão gerada na CCM durante o terceiro ciclo.

Entre o primeiro e terceiro dia a CCM apresentou instabilidade quanto a manutenção da tensão, atingindo condição estável entre o quarto e sexto dias (Figura 5-8). O potencial redox também foi afetado pela maior carga orgânica variando de - 190 mV no anodo para 70 mV no catodo.

No quarto ciclo optou-se por estender o ensaio por mais dois dias. Como é possível verificar pela Figura 5-8, a maior duração do ensaio resultou na tensão constante por 6 dias e a diferença entre o maior e menor valor registrado foi de 20 mV, com eficiência de remoção de 65 % da DQO.

Figura 5-8. Tensão gerada na CCM durante o quarto ciclo.

Na Figura 5-9 estão comparadas as tensões médias para os quatro ciclos realizados. Nos dois primeiros ciclos foi possível obter uma maior tensão, porém no terceiro e quarto ciclos foram mais estáveis, embora tenham apresentado menor tensão.

Figura 5-9. Comparação entre a tensão gerada na CCM nos quatro ciclos.

A configuração pesquisada favoreceu a remoção de DQO indicando que o formato compacto pode ser considerado vantajoso no que diz respeito ao tratamento de esgoto sanitário. Em contraponto, a CCM apresentou pequena recuperação de elétrons e consequentemente potência baixa. A ampliação de escala da CCM demandará a superação de dificuldades técnicas como verificação do estado físico dos eletrodos em caso de rompimento de cabos e própria quebra e substituição de eletrodos, crescimento excessivo de biomassa e sua respectiva remoção. O transpasse de oxigênio para a câmara do anodo não seria o maior problema, como sugerido por Quan et al. (2012), pois o oxigênio não comprometeria significativamente a potência. Entretanto a baixa potência mensurada e o custo com aeração comprometem o balanço energético da CCM.

A câmara de separação com anéis de plástico corrugado em substituição a materiais, a exemplo, a lã de vidro como utilizado por Mohan et al. (2008), serviu como material suporte da biomassa sendo responsável pelo incremento da eficiência do tratamento do esgoto sanitário. A biomassa presente na câmara de separação causa um efeito de competição com a

biomassa dos eletrodos afetando de forma negativa a libertação de elétrons. A Figura 5-10 representa o consumo da DQO na câmara do anodo e a tensão gerada.

Figura 5-10. Relação entre a DQO consumida e a tensão gerada pela CCM.

O consumo de DQO na câmara anaeróbio (anodo) não apresentou relação com a tensão medida. Todavia ao analisar a relação entre a tensão gerada e o OD na câmara do catodo verifica-se que a quantidade de oxigênio dissolvido presente na câmara do catodo foi o fator limitante na determinação da tensão produzida pela CCM, como representado na Figura 5-11.

Figura 5-11. Relação entre o OD catódico e a tensão gerada pela CCM.

A duração dos ciclos de até 7 dias, em caso de aumento de escala, levaria a necessidade de reatores com grandes volumes, além de que a manutenção do OD maior que 3 mg L^{-1} são impraticáveis devido ao grande consumo de energia elétrica.

5.3.2 Ensaio 2: Efeito da operação intermitente em uma CCM (anaeróbia) de fluxo ascendente.

Com base nos resultados obtidos previamente no ensaio 1 procederam-se ensaios similares com a CCM cúbica a ar, na tentativa de corrigir alguns problemas verificados durante o primeiro ensaio. A CCM cúbica a ar não dependeria de sistema de aeração artificial e todo o oxigênio seria disponível pelo contato direto com a atmosfera. Também houve alteração na posição dos eletrodos que passou a ser perpendicular ao fluxo do esgoto sanitário. Optou-se por reduzir a duração dos ciclos de 7 dias para 6 horas, considerando aproximar de reatores em modo batelada.

A operação da CCM foi mantida por 30 dias para estabilização dos processos biológicos e posteriormente iniciados 56 dias de operação intermitente com monitoramento contínuo. A CCM permaneceu sob influência de uma resistência de $50\ \Omega$ durante todo ensaio, a exceção dos períodos da realização das curvas de polarização. O comportamento da tensão está representado pela Figura 5-12 e cada curva refere-se ao monitoramento de um 1 dia de cada semana de operação (S1: um dia da primeira semana; S2: um dia da segunda semana, assim sucessivamente). Nos períodos compreendidos entre as zero e 6 horas e entre as 12 e 18 horas a bomba de alimentação era acionada, ocorrendo assim a entrada de esgoto sanitário no reator, enquanto que nos períodos compreendidos entre 6 e 12 horas e entre 18 e zero hora a bomba de alimentação permanecia desligada.

Figura 5-12. Monitoramento da tensão na CCM para diferentes dias de operação do ensaio 2.

É observado que em todos os inícios de ciclo (batelada) do reator ocorreu decréscimo da tensão elétrica, e no período entre descargas do esgoto (ciclo de tratamento) ocorreu aumento de tensão elétrica. Esse comportamento foi observado durante praticamente toda duração dos ensaios. Na Tabela 5-1, estão apresentados os resultados obtidos no ensaio 2.

Tabela 5-1. Resumo das variáveis mensuradas durante o ensaio 2.

Variável	Esgoto Sanitário	Efluente Anaeróbio
DQO (mg L ⁻¹) ¹	407 ± 85	145 ± 33
Remoção DQO (%)	-	64 ± 6
pH	7,14 ± 0,2	7,22 ± 0,19
Condutividade (μS cm ⁻¹)	665 ± 104	675 ± 83
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	302 ± 137	215 ± 5
SST (mg L ⁻¹)	89 ± 31	62 ± 15
ST (mg L ⁻¹)	541 ± 125	516 ± 113

1- Amostras filtradas em membrana de fibra de vidro.

A eficiência de remoção de DQO para amostra filtrada foi satisfatória (64±6 %) e a retenção de sólidos foi pequena (ST = 5 %; SST = 30%). A concentração de sólidos torna-se um tanto controversa pois, reatores anaeróbio do tipo UASB formam biomassa pelo consumo dos substrato e é esperado aumento na concentração de sólidos dentro do reator, e o seu controle está associado à operação como, por exemplo, descargas controladas de sólidos. As outras variáveis apresentaram valores normais e esperados para uma câmara anaeróbia.

A variação da tensão para alguns dias de operação está apresentada na Tabela 5-2. Os valores negativos representam que o reator perdeu tensão quando feita comparação com o período inicial, enquanto que valores positivos indicam que no período houve aumento da tensão

Tabela 5-2. Quantificação da variação de tensão (mV) comparando diferentes períodos

Período (hora)			
zero às 6	6 às 12	12 às 18	18 às zero
-113	112	-140	128
-171	8	-144	329
-25	3	-109	109
-111	63	-64	146
-96	0	0	141
-73	81	-113	91
-47	43	-56	146
-101	189	-202	220

A maior diferença de potencial mensurada foi de 448 mV, apresentando valor médio de 336 mV. A potência da CCM variou de 3 a 8 mW m⁻² sendo semelhante aos resultados obtidos por Mohan et al (2008).

A configuração avaliada permite a visualização do processo de formação e adesão da biomassa e também a retirada do conjunto de eletrodos em qualquer momento da operação tendo como inconveniente não ser possível retirar somente os eletrodos do anodo. A entrada do esgoto sanitário por apenas um ponto central contribui para distribuição não uniforme na câmara. Houve crescimento excessivo de biomassa ocasionando o entupimento da tubulação de entrada.

Em comparação com a configuração testada no ensaio 1, esta apresentou como vantagem não depender da aeração pelo fato de os eletrodos estarem em contato direto com a atmosfera, sendo mais favorável ao balanço energético. Outro ponto de interesse foi a potência, ainda que baixa, semelhante à do ensaio 1, todavia com área dos eletrodos 45 % menor. A relação de área ativa de eletrodos tem sido debatida por diferentes autores e a relação não linear em função do aumento da área verificada por Dewan, et al., (2008).

Em termos de tratabilidade de esgoto sanitário essa configuração poderia ser melhorada como a inclusão de um sistema de agitação e melhor controle dos sólidos como medidas para aumento da eficiência na remoção de DQO. As barras de eletrodo do catodo poderiam ser substituídas por placas retangulares mais finas, papel de carbono (JIA et al. 2014), feltro de carbono (CUI et al. 2014) e malha de carbono (REN et al. 2014) com o intuito de reduzir a camada de água exposta ao ar atmosférico.

5.3.3 Ensaio 3: Efeito da variação da área do eletrodo do anodo em uma CCM (anaeróbia/aeróbia) de fluxo horizontal

A CCM testada durante o ensaio 3 foi testada não apenas em função de sua concepção, mas também foi verificada a variação da potência para diferentes áreas de eletrodo do anodo, podendo responder questões futuras quanto a parâmetros de projetos de CCM.

A Figura 5-13 representa o monitoramento da tensão para as 3 áreas de eletrodo estudadas, nas quais a operação em fluxo contínuo resultou em comportamento instável na tensão.

Figura 5-13. Variação da tensão durante o ensaio 3.

A baixa tensão (<50 mV), mensurada em praticamente todo o ensaio, não permitiu que as curvas de polarização fossem realizadas. Sendo assim, os dados refletem a tensão observada para a CCM, apenas quando a mesma esteve sobre o efeito de uma resistência externa (50Ω). Na Tabela 5-3 estão apresentadas a tensão e a potência média para as três áreas testadas.

Tabela 5-3. Tensão e potência médias para diferentes áreas de eletrodos

Variável	Área de eletrodo do ânodo (m^2)		
	0,078	0,047	0,0094
Tensão (mV)	28,9	25,5	45,5
Potência (mW m^{-2})	2,4	1,3	4,2

A grande perda de elétrons para o meio e outros fatores prejudicaram a eficiência da CCM e, conseqüentemente, para as três condições testadas não foram obtidos resultados favoráveis para o funcionamento dessa CCM. Na Figura 5-14 está representada a comparação da potência nominal para as 3 áreas de eletrodo estudadas.

Figura 5-14. Potência em função da área de estudo.

A avaliação da potência normalizada sugere inicialmente que a maior potência média foi encontrada para a menor área, pois ao comparar a potência nominal em função da área do eletrodo do anodo conclui-se que quanto maior a área maior a potência média. A área mínima de eletrodo por volume de CCM ainda é uma variável desconhecida que dependerá do material utilizado, tipo de CCM, efluente a ser empregado e de aspectos microbiológicos.

A baixa eficiência da CCM está, entre diferentes fatores, associada ao baixo TDH (3 horas) utilizado na condição experimental, incorrendo em pequena libertação de elétrons na câmara do anodo verificada pela eficiência de remoção de DQO estando apenas próxima a 23 % para as três áreas testadas. A eficiência global do reator foi em média de 60 % devido a remoção da DQO na câmara do catodo e retenção de sólidos no decantador.

5.3.4 Ensaio 4: Efeito da variação da área do eletrodo do anodo em uma CCM (anaeróbia) de fluxo ascendente.

O monitoramento da tensão para o ensaio 4 está representado na Figura 5-14. Semelhante ao ensaio 3, a tensão apresentou-se instável e com valores que impossibilitaram a análise da curva de polarização, efetuando-se apenas o monitoramento da potência pela resistência de 50 Ω de forma continua para as três áreas de eletrodo testada.

Figura 5-15. Variação da tensão durante o ensaio 4.

A comparação das Figura 5-13 e Figura 5-15 sugere que a configuração testada no ensaio 4 foi responsável por produzir menor tensão. Na Tabela 5-4 está apresentado o resumo do monitoramento da tensão e potência para as áreas testadas

Tabela 5-4. Tensão e potência médias para diferentes áreas de eletrodos

Variável	Área de eletrodo do ânodo (m ²)		
	0,094	0,056	0,018
Tensão (mV)	34,63	48,58	31,16
Potência (mW m ⁻²)	0,60	0,90	1,41

De forma análoga aos resultados obtidos durante o ensaio 3, este ensaio também foi caracterizado pelo desenvolvimento de baixa tensão e potência e também apresentou certa proporcionalidade entre as áreas estudadas e a potência, Figura 5-16

Figura 5-16. Potência em função da área de estudo.

A potência nominal manteve a tendência em ser proporcional a área testada. O baixo TDH aplicado contribuiu para uma pequena libertação de elétrons no meio, a eficiência na remoção de DQO média ficou abaixo dos 25 %, logo os poucos elétrons libertados eram disputados entre o eletrodo e para a própria biomassa. A retirada dos eletrodos durante as fases experimentais apresentaram dificuldade técnicas devido à estrutura do conjunto de eletrodos, pois era necessário retirar todo o conjunto de eletrodos do reator, retirar os eletrodos e inserir novamente o conjunto dentro do reator.

5.3.5 Considerações finais ensaios realizados no Brasil

As pesquisas que envolvem as CCM são novidade no Brasil e o desenvolvimento dessa tecnologia está em estágio embrionário. Por mais que a cada ano o número de artigos, a nível global cresça, detalhes construtivos e metodológicos ainda não são consolidados e acabam por divergir em muitos pontos.

A pesquisa desenvolvida no Brasil tentou avançar no que diz respeito ao tamanho e tipologia dos reatores (reatores sem a presença de membrana de troca de prótons) além de trabalhar com esgoto sanitário o qual está sujeito a sazonalidade com variações significativas em sua composição.

A CCM utilizada no ensaio 3 apresentou melhor facilidade técnica durante os ensaios, o acesso e a visualização dos eletrodos (anodo e catodo) era a mais favorável entre as outras duas configurações testadas. Enquanto que a CCM utilizada no ensaio 1, mesmo por possuir projeto inovador, a adoção de um conjunto único de eletrodos impossibilitava estudos para diferentes áreas e a substituição dos mesmos em caso de quebra.

Os ensaios em ciclos (1 e 2) apresentaram resultados mais satisfatórios que os ensaios com vazão constante (3 e 4). Contudo a baixa potência verificada em todos os ensaios está associada a diferentes fatores, muitos deles não passíveis de entendimento devido ao elevado número de variáveis inter-relacionadas e a dimensão do reator estudado (fenômenos de transferência de massa, curto circuito hidráulico, colonização dos eletrodos, fuga ou não libertação de elétrons). Para uma melhor compreensão de todos esses fenômenos seriam necessários ensaios exaustivos e longos os quais demandariam tempo indisponível para a conclusão do trabalho aqui apresentado.

Mesmo com todas as condições adversas foi possível nas três configurações de CCM testadas mensurar e estabelecer valores de potência, ainda que ínfimos, em CCM sem membranas e com um efluente real e complexo.

5.4 Resultados e Discussão dos dados obtidos em Portugal

Os resultados desta seção são apresentados em função do tipo de CCM testada e a variação imposta pelo sistema. Algumas vezes o mesmo ensaio é utilizado para comparação com outra condição. Em cada subtítulo estão citados os ensaios que serão abordados mantendo a numeração referenciada na Tabela 4-4.

5.4.1 CCM de câmara dupla, efeito TDH (ensaio 1 e 2)

A Figura 5-17 representa a potência em função da corrente específica para o TDH de 20 horas,

Figura 5-17. Polarizações realizadas para a CCM de câmara dupla para o TDH de 20 horas.

A maior potência da CCM, para o TDH de 20 horas, ocorreu na segunda semana de ensaio; e nas outras, houve perda de potência. A remoção de DQO não esteve correlacionada com a potência da CCM, conforme dados apresentados na **Tabela 5-5**.

Tabela 5-5. Potência e remoção de DQO para a CCM dupla operada com TDH de 20 horas.

Semana	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	Remoção DQO (%)
1 ^a	6,62	20	63
2 ^a	10,37	36	47
3 ^a	8,96	20	46
4 ^a	6,78	16	74
Média	8,18±1,57		57±11

A Figura 5-18 representa a potência em função da corrente específica para o TDH de 10 horas,

Figura 5-18. Polarizações realizadas para a CCM de câmara dupla para o TDH de 10 horas.

A potência da CCM, para um TDH de 10 apresentou maior regularidade durante as três primeiras semanas e assim como observado para o TDH de 20 horas a quarta semana foi caracterizada pela redução da potência, a Tabela 5-6 apresenta um resumo da potência e remoção de DQO para o ensaio 2.

Tabela 5-6. Potência e remoção de DQO para a CCM dupla operada com TDH de 10 horas.

Semana	P (mW/m²)	I (mA/m²)	Remoção DQO (%)
1ª	8,46	16	46
2ª	6,7	16	73
3ª	7,66	16	69
4ª	3,61	12	68
Média	6,61±1,84		64±11

A Figura 5-19 apresenta a correlação entre a potência máxima e a eficiência de remoção de DQO.

Figura 5-19. Relação entre a potência e remoção de DQO para os TDH de 10 e 20 horas.

Ocorreu uma proporcionalidade inversa entre a potência e a remoção de DQO para ambos TDH testados. O TDH de 20 horas apresentou uma potência média de cerca de 2 mW/m² maior que o TDH de 10 horas.

A comparação da potência máxima para os TDH de 20 e 10 horas está representada na figura 6. À exceção da primeira semana, o TDH de 20 horas sempre apresentou maior potência.

Figura 5-20. Comparação da potência para os TDH de 10 e 20 horas.

Para o maior TDH a temperatura média foi de 23,2°C e pH de 5,9 com concentração média de $4,36 \times 10^6$ UFC/mL de *L. pentosus*, enquanto que para o TDH de 10 horas a temperatura média de operação foi de 18,3°C e o pH de 5,2 e uma concentração média de

$3,02 \cdot 10^6$ UFC/mL de *L. pentosus*. O TDH de 10 horas pode ter tido o seu desempenho afetado devido à menor temperatura, visualizado pela menor quantidade de micro-organismos presentes na câmara do anodo. A análise do biofilme apresentado na Tabela 5-7 corrobora com análise da potência.

Tabela 5-7. Quantificação de Sólidos presentes no biofilme na variação de TDH

TDH	ST	SV	SF
	mg/mL		
10	2,63	2,02	0,61
20	1,38	0,97	0,4

O TDH de 10 horas foi responsável por formar um biofilme com massa pouco maior que o dobro do que encontrado para o TDH de 20 horas. A maior quantidade de biofilme interferiu no fluxo de massa até o eletrodo, tornando-se uma barreira para entrada de substrato.

5.4.2 CCM de câmara dupla, efeito agitação (ensaios 1 e 3)

Outra variável estudada foi o efeito da agitação (250 rpm) provida por meio de um agitador mecânico mantendo-se o TDH de 20 horas, na qual a CCM apresentou temperatura média de $19,5^{\circ}\text{C}$ e pH de 5,6. A Figura 5-21 representa as polarizações realizadas para o ensaio.

Figura 5-21. Polarizações realizadas para a CCM de câmara dupla sob agitação de 250 rpm.

A remoção de DQO apresentou tendência de aumento ao longo do ensaio enquanto que a potência da CCM se configura de maneira instável (Figura 5-22). Observa-se que o valor máximo de potência foi obtido na terceira semana (7,84 mW/m²) e a maior remoção de DQO mensurada na última semana (75 %).

Figura 5-22. Potência e eficiência na remoção de DQO, CCM de câmara dupla sob agitação de 250 rpm.

A Tabela 5-8 apresenta a comparação da quantificação de sólidos presentes no biofilme para CCM de câmara dupla com TDH de 20 horas com e sem agitação.

Tabela 5-8. Comparação da quantificação de sólidos

RPM	ST	SV	SF	SV/ST
0	1,38	0,97	0,4	0,70
250	8,68	7,29	1,39	0,83

Ao mesmo tempo em que a agitação favoreceu o crescimento de um biofilme, a grande variação dos ST (1,38 para 8,68) também foi responsável por elevar a concentração de SV de 70 a 84 %. Entretanto mesmo a elevada relação de SV/ST não correspondeu em maior potência.

A concentração média de *L. pentosus* foi de $9,83 \times 10^6$ UFC/mL. Nesse ensaio também foi determinada a concentração de *L. pentosus* para o biofilme aderido ao eletrodo do anodo, $4,0 \times 10^8$ UFC/mL, valor esperado considerando o crescimento aderido ao eletrodo.

5.4.3 CCM de câmara dupla, efeito área membrana (ensaio 1 e 4)

A membrana é responsável por formar a interface entre as câmaras do anodo e catodo, transferir os prótons e impedir a passagem do oxigênio para o anodo. Para avaliar a interferência dessa variável, a área da membrana foi aumentada de 25 para 42,25 cm². A Figura 5-23 representa o comportamento da potência para as duas áreas de membrana.

Figura 5-23. Comparação da potência para as áreas de membrana de 25 e 42,25 cm².

O aumento da área de membrana não significou em uma maior potência. Em média a menor área de 25 cm² teve potência de 8,18 mW/m² e de apenas 2,58 mW/m² para a área de 42,25 cm². A Tabela 5-9 apresenta dados complementares sobre o ensaio.

Tabela 5-9. Comparação da quantificação de sólidos para diferentes áreas de membrana

Área de Membrana cm²	ST	SV	SF	SV/ST
	mg/L			
25	1,38	0,97	0,40	0,70
42,25	2,92	1,62	1,29	0,55

A limitação da potência esteve associada a proporção SV/ST entre os ensaios. O biofilme para a menor área era mais ativo quando comparado ao segundo, esse fato incorreu que para a maior área a potência fosse menor.

5.4.4 CCM de câmara dupla, efeito operação batelada (ensaio 5, 6 e 7)

Após a realização dos ensaios em fluxo contínuo decidiu-se avaliar a operação em batelada para a CCM de câmara dupla com ciclos de 24, 48 e 72 horas. Na Figura 5-24 está representada a porcentagem de remoção medida como DQO para as condições testadas. A eficiência de remoção foi, em média, de 50, 66 e 19 % para os ciclos de 24, 48 e 72 horas. Os ciclos de 24 e 48 horas apresentaram aumento da eficiência ao longo da duração dos ensaios, enquanto que o ciclo de 72 horas apresentou comportamento errático ao longo do tempo.

Figura 5-24. Eficiência de Remoção de DQO para a CCM.

As potências máximas da CCM para cada ciclo e em cada ensaio (24, 48 e 72 horas) estão representadas na Figura 5-25. Considerando a média desses valores a maior potência foi obtida para o ciclo de 72 horas ($2,29 \text{ mW/m}^2$), seguido pelo ciclo de 48 horas ($2,15 \text{ mW/m}^2$).

Figura 5-25. Potência Máxima da CCM durante a polarização

Na Figura 5-26 estão representadas as curvas de polarização para a maior potência de cada ciclo (24, 48 e 72 horas). Apenas com o ciclo de 48 horas foram obtidos valores de corrente específica superiores a 15 mA/m^2 , a indicar uma transferência de elétrons mais eficiente quando comparado aos outros ciclos.

Figura 5-26. Comparação da curva de polarização para melhor condição de cada ensaio.

Diferente do verificado nos ensaios 1 e 2, os ciclos de 24 e 48 horas, a potência máxima apresentou uma tendência de proporcionalidade direta com a remoção de DQO, conforme apresentado na Figura 5-27.

Figura 5-27. Relação entre a potência e remoção de DQO para a CCM de câmara dupla operada em ciclos de 24, 48 e 72 horas.

Para o ciclo de 72 horas, a potência e a eficiência na remoção da DQO tiveram sua relação inversa. O maior tempo de duração do ciclo interferiu na dinâmica metabólica dos micro-organismos, pois os mesmos apresentaram um menor consumo do substrato, libertando uma menor quantidade de elétrons.

A quantificação de sólidos no biofilme aderido ao escovilhão do anodo está apresentada na Tabela 5-10.

Tabela 5-10. Quantificação de sólidos aderidos ao biofilme, CCM de câmara dupla operada em batelada (24, 48 e 72 horas).

Superdren® 250mg (25, 10 e 0,72 horas)				
Ciclo	ST	SV	SF	SV/ST
	mg/mL			
24	2,10	1,48	0,63	0,70
48	2,22	1,18	1,04	0,55
72	2,25	0,96	1,28	0,42

A comparação da relação SV/ST para os três ciclos estudados corroboram os resultados encontrados. O ciclo de 24 horas favorecia uma rápida troca do meio reacional (retirada de produtos e adição de reagentes e também de micro-organismos) estimulando o crescimento microbiano de maneira equilibrada, tanto que apresenta a maior relação SV/ST. O aumento da duração do ciclo resultou na formação de biofilmes com uma menor relação SV/ST e com maior acúmulo de SF. Os outros ciclos apresentam relações SV/ST menores de 0,55 e 0,42 para os ciclos de 48 e 72, outras condições monitoradas durante o ensaio são apresentadas na Tabela 5-11.

Tabela 5-11. Comparação de variáveis monitoradas para os ciclos de 24, 48 e 72 horas.

Variável\Ciclo	24	48	72
<i>L. pentosus</i> (UFC/mL)	2,31x10 ⁷	1,10x10 ⁷	1,27x10 ⁷
pH	4,75	5,06	4,63
Temperatura (°C)	19,5	21,6	19,5

O ciclo de 24 horas proporcionou maior renovação do meio tornando o biofilme mais ativo, devido ao maior valor de sólidos voláteis. O longo ciclo de 72 horas favoreceu o crescimento do biofilme, porém como a troca do substrato ocorria em intervalos maiores, ocorria falta de substrato a ocasionar a redução da atividade do biofilme, dificultando a transferência de elétrons e prótons para com o meio.

5.4.5 CCM de câmara dupla, efeito mediador (extrato de levedura), ensaios 6, 8 e 9.

Com base em Correa et al., (2009) e Logan (2013, informação verbal)¹² o extrato de levedura poderia atuar como mediador a facilitar a transferência de elétrons para o eletrodo do anodo, assim a concentração de extrato de levedura foi aumentada de 5 mg/L para 10 e 50 mg/L e testada em bateladas de 48 horas. A Figura 5-28 representa a variação da potência para as três concentrações de extrato de levedura analisadas.

Figura 5-28. Potência mensurada para diferentes concentrações de extrato de levedura

O aumento da concentração de extrato de levedura levou a uma tendência no aumento da potência, sendo mais expressivo para a concentração 50 mg/L. Correa et al., (2009) discutem a dificuldade em associar o extrato de levedura como um mediador ou simplesmente como substrato. A Tabela 5-12 apresenta de outras variáveis monitoradas.

Tabela 5-12. Comparação de variáveis monitoradas para diferentes dosagens de extrato de levedura.

Concentração de extrato de Levedura (mg/L)	ST	SV	SF	SV/ST	P mW/m ²	Remoção DQO (%)	pH
	mg/mL						
5	2,22	1,18	1,04	0,53	2,15 ± 0,99	67 ± 8	5,06
10	2,29	1,07	1,22	0,47	2,46 ± 0,60	50 ± 9	4,97
50	4,44	1,11	3,32	0,25	3,61 ± 2,15	54 ± 13	4,74

A análise dos dados apresentados na Tabela 5-12 apresenta a queda na relação SV/ST em função do aumento da concentração de extrato de levedura e um aumento da potência,

¹² Informação fornecida por Logan durante evento realizado pelo Instituto de Tecnologia Química e Biológica (ITQB) em Oeiras, Lisboa no dia de 29 de Novembro de 2013

sugere-se que o extrato de levedura atuou como mediador.

5.4.6 CCM de câmara única, efeito área do anodo (ensaios 10 e 12)

Considerando o resultado obtido no item 5.4.1 em que a maior potência foi obtida para o TDH de 20 horas, a mesma condição foi testada para a CCM de câmara única e foram testados dois tamanhos de eletrodos para o anodo (BP 1 6,5 cm e BP $\frac{3}{4}$ 2,5 cm). A Figura 5-29 representa a variação da potência ao longo do ensaio para eletrodo BP 1.

Figura 5-29. Polarizações realizadas para a CCM de câmara única com o eletrodo BP1.

A Figura 5-30 representa as curvas de polarizações para o ensaio realizado para o eletrodo BP $\frac{3}{4}$

Figura 5-30. Polarizações realizadas para a CCM de câmara única com o eletrodo BP $\frac{3}{4}$.

A CCM de câmara única apresentou menor potência ($3,54 \pm 1,07 \text{ mW/m}^2$) quando comparada a CCM de câmara dupla ($8,18 \text{ mW/m}^2$), dados do item 5.4.1. A Figura 5-31 representa a comparação da potência para os dois tipos de eletrodos testados.

Figura 5-31. Potência mensurada para dois tipos de eletrodos do anodo

A redução da área do eletrodo do anodo resulta em uma menor área superficial para provocar a adesão dos micro-organismos, logo a tendência do menor eletrodo apresentar menor potência como observado na Figura 5-31. A

Tabela 5-13 completa a análise dos resultados.

Tabela 5-13. Comparação de variáveis monitoradas para diferentes tamanhos de eletrodos.

Variável	ST	SV	SF	SV/ST	<i>L. pentosus</i> UFC/mL	pH
	mg/mL					
BP 1	4,5	2,9	1,59	0,64	$2,10 \times 10^7$	$4,90 \pm 0,15$
BP 3/4	6,35	1,53	4,82	0,24	$1,72 \times 10^6$	$6,22 \pm 0,79$

A relação SV/ ST corrobora a tendência de maior potência no eletrodo com maior área superficial, a elevada concentração de ST (6,35 mg/L) para o menor eletrodo pode ser explicada pelo pH que esteve em média em $6,22 \pm 0,79$ favorecendo a deposição de CaCO_3 , visualizado pela maior concentração de SF (4,82 mg/L). A grande quantidade de material inerte pode resultar no aumento da dificuldade no transporte de massa entre o biofilme formado e o meio.

5.4.7 CCM de câmara única, efeito mediador (ensaio 11 e 14)

O efeito do extrato de levedura também foi investigado para a CCM de câmara única operada em batelada com ciclos de 48 horas para as concentrações de 5 e 50 mg/L. A Figura 5-32 representa o comportamento da potência para os ensaios mencionados.

Figura 5-32. Potência mensurada para as concentrações de 5 e 50 mg/L de extrato de levedura.

Para os três primeiros ciclos a menor concentração de extrato de levedura resultou em uma maior potência. A partir do quarto ciclo a CCM com a dosagem de 50 mg/L apresentou maior potência. O comportamento da CCM de câmara única foi semelhante ao encontrado para a CCM de câmara dupla, na qual a maior concentração de levedura resultou na maior potência. A Tabela 5-14 apresenta outras variáveis monitoradas.

Tabela 5-14. Comparação de variáveis monitoradas para diferentes dosagens de extrato de levedura para a CCM de câmara única.

Variável	ST	SV	SF	SV/ST	<i>L. pentosus</i> UFC/mL	pH
	mg/mL					
5 mg/L	4,5	1,27	3,23	0,28	$2,63 \times 10^8$	$4,78 \pm 0,27$
50 mg/L	9,73	4,89	4,84	0,50	$6,33 \times 10^5$	$3,96 \pm 0,41$

O aumento da dosagem de extrato de levedura em 10 vezes não resultou no incremento significativo da potência máxima da CCM (Figura 5-32), sendo responsável por formar um biofilme com maior massa (9,73 mg/mL) e com uma baixa concentração de *L. pentosus* ($6,33 \times 10^5$), sugerindo que o mesmo tenha sido usado tanto como substrato e como mediador. A

Tabela 5-15 apresenta a comparação das potências médias e máximas para as CCM de câmara simples e dupla e em função da variação da dosagem de extrato de levedura.

Tabela 5-15. Comparação da potência para as CCM de câmara única e dupla e com diferentes dosagens de extrato de levedura.

Extrato de Levedura	Câmara Dupla		Câmara Única		Câmara Dupla	Câmara Única
	Pmax	Pmed	Pmax	Pmed	Remoção DQO	
mg/L	mW/m ²				%	
5	3,56	2,15	5,00	3,87	67	56
10	3,61	2,46	-	-	50	-
50	6,63	3,61	5,53	4,79	54	46

P:potência máxima; Pmed: potência média.

A CCM de câmara única apresentou-se mais vantajosa, pois apresenta valores de potência média superiores à CCM de câmara dupla. A alteração da configuração aparentemente teve um efeito maior na potência final da CCM à atuação do extrato de levedura como mediador.

5.4.8 CCM de câmara única, efeito espessura da membrana (ensaios 11 e 13).

A espessura da membrana interfere na resistência que os prótons devem enfrentar para chegarem ao eletrodo do catodo, quanto maior a resistência maior poderá ser a redução da potência. Para avaliar o efeito da espessura da membrana, são apresentados os resultados do ensaio realizado em uma CCM de câmara única operada em batelada com ciclo de 48 horas sendo comparadas duas membranas a Nafion 117 (183 μ m) e 212 (50 μ m). A variação da potência ao longo do experimento está representada na Figura 5-33.

Figura 5-33. Potência mensurada para as membranas Nafion 117 e 212.

A potência média para a membrana 117 foi de $2,47 \pm 0,12$ mW/m², enquanto que a membrana 212 apresentou potência de $3,87 \pm 0,68$ mW/m². A Tabela 5-16 apresenta outras variáveis monitoradas

Tabela 5-16. Comparação de variáveis monitoradas para diferentes espessuras de membranas

Variável	ST	SV	SF	SV/ST	<i>L. Pentosus</i>	pH	Temperatura
	mg/mL				UFC/mL		
212	4,50	1,27	3,23	0,28	2,63 x 10 ⁸	4,78	20
117	3,11	0,84	2,27	0,27	4,87 x 10 ⁶	3,87	19

A eficiência de remoção de DQO foi de 57 % para a CCM com membrana de 212 e apenas 40 % para a membrana 117. As CCM operaram em temperaturas semelhantes a diferença entre as CCM está na concentração de *L. pentosus* e do pH. A membrana 117 por ser mais espessa pode ter interferido no transpasse de íons H⁺ para o catodo resultando na redução do pH, menor concentração de *L. pentosus* e menor formação do biofilme verificado pelo menor valor de ST.

5.4.9 CCM de câmara única, efeito membrana e mediador (extrato de levedura), ensaios 13, 14 e 15

A combinação de uma membrana mais espessa (Nafion 117) com e sem mediador (extrato de levedura), resulta em uma potência similar quando comparadas à CCM com a membrana Nafion 212 (com adição de mediador). Todos os ensaios foram realizados em ciclos de 48 horas, as potências são representadas na Figura 5-34.

Figura 5-34. Variação da potência para ensaios com variação de membrana e extrato de levedura em CCM de câmara única.

É possível verificar que a membrana 117 (mais espessa) foi nesse caso o limitante no rendimento da potência. No experimento em que foi usada a membrana 177 com adição de extrato de levedura os resultados apresentaram apenas um pequeno incremento na potência, enquanto que a membrana 212 (menos espessa) com adição o extrato de levedura com a potência medida foi maior.

Tabela 5-17. Comparação de variáveis monitoradas para os ensaios com variação de membrana e extrato de levedura.

Variável	membrana e extrato de revestida:				<i>L. Pentosus</i> UFC/mL	pH	Temperatura °C
	ST	SV	SF	SV/ST			
	mg/mL						
Nafion 117	3,11	0,84	2,27	0,27	4,87 x 10 ⁶	3,87	19
Nafion 212 + 50 mg/L	9,73	4,89	4,84	0,50	6,33 x 10 ⁵	3,96	23
Nafion 117 +50 mg/L	7,79	4,77	3,02	0,61	1,11 x 10 ⁸	3,73	23

Os dados apresentados na Tabela 5-17 corroboram a hipótese que a membrana foi o fator limitante. O ensaio (membrana Nafion 117 com extrato de levedura) resultou na maior relação SV/ST (0,60) e também uma grande concentração de colônia ativas de *L. pentosus* ($1,1 \times 10^8$ UFC/mL) e mesmo assim a potência média foi de apenas $2,76 \pm 0,46$ mW/m², um pouco superior de quando utilizada apenas a membrana Nafion 117 ($2,47 \pm 0,13$ mW/m²).

5.4.10 CCM de câmara única, efeito do crescimento do biofilme

Esta seção refere-se à condição de ensaio descrita no item 4.2.7; que, em resumo, busca avaliar a potência em função do crescimento do biofilme aderido ao eletrodo do anodo para diferentes tempos de crescimento.

A Figura 5-35 representa a variação da potência para diferentes durações de ensaio. A diferença entre as potências aumentou com a duração dos ensaios; a exceção do ensaio com duração de 9, dias que apresentou maior potência no terceiro dia (3,81 mW/m²). Porém, a potência não foi mantida durante o restante do ensaio, enquanto que a potência medida para os ensaios de 6, 12 e 15 dias apresentavam comportamento semelhante até o 9 dia de ensaio. A maior potência (5,62 mW/m²) foi medida no ensaio de 15 dias (décimo segundo dia de ensaio). Os dados do ensaio com duração de 3 dias não são apresentados devido a inconsistência durante a determinação da potência para o ensaio.

Figura 5-35. Potência para diferentes durações de ensaio.

As variações nas curvas de potência estão relacionadas a diversos fatores entre eles a quantidade de micro-organismos ativos, pH e temperatura. A Figura 5-36 representa a quantificação de *Lactobacillus pentosus* dentro da câmara do anodo CCM durante os

experimentos. A quantidade micro-organismos dispersos na câmara do anodo apresentou grande diferenciação durante os ensaios, era esperado uma maior reprodutibilidade para essa variável.

Figura 5-36. Quantificação de *L. pentosus* para diferentes ensaios.

A Tabela 5-18 apresenta os valores de pH e de potência máxima para os ensaios de crescimento.

Tabela 5-18. Relação do pH e potência para o ensaio de crescimento em CCM de câmara única em ciclos de 72 horas.

Ensaio	6d		9d		12d		15d	
Dia	pH	P mW/m ²	pH	P mW/m ²	pH	P mW/m ²	pH	P mW/m ²
3	3,83	1,33	3,95	3,81	3,71	1,24	3,55	1,58
6	4,3	2,22	3,95	0,95	3,47	1,93	3,61	2,54
9	-	-	4	1,03	4	2,04	3,32	2,69
12	-	-	-	-	4,15	2,15	4,05	5,62
15	-	-	-	-	-	-	3,82	3,27

O crescimento dos *L. pentosus* pode ter sido afetado devido às condições mais ácidas desenvolvidas no meio, visto que segundo Biffinger, et al., (2008); Jadhav, et al., (2009) e Behera & Ghangrekar (2009), em geral as bactérias necessitam de um pH em uma faixa mais neutra para o seu desenvolvimento ótimo. O controle do pH poderia ser utilizado como uma estratégia para um melhor controle do processo, o qual tem que ser realizado pela adição de soluções com a finalidade de tamponar a câmara do anodo. Entre as pesquisas estão tampões de fosfato, (KIM, et al., 2007, MIN, et al., 2008) e bicarbonato (FAN, et al., 2007).

A quantificação dos sólidos e de *L. pentosus* aderidos ao eletrodo do anodo e a potência mensurada ao final de cada ensaio realizado são apresentados na Tabela 5-19.

Tabela 5-19. Variáveis monitoradas durante o ensaio de crescimento de *L. pentosus* para a CCM de câmara única em ciclos de 72 horas.

Duração Ensaio	ST	SF	SV	SV/SF	<i>L. pentosus</i> UFC/mL	Potência mW/m ²
	mg/mL					
3	6,22	4,89	1,34	0,21	1,09 x 10 ⁸	-
6	7,85	4,41	3,45	0,44	3,83 x 10 ⁸	2,22
9	10,65	5,30	5,36	0,50	1,10 x 10 ⁸	1,03
12	10,54	5,13	5,41	0,51	8,70 x 10 ⁸	2,15
15	9,36	5,17	4,19	0,45	7,88 x 10 ⁸	3,27

Ao comparar a concentração de ST para os diferentes tempos de ensaio é verificado o aumento desse valor, indicando o crescimento da biomassa aderida. A realização desse ensaio permitiu analisar a formação do biofilme ao longo do tempo, diferente do que era observado para os outros ensaios, apresentados nos itens 5.4.1 a 5.4.9. A Figura 5-37 representa a relação entre a quantidade de micro-organismos presentes no biofilme (SV) e a potência.

Figura 5-37. Relação entre a potência e a concentração de *L. pentosus* presentes no biofilme

A composição do biofilme em função dos sólidos (ST,SF e SV) e quantidade de micro-organismos apresenta-se correlacionado para a potência da CCM, logo foi observado que o biofilme com a maior relação UFC/mg SV apresenta maior potencia.

5.4.11 Considerações finais dos ensaios realizados em Portugal

Os ensaios realizados nas CCM de câmara única e dupla permitiram o acompanhamento e teste de várias variáveis em um menor tempo. As condições de ensaio (efluente sintético, micro-organismo de interesse e menor tamanho das CCM) facilitaram a execução de ensaios.

Variações intrínsecas aos micro-organismos também são fontes de indeterminações nos resultados e poderiam ser minimizadas com repetições sucessivas das condições experimentais, o que pode tornar-se inexecutável.

Para a otimização da CCM faz-se necessária uma análise global de todas as variáveis estudadas afim de determinar o grau de contribuição de cada variável no funcionamento da CCM. Infelizmente muitas vezes na literatura não é discutido até que ponto a variável analisada é significativa na eficiência global do sistema e se é um fenômeno geral ou uma característica específica para cada sistema.

Os maiores valores de potência média e máxima foram obtidos com a CCM de câmara dupla, entretanto deve-se considerar o custo energético com aeração para avaliar o sistema de maneira total. O melhor desempenho obtido para a CCM de uma única câmara foi devido à adição de 50 mg/L de extrato de levedura.

O ensaio de crescimento ajudou a compreender melhor o processo de formação do biofilme para diferentes tempos de exposição. A relação da quantidade de micro-organismos ativos e os SV corroboram com os resultados de que é necessário formar um biofilme com uma grande quantidade de micro-organismos ativos. O ensaio não conseguiu determinar até que ponto o biofilme poderia crescer sem comprometer a eficiência da CCM, considerando que a camada do biofilme pode ser responsável por interferir na transferência de massa e aumento da resistência que a CCM tem que superar.

Análises como espessura do biofilme, densidade e nível de coesão poderiam caracterizar o biofilme de maneira mais completa, porém devido ao tipo de eletrodo utilizado (escovilhão com múltiplas hastes) não foram passíveis de realização.

6. CONCLUSÕES

6.1 Conclusões da pesquisa realizada no Brasil

- As CCM, cúbica de fluxo ascendente e retangular de fluxo horizontal simularam adequadamente sistemas de tratamento de esgoto sanitário. No entanto, o funcionamento como CCM sem membrana não alcançou grandes potenciais elétricos;
- Os melhores resultados foram obtidos com a operação intermitente, tanto para a CCM tubular de fluxo ascendente e CCM cúbica de fluxo ascendente. A redução dos ciclos de 7 dias para 6 horas, sinaliza que o tempo entre os ciclos pode ainda mais otimizado e com possível aplicação em sistemas reais;
- A relação direta da potência com a área da membrana foi encontrada para as CCM retangular de fluxo horizontal e cúbica de fluxo ascendente, demonstrando ainda que a comparação da eficiência da CCM pela potência normalizada, pode levar a superestimar a potência da CCM.

6.2 Conclusões da pesquisa realizada em Portugal

- As CCM de câmara única e dupla possibilitam a realização de um grande número de ensaios e a análise de diferentes variáveis, A nível geral a CCM de câmara única apresentou melhor eficiência no potencial elétrico.
- O biofilme apresentou papel crucial na eficiência da CCM e em algumas vezes sobrepondo-se a variável estudada, (por exemplo, como discutido no item, 5.4.3 quando a área de membrana foi aumentada e a potência da CCM foi menor).
- A caracterização do biofilme, pela quantificação de sólidos e *L. pentosus*, mostrou-se como uma ferramenta de fácil aplicação na análise do funcionamento da CCM.

7. SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

Dentre os diferentes pontos explorados nessa tese outros também se fazem necessários para o aprofundamento da busca pelo entendimento do funcionamento das CCM em destaque para:

- Eletrodos: compreender a interferência dos diferentes materiais e formatos do eletrodos para reduzir a resistência à transferência dos elétrons.
- Membranas: desenvolver membranas mais econômicas para que possam ser usadas em larga escala.
- Modelos Matemáticos: criar modelos que permitam simular diferentes variáveis reduzindo assim a necessidade de ensaios longos e custosos.
- Microbiologia: a utilização de técnicas de microscopia co-focal e a laser poderão auxiliar em estudos específicos para determinação de testes para as bactérias geradoras de elétrons, assim como um melhor entendimento dos sistemas de transferência de elétrons,
- Biofilme: compreensão acerca da adesão, crescimento e interferência do biofilme junto ao eletrodo e a transferência dos elétrons.
- Sensores: um dos potenciais usos das CCM é como biosensor para DBO.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AELTERMAN, P.; RABAEY, K.; PHAM, H.; BOON,N.;VERSTRAETE W. Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. **Environmental Science & Technology**. v.40, n. 10, p. 3388–3394, 2009.

ANTONOPOULOU, G.; STAMATELATOU, K.; BEBELIS, S.; LYBERATOS, G. Electricity generation from synthetic substrates and cheese whey using a two chamber microbial fuel cell . **Biochemical Engineering**. v.50, n.1-2, p. 10-15, 2010.

APHA; AWWA; WPFC. **Standard Methods for the examination water and wastewater**, 21th edition, American Public Health Association, Washington 2005.

BEHERA M.; JANA P.S.; MORE, T.T.; GHANGREKAR, M. Rice mill wastewater treatment in microbial fuel cells fabricated using proton exchange membrane and earthen pot at different pH. **Bioelectrochemistry**. v. 79, n. 2, p. 228-233, 2010.

BEHERA, M.; GHANGREKAR, M.M. Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anodic feed pH. **Bioresource Technology**. v.100, n. 21, p. 5114-5121, 2009.

BIFFINGER, J. C.; PIETRON, J.; BRETSCCHGER, O.; NADEAU, L. L.; JOHNSON, G.R.; WILLIAMS, C.C.; NEALSON, K. H.; RINGEISEN, B.R. The influence of acidity on microbial fuel cells containing *Shewanella oneidensis*, **Biosensors and Bioelectronics**. v. 24, n.4, p. 900-905, 2008.

CAI, J.; ZHENG, P.; ZHANG, J.; XIE, Z.; LI, W.; SUN, P. Simultaneous anaerobic sulfide and nitrate removal coupled with electricity generation in Microbial Fuel Cell. **Bioresource Technology**. v. 129, p 224-228, 2013.

CHARACKLIS, W. G. Bioengineering report: Fouling biofilm development: A process analysis. **Biotechnology and Bioengineering**. v.23, n. 29, p. 1923-1960, 1981.

CHOI, J.; AHN, Y. Continuous electricity generation in stacked air cathode microbial fuel cell treating domestic wastewater, **Journal of Environmental Management**. v. 130, n. 30, p 146-152, 2013.

CLAUWAERT, P.; AELTERMAN, P.; PHAM, T.H.; SCHAMPHELAIRE, L.; CARBALLA, M.; RABAEY, K.; VERSTRAETE, W. Minimizing losses in bio-electrochemical systems: The road to applications, **Applied Microbiology and Biotechnology**. v.79, n. 6, p. 901-913, 2008.

CORREA, C. A. R.; AQUINO, S. F.; CALDAS, P.C.P; SILVA, S. Q. Uso de extrato de levedura como fonte de carbono e de mediadores redox, para a degradação anaeróbia de corante azo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.14, n.4, p. 559-568, 2009.

COSTERTON, J.W.; LEWANDOWSKI, Z.; CALDWELL, D.E.; KORBER, D.R.; LAPPIN-SCOTT, H. Microbial biofilms. **Annual Reviews in Microbiology**, v.49 p. 711-745, 1995.

CUI D., WANG Y. Q., XING L. D., LI W. S. Which determines power generation of microbial fuel cell based on carbon anode, surface morphology or oxygen-containing group. **International journal of hydrogen energy**. v.39, n. 27, p. 15081-15087, 2014.

DEWAN, A.; BEYENAL, H.; LEWANDOWSKI, Z. Scaling up microbial fuel cells, **Environmental Science & Technology**. v. 42, n. 20, p.7643–7648, 2008.

DU Z.; LI H. GU T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy . **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 5, p. 464-482. 2007.

DU, Z.; LI, Q.; TONG, M.; LI, S.; LI, H. Electricity Generation Using Membrane-less Microbial Fuel Cell during Wastewater Treatment, **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 16, n. 5, p. 772-777, 2008.

FAN, Y.; HU, H.Q.; LIU, H. Sustainable power generation in microbial fuel cells using bicarbonate buffer and proton transfer mechanisms. **Environmental Science & Technology**. v. 41, n. 23, p 8154-8158, 2007.

FANGZHOU, D.; ZHENGLONG, L.; SHAOQIANG, Y.; BEIZHEN,X.; HONG,L. Electricity generation directly using human feces wastewater for life support system. **Acta Astronautica**. v. 68, n 9–10, p 1537-1547, 2011.

FRØLUND, B.; PALMGREN, R.; KEIDING, A.; NIELSEN, P.H. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin. **Water Research**. v. 30, n. 8, p. 1749 – 1758, 1996.

GIL G-C.; CHANG I-S.; KIM B. H.; KIM M.; JANG J-K.; PARK H.S.; KIM H.J. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. **Biosensors and Bioelectronics**. n.18, v. 4, p 327-334, 2003.

GONZALES, B.C. **Geração de energia elétrica a partir de eletrodos imersos em sistema do tipo célula a biocombustível composta por reator anaeróbio e reator aeróbio operados em série alimentado com esgoto sanitário**. 2013 187 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

HASHEMI, J.; SAMIMI, A. Steady state electric power generation in up-flow microbial fuel cell using the estimated time span method for bacteria growth domestic wastewater. **Biomass and Bioenergy**. v. 45, p 65-76, 2012.

HAYS, S.; ZHANG, F.; LOGAN B. E. Performance of two different types of anodes in membrane electrode assembly microbial fuel cells for power generation from domestic wastewater. **Journal of Power Sources**. v. 196, n. 20, p. 8293-8300, 2011.

HERRERO-HERNANDEZ, E.; SMITH, T.J.; AKID R. Electricity generation from wastewaters with starch as carbon source using a mediatorless microbial fuel cell. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 39, n. 1, p. 194-198, 2013.

HUANG, J.; YANG, P.; GUO, Y.; ZHANG, K. Electricity generation during wastewater treatment: An approach using an AFB-MFC for alcohol distillery wastewater, **Desalination**, v. 276, n. 1-3, p. 373-378, 2011.

IEROPOULOS I. A.; GREENMAN J.; MELHUISE C.; HART J. Comparative study of three types of microbial fuel cell. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 37, n. 2, p. 238-245, 2005.

JADHAV, G.S.; GHANGREKAR, M.M. Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration, **Bioresource Technology**. v. 100, n. 2, p. 717-723, 2009.

JANG J. K.; PHAMA T. H.; CHANG I. S.; KANG K. H.; MOONA H.; CHOB K. S.; KIM B. H. Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. **Process Biochemistry**, v. 39, n. 8, p. 1007-1012, 2004.

JIA Q.; WEI L.; HAM H.; SHEN J. Factors that influence the performance of two-chamber microbial fuel cell. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 39, n. 25, p. 13687-13693, 2014.

JIANG, D.; CURTIS, M.; TROOP, E.; SCHEIBLE, K.; MCGRATH, J.; HU, B.; SUIB, S.; RAYMOND, D.; LI, B. A pilot-scale study on utilizing multi-anode/cathode microbial fuel cells (MAC MFCs) to enhance the power production in wastewater treatment. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 36, n. 1, p. 876-884, 2011.

KAEWKANNETRA,P.; CHIWES, W.; CHIU, T.Y. Treatment of cassava mill wastewater and production of electricity through microbial fuel cell technology. **Fuel**. v. 90, n. 8, p. 2746-2750, 2011.

KIM, J.R.; CHENG, S.; OH, S.E. LOGAN, B. E. Power generation using different cation, anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells. **Environmental Science & Technology**. v. 41, p. 1004–1009, 2007.

KIM, K.Y.; CHAE, K.J.; CHOI, M.J.; YANG, E.T.; HWANG, M.H.; KIM, I.S. High-quality effluent and electricity production from non-CEM based flow-through type microbial fuel cell. **Chemical Engineering Journal**. v. 218, n. 15, p. 19-23, 2012.

KRAMER, J.; SOUKIAZIAN, S.; MAHONEY, S.; HICKS-GARNER, J. Microbial fuel cell biofilm characterization with thermo gravimetric analysis on bare and polyethylene mine surface modified carbon foam anodes. **Journal of Power Sources**. n. 210, p. 122-128, 2012.

LARROSA-GUERRERO A., SCOTT K., HEAD I.M., MATEO F., GINESTA A., GODINEZ C. Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. **Fuel**. v. 89, n. 12, p. 3985-3994, 2010.

LEDEZMA, P.; GREENMAN, J.; IEROPOULOS, I. Maximising electricity production by controlling the biofilm specific growth rate in microbial fuel cells. **Bioresource Technology**. v. 118, p. 615-618, 2012.

LEE, Y.; NIRMALAKHANDAN N. Electricity production in membrane-less microbial fuel cell fed with livestock organic solid waste. **Bioresource Technology**. v. 102, n. 10, p. 5831-5835, 2011.

LI, X.; ZHY, N.; WANG, Y.; LI, P.; WU, P.; WU, J. Animal carcass wastewater treatment and bioelectricity generation in up-flow tubular microbial fuel cells: Effects of HRT and non-precious metallic catalyst. **Bioresource Technology** . v. 126, p. 454-460, 2013.

LIU H.; CHENG S.; HUANG L.; LOGAN B. E. Scale-up of membrane-free single-chamber microbial fuel cells. **Journal of Power Sources**. v. 179, n. 1, p. 274–279, 2008.

LIU, J.; QIAO, Y.; GUO, C.X.; LIM, S.; SONG, H.; LI, C.M. Graphene/carbon cloth anode for high-performance mediator less microbial fuel cells. **Bioresource Technology**. v. 114, p. 275-280, 2012.

LIU, X.; SUN, X.; HUANG, Y.; SHENG, G.; ZHOU, K.; ZENG, R. J.; DONG, F.; WANG S.; XU, A.; TONG, Z.; YU, H. Nano-structured manganese oxide as a cathodic catalyst for enhanced oxygen reduction in a microbial fuel cell fed with a synthetic wastewater. **Water Research**. v. 44, n. 18, p. 5298-5305, 2010.

LIU, Y.; TAY J. Detachment forces and their influence on the structure and metabolic behaviour of biofilms. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**. v. 17, n. 2, p. 111-117, 2001.

MANSOORIAN, H. J.; MAHVI, A. H.; JAFARI, A. J.; AMIN, M. M.; RAJABIZADEH, A.; KHANJANI, N. Bioelectricity generation using two chamber microbial fuel cell treating wastewater from food processing. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 52, n. 6-7, p. 352-357, 2013.

MARCON, L. R. C. Potencialidade da célula combustível microbiana para geração de energia elétrica a partir de esgoto sanitário. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MARDANPOUR, M. M.; ESFAHANY, M. N.; BEHZAD, T.; SEDAQATVAND, R. Single chamber microbial fuel cell with spiral anode for dairy wastewater treatment. **Biosensors and Bioelectronics**. v. 38, n. 1, p. 264-269, 2012.

MARQUES, A. F. **Células combustíveis microbianas aplicadas ao tratamento de efluentes**. 2014. Monografia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

MEDEIROS, R. C. **Avaliação da remoção de Giardia spp. e Cryptosporidium spp. em processos de tratamento de esgoto sanitário**. 2013. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MIN, B.; ROMÁN, O.B.; ANGELIDAKI, I. Importance of temperature and anodic medium composition on microbial fuel cell (MFC) performance. **Biotechnology Letters**. v.30, n. 7, p. 1213–1218, 2008.

MOHAN V.; RAGHAVULU S. V.; SARMA P.N. Biochemical evaluation of bioelectricity production process from anaerobic wastewater treatment in a single chambered microbial fuel cell (MFC) employing glass wool membrane. **Biosensors and Bioelectronics**. v. 23, n. 9, p. 1326-1332, 2008.

MOHAN, S.V.; MOHANAKRISHNA, G.; VELVIZHI, V.L.; BABU, P.N. SARMA. Bio-catalyzed electrochemical treatment of real field dairy wastewater with simultaneous power generation. **Biochemical Engineering Journal**. v. 51, n. 1-2, p. 32–39, 2010.

OH, S. E.; LOGAN. B.E. Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation. **Journal Power Sources**. v. 167, n. 1, p. 11-17, 2007.

PANT D.; BOGAERT G. Van.; DIELS L.;VANBROEKHOVEN K. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 6, p. 1533-1543, 2010.

PEIXOTO, L.; MIN, B.; MARTINS, G.; BRITO, A. G.; KROFF, P.; PARPOT, P.; ANGELIDAKI, I.; NOGUEIRA, R. In situ microbial fuel cell-based biosensor for organic carbon. **Bioelectrochemistry**. v. 81, n 2, p. 99-103, 2011.

QUAN X.; QUAN Y.; TAO K. Effect of anode aeration on the performance and microbial community of an air-cathode microbial fuel cell. **Chemical Engineering Journal**. v. 210, n. 1, p. 150-156, 2012.

RAHIMNEJAD, M.; GHOREYSHI, A.A.; NAJAFPOUR, G.D.; YOUNESI, H.; SHAKERI, M. A novel microbial fuel cell stack for continuous production of clean energy. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 37, n. 7, p. 5992-6000, 2012.

REN, L., AHN, Y., HOU, H., ZHANG, F., LOGAN, B. E. Electrochemical Study Of Multi-Electrode Microbial Fuel Cells Under Fed-Batch And Continuous Flow Conditions. **Journal of Power Sources**. v. 257, n. 1, p. 454-460, 2014.

RIKAME, S.S.; MUNGRAY, A. A. MUNGRAT A. K. Electricity generation from acidogenic food waste leachate using dual chamber mediator less microbial fuel cell. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 75, p 131–137, 2012.

RINALDI, A., MECHERI, B., GARAVAGLIA, V., LICOCCIA, S., Di NARDO, P., TRAVERSA, E. Engineering materials and biology to boost performance of microbial fuel cells: a critical review. **Energy & Environmental Science**. v. 1, p. 417-429, 2008.

RITTMANN B. E. Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. **Biotechnology and bioengineering**. v. 100, n. 2, p. 203-212, 2008.

RYU, J.H.; LEE, H.L.; LEE, Y.P.; KIM, T.S.; KIM, M.K.; ANH, D.T.N. ; TRAN, H.T.; AHN D.H. Simultaneous carbon and nitrogen removal from piggery wastewater using loop configuration microbial fuel cell. **Process Biochemistry**. v. 48, n. 7, p. 1080–1085, 2013.

SEVDA S.; DOMINGUEZ-BENETTON X.; VANBROEKHOVEN K.; SREEKRISHNAN, T.R.; PANT, D. Characterization and comparison of the performance of two different separator types in air-cathode microbial fuel cell treating synthetic wastewater. **Chemical Engineering Journal**. v. 228, p. 1-11, 2013.

SHAHGALDI, S.; GHASEMI M.; DAUD W. R. W.; YAAKOB Z.; SEDIGHI M.; ALAM J.; ISMAIL A. F. Performance enhancement of microbial fuel cell by PVDF/Nafion nanofibre composite proton exchange membrane. **Fuel processing technology**. v. 124, p. 290-295, 2014.

SHUKLA, A.K.; SURESH, P.; BERCHMANS, S.; RAJENDRAN A. Biological fuel cells and their applications. **Current Science**. v. 87, p. 455-468, 2004.

SIMÕES, M.; PEREIRA, M.O.; SILLANKORVA, S.; AZEREDO, J.; VIEIRA, M.J. The effect of hydrodynamic conditions on the phenotype of *Pseudomonas fluorescens* biofilms. **Biofouling**. v. 23, n. 3-4, p. 249-258, 2007.

SONAWANE J. M.; GUPTA A.; GHOSH P. C. Multi-electrode microbial fuel cell (MEMFC): A close analysis towards large scale system architecture. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 38, n. 12, p. 5106–5114, 2013.

THYGESEN A.; POULSEN F. W.; ANGELIDAKI I.; MIN B.; BJERRE A. Electricity generation by microbial fuel cells fuelled with wheat straw hydrolysate. **Biomass and Bioenergy**. v. 35, n. 11, p. 4732-4739, 2011.

TREMOULI, A.; ANTONOPOULOU, G.; BEBELIS, S.; LYBERATOS G. Operation and characterization of a microbial fuel cell fed with pretreated cheese whey at different organic loads. **Bioresource Technology**. v. 131, p 380-389, 2013.

TUGTAS, A. E.; CAVDAR P.; CALLI B. Continuous flow membrane-less air cathode microbial fuel cell with spunbonded olefin diffusion layer. **Bioresource Technology**. v. 102, n. 22, p. 10425-10430, 2011.

VELASQUEZ-ORTA, S.B.; HEAD, I.M.; CURTIS, T.P.; SCOTT, K. Factors affecting current production in microbial fuel cells using different industrial wastewaters. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 8, p. 5105–5112, 2011.

VILLASEÑOR, J.; CAPILLA, P.; RODRIGO, M. A.; CAÑIZARES, P.; FERNÁNDEZ, F. J. Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland – Microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. **Water Research**. v. 47, n. 17, p. 6731-6738, 2013.

WANG, Y.; LIU, X.; LI, W.; LI, F.; WANG, Y.; SHENG, G.; ZENG, R. J.; YU, H. A microbial fuel cell–membrane bioreactor integrated system for cost-effective wastewater treatment. **Applied Energy**. v. 98, p. 230-235, 2012.

WEN, Q.; WU, Y.; ZHAO, L.; SUN, Q.; Production of electricity from the treatment of continuous brewery wastewater using a microbial fuel cell. **Fuel**. v. 89, n. 7, p. 1381-1385, 2010.

WINFIELD J., CHAMBERS L. D., ROSSITER J., IEROPOULOS I. Comparing the short and long term stability of biodegradable, ceramic and cation exchange membranes in microbial fuel cells. **Bioresource Technology**. v. 148, p 480-486, 2013.

WINFIELD, J.; IEROPOULOS, I.; GREENMAN, J. Investigating a cascade of seven hydraulically connected microbial fuel cells. **Bioresource Technology**. v. 110, p. 245-250, 2012.

YU J.; SEON J.; PARK Y.; CHO S.; LEE T. Electricity generation and microbial community in a submerged-exchangeable microbial fuel cell system for low-strength domestic wastewater treatment. **Bioresource Technology**. v. 117, p. 172-179, 2012.

YU, C.; LIANG, Z.; DAS, A.; HU, Z. Nitrogen removal from wastewater using membrane aerated microbial fuel cell techniques. **Water Research**. v. 45, n. 3, p. 1157-1164, 2011.

YUAN, Y.; ZHAO , B.; ZHOU S.; ZHONG S.; ZHUANG, L. Electrocatalytic activity of anodic biofilm responses to pH changes in microbial fuel cells. **Bioresource Technology**. v. 102, n. 13, p. 6887-6891, 2011.

ZHANG, L.; ZHU, X.; LI, J.; LIAO, Q.; YE, D. Biofilm formation and electricity generation of a microbial fuel cell started up under different external resistances. **Journal of Power Sources**. v. 196, n. 15, p. 6029-6035, 2011.

ZHANG, Y.; SUN, J.; HU, Y.; LI, S.; XU, Q. Bio-cathode evaluations in microbial fuel cells: A comparison of graphite felt, carbon paper and stainless steel mesh materials. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 37, n. 22, p. 16935-16942, 2012.

ZHU, F.; WANG, W.; ZHANG, X.; TAO, G. Electricity generation in a membrane-less microbial fuel cell with down-flow feeding onto the cathode. **Bioresource Technology**. v. 102, n. 15, p. 7324-7328, 2011.

ZHU, G.; ONODERA, T.; TANDUKAR, M.; PAVLOSTATHIS, S. G. Simultaneous carbon removal, denitrification and power generation in a membrane-less microbial fuel cell. **Bioresource Technology**. v. 146, p. 1-6, 2013.

ZHUANG L.; YUAN Y.; WANG Y.; ZHOU S. Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater. **Bioresource Technology**. v. 123, p. 406–412. 2012b

ZHUANG, L.; ZHENG, Y.; ZHOU, S.; YUAN Y.; YUAN H.; CHEN Y. Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment. **Bioresource Technology**. v. 106, p. 82-88, 2012a.

9. ANEXO

Anexo A - Técnica de diluição seriada e plaqueamento em MRS sólido

Objetivo:

Quantificar colônias de *Lactobacillus pentosus* presentes em fase líquida ou sólida, plaqueados em MRS.

Técnica:

Diluições seriadas em solução salina e plaqueamento em placa de petri com MRS

Material Necessário:

- Tubos de ensaio com solução salina (9mL),
- Pontas auto-clavadas e micropipetas (10; 1000 µL);
- Placas de petri com meio sólido MRS preparado conforme orientações do fornecedor;
- Chama; e
- Câmara de incubação

Método:

- Acender uma chama (todo o procedimento deve ser realizado próximo de uma chama);
- Pipetar 1 mL da amostra e transferir para o primeiro tubo, fechar o tubo, descartar a ponta e colocar o tubo no vórtice (5 s), transferir 1 mL da solução do tubo 1 para o tubo 2 e repetir o mesmo procedimento para que se atinja a diluição necessária;
- Após terem sido feitas as diluições, fazer uso de uma micropipeta de 10 µL, sobre a placa formando uma gota, repetir o procedimento mais duas vezes;
- Inclinar a placa para que as 3 gotas escorram a formar 3 linhas (réplicas), fechar a placa
- Repetir para as outras diluições de interesse
- Incubar a amostra.

Critério:

Após incubação (24 horas a 37° C) contar as colônias e determinar a concentração de unidades formadora de colônias pelo volume 10 µL. E corrigir pela diluição adotada. Considerar sempre as colônias de entre 10 e 100 obtidas na menor diluição.

10. APÊNDICE A – VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS PARA OS RESULTADOS OBTIDOS NO BRASIL

Parâmetros Monitorados para a CCM retangular de fluxo horizontal, efeito da área do eletrodo do anodo (Ensaio 3)

Resumo das variáveis para a área 0,078 m²

Parâmetro	Esgoto Sanitário	Efluente Anaeróbio	Efluente Aeróbio	Decantador
pH	6,80 ± 0,46	7,02 ± 0,59	7,81 ± 0,23	7,74 ± 0,23
Condutividade (µS cm ⁻¹)	817 ± 101	825 ± 91	790 ± 74	790 ± 77
Redox (mV)	-458 ± 45	-417 ± 105	30 ± 81	-339 ± 81
OD (mg L ⁻¹)	-	-	3,16 ± 1,38	0,83 ± 0,55
DQO (mg L ⁻¹)	490 ± 173	327 ± 193	188 ± 74	172 ± 78
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	265 ± 31	257 ± 24	246 ± 41	242 ± 31

Resumo dos Parâmetros para a área 0,047 m²

Parâmetro	Esgoto Sanitário	Efluente Anaeróbio	Efluente Aeróbio	Decantador
pH	6,84 ± 0,25	6,82 ± 0,30	7,54 ± 0,12	7,43 ± 0,20
Condutividade (µS cm ⁻¹)	657 ± 137	684 ± 129	662 ± 120	661 ± 120
Redox (mV)	414 ± 92	444 ± 102	348 ± 99	398 ± 102
OD (mg L ⁻¹)	-	-	1,94 ± 0,76	0,32 ± 0,21
DQO (mg L ⁻¹)	477 ± 109	397 ± 80	215 ± 67	191 ± 57
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	190 ± 51	196 ± 56	196 ± 68	186 ± 48

Resumo das variáveis para a área 0,0094 m²

Parâmetro	Esgoto Sanitário	Efluente Anaeróbio	Efluente Aeróbio	Decantador
pH	6,73 ± 0,13	6,86 ± 0,21	7,50 ± 0,12	7,60 ± 0,29
Condutividade (µS cm ⁻¹)	739 ± 115	800 ± 136	761 ± 122	744 ± 118
Redox (mV)	-482 ± 55	-491 ± 47	42 ± 44	-428 ± 86
OD (mg L ⁻¹)	-	-	1,32 ± 0,18	0,24 ± 0,18
DQO (mg L ⁻¹)	515 ± 89	417 ± 97	234 ± 57	207 ± 47
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	234 ± 54	239 ± 53	208 ± 43	205 ± 42

**Parâmetros Monitorados para a CCM cúbica de fluxo ascendente,
efeito da área do eletrodo do anodo (Ensaio 4)**

Resumo das variáveis para a área 0,094 m²

Parâmetro	Esgoto Sanitário	Efluente Anaeróbio
pH	6,74 ± 0,24	6,61 ± 0,51
Condutividade (μS cm ⁻¹)	766 ± 64	773 ± 72
Redox (mV)	459 ± 44	480 ± 38
DQO (mg L ⁻¹)	509 ± 209	469 ± 196
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	255 ± 28	258 ± 36

Resumo das variáveis para a área 0,056 m²

Parâmetro	Esgoto Sanitário	Efluente Anaeróbio
pH	6,78 ± 0,18	6,83 ± 0,33
Condutividade (μS cm ⁻¹)	670 ± 153	675 ± 148
Redox (mV)	-430 ± 101	-442 ± 117
DQO (mg L ⁻¹)	469 ± 89	308 ± 89
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	187 ± 77	218 ± 58

Resumo das variáveis para a área 0,018 m²

Parâmetro	Esgoto Sanitário	Efluente Anaeróbio
pH	6,79 ± 0,20	6,79 ± 0,18
Condutividade (μS cm ⁻¹)	717 ± 126	744 ± 112
Redox (mV)	-466 ± 43	-465 ± 37
DQO (mg L ⁻¹)	474 ± 95	357 ± 77
Alcalinidade (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	217 ± 43	222 ± 46

11. APÊNDICE B – VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS PARA OS RESULTADOS OBTIDOS EM PORTUGAL

Dados Amostrais para o ensaio 1

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,547	0,00
0,01	4	0,516	2,06
0,02	8	0,474	3,79
0,03	12	0,436	5,23
0,04	16	0,393	6,29
0,05	20	0,331	6,62
0,06	24	0,261	6,26
0,07	28	0,231	6,47
0,08	32	0,102	3,26
0,09	36	0,015	0,54
0,05	20	0,331	6,62

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,649	0,00
0,01	4	0,617	2,47
0,02	8	0,555	4,44
0,03	12	0,505	6,06
0,04	16	0,444	7,10
0,05	20	0,399	7,98
0,06	24	0,368	8,83
0,07	28	0,360	10,08
0,08	32	0,318	10,18
0,09	36	0,288	10,37
0,1	40	0,258	10,32
0,11	44	0,220	9,68
0,12	48	0,185	8,88
0,13	52	0,141	7,33
0,14	56	0,097	5,43
0,15	60	0,05	3,00
0,16	64	0,017	1,09
0,09	36	0,288	10,37

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,849	0,00
0,01	4	0,789	3,16
0,02	8	0,79	6,32
0,03	12	0,635	7,62
0,04	16	0,543	8,69
0,05	20	0,448	8,96
0,06	24	0,358	8,59
0,07	28	0,284	7,95
0,08	32	0,219	7,01
0,09	36	0,157	5,65
0,1	40	0,083	3,32
0,11	44	0,036	1,58
0,12	48	0,015	0,72
0,05	20	0,448	8,96

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,73	0,00
0,01	4	0,677	2,71
0,02	8	0,6	4,80
0,03	12	0,517	6,20
0,04	16	0,424	6,78
0,05	20	0,333	6,66
0,06	24	0,25	6,00
0,07	28	0,169	4,73
0,08	32	0,057	1,82
0,09	36	0,008	0,29
0,04	16	0,424	6,78

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção CQO

Semana	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1ª	6,62	20	969	63
2ª	10,37	36	1378	47
3ª	8,96	20	1402	46
4ª	6,78	16	686	74
Média	8,18		1109	57
DP	1,57		299	11

Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
1,38	0,97	0,4

Dados Amostrais para o ensaio 2

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,923	0,00
0,01	4	0,849	3,40
0,02	8	0,747	5,98
0,03	12	0,645	7,74
0,04	16	0,529	8,46
0,05	20	0,416	8,32
0,06	24	0,31	7,44
0,07	28	0,201	5,63
0,08	32	0,09	2,88
0,04	16	0,529	8,46

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,748	0,00
0,01	4	0,7	2,80
0,02	8	0,626	5,01
0,03	12	0,53	6,36
0,04	16	0,419	6,70
0,05	20	0,301	6,02
0,06	24	0,177	4,25
0,07	28	0,053	1,48
0,04	16	0,419	6,70

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,98	0,00
0,01	4	0,883	3,53
0,02	8	0,729	5,83
0,03	12	0,61	7,32
0,04	16	0,479	7,66
0,05	20	0,375	7,50
0,06	24	0,246	5,90
0,07	28	0,137	3,84
0,08	32	0,023	0,74
0,04	16	0,479	7,66

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,65	0,00
0,01	4	0,57	2,28
0,02	8	0,449	3,59
0,03	12	0,301	3,61
0,04	16	0,165	2,64
0,05	20	0,052	1,04
0,06	24	0,015	0,36
0,03	12	0,301	3,61

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Semana	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1ª	8,46	16	1417	46
2ª	6,7	16	701	73
3ª	7,66	16	805	69
4ª	3,61	12	828	68
Média	6,61		938	64
DP	1,84		281	11

Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
2,63	2,02	0,61

Dados Amostrais para o ensaio 3

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,848	0,00
0,01	4	0,751	3,00
0,02	8	0,635	5,08
0,03	12	0,517	6,20
0,04	16	0,384	6,14
0,05	20	0,234	4,68
0,06	24	0,072	1,73
0,07	28	0,015	0,42
0,03	12	0,517	6,20

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,63	0,00
0,01	4	0,533	2,13
0,02	8	0,398	3,18
0,03	12	0,251	3,01
0,04	16	0,103	1,65
0,05	20	0,04	0,80
0,06	24	0,015	0,36
0,02	8	0,398	3,18

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,895	0,00
0,01	4	0,81	3,24
0,02	8	0,71	5,68
0,03	12	0,603	7,24
0,04	16	0,49	7,84
0,05	20	0,355	7,10
0,06	24	0,21	5,04
0,07	28	0,064	1,79
0,08	32	0,015	0,48
0,04	16	0,49	7,84

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,751	0,00
0,01	4	0,671	2,68
0,02	8	0,596	4,77
0,03	12	0,376	4,51
0,04	16	0,251	4,02
0,05	20	0,206	4,12
0,06	24	0,059	1,42
0,07	28	0,015	0,42
0,03	12	0,596	4,77

Tabela. Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Semana	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1ª	6,2	12	1695	35
2ª	3,18	8	909	65
3ª	7,84	16	971	63
4ª	4,77	12	662	75
Média	5,50		1059	59
DP	1,72		385	15

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
8,68	7,29	1,39

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Semana	Efluente(UFC/mL)	Câmara(UFC/mL)
1ª	3,33E+06	1,50E+06
2ª	4,00E+06	7,33E+05
3ª	-	-
4ª	6,67E+04	2,00E+05

Escovilhão	4,00E+08
------------	----------

Dados Amostrais para o ensaio 4

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,715	0,00
0,01	2,37	0,616	1,46
0,02	4,73	0,482	2,28
0,03	7,10	0,334	2,37
0,04	9,47	0,174	1,65
0,05	11,83	0,015	0,18
0,03	7,10	0,334	2,37

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,773	0,00
0,01	2,37	0,708	1,68
0,02	4,73	0,579	2,74
0,03	7,10	0,443	3,15
0,04	9,47	0,308	2,92
0,05	11,83	0,17	2,01
0,06	14,20	0,038	0,54
0,07	16,57	0,013	0,22
0,03	7,10	0,443	3,15

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,74	0,00
0,01	2,37	0,658	1,56
0,02	4,73	0,516	2,44
0,03	7,10	0,355	2,52
0,04	9,47	0,197	1,87
0,05	11,83	0,034	0,40
0,06	14,20	0,008	0,11
0,03	7,10	0,355	2,52

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,736	0,00
0,01	2,37	0,641	1,52
0,02	4,73	0,478	2,26
0,03	7,10	0,323	2,29
0,04	9,47	0,153	1,45
0,05	11,83	0,011	0,13
0,03	7,10	0,323	2,29

Tabela. Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Semana	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente(mg/L)	Remoção DQO (%)
1ª	2,37	7,1	1219	53
2ª	3,15	7,1	938	64
3ª	2,52	7,1	840	68
4ª	2,29	7,1	1223	53
Média	2,58		1055	59
DP	0,34		170	7

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
2,92	1,62	1,29

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Semana	Efluente(UFC/mL)	Câmara(UFC/mL)
1ª	7,23E+07	6,20E+07
2ª	1,57E+07	3,80E+07
3ª	1,87E+06	-
4ª	5,00E+06	2,43E+06
	Escovilhão	2,40E+08

Tabela Resumo pH anodo, catodo e tempertura

Ciclo	pH anodo ¹	pH catodo	Temperatura (°C)
1	5,57	5,9	20
2	5,56	6,26	21
3	5,53	6,26	18,5
4	5,36	6,23	20
Média	5,51	6,16	19,88
DP	0,08	0,15	0,89

1 - pH anodo refere-se ao pH do efluente do anodo

Dados Amostrais para o ensaio 5

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,398	0,00
0,01	2,37	0,319	0,76
0,02	4,73	0,209	0,99
0,03	7,10	0,057	0,40
0,04	9,47	0,015	0,14
0,02	4,73	0,209	0,99

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0,00	0,938	0,00
0,01	2,37	0,365	0,86
0,02	4,73	0,015	0,07
0,02	4,73	0,365	0,86

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,517	0,00
0,01	2,37	0,444	1,05
0,02	4,73	0,32	1,51
0,03	7,10	0,159	1,13
0,04	9,47	0,015	0,14
0,02	4,73	0,320	1,51

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,564	0,00
0,01	2,37	0,471	1,11
0,02	4,73	0,356	1,69
0,03	7,10	0,193	1,37
0,04	9,47	0,05	0,47
0,05	11,83	0,015	0,18
0,02	4,73	0,356	1,69

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,62	0,00
0,01	2,37	0,538	1,27
0,02	4,73	0,41	1,94
0,03	7,10	0,247	1,75
0,04	9,47	0,088	0,83
0,05	11,83	0,015	0,18
0,02	4,73	0,41	1,94

6ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,551	0,00
0,01	2,37	0,464	1,10
0,02	4,73	0,336	1,59
0,03	7,10	0,18	1,28
0,04	9,47	0,015	0,14
0,02	4,73	0,336	1,59

7ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,625	0,00
0,01	2,37	0,503	1,19
0,02	4,73	0,334	1,58
0,03	7,10	0,158	1,12
0,04	9,47	0,009	0,09
0,02	4,73	0,334	1,58

8ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,611	0,00
0,01	2,37	0,532	1,26
0,02	4,73	0,41	1,94
0,03	7,10	0,266	1,89
0,04	9,47	0,105	0,99
0,05	11,83	0,009	0,11
0,02	4,73	0,41	1,94

9ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,65	0,00
0,01	2,37	0,57	1,35
0,02	4,73	0,448	2,12
0,03	7,10	0,308	2,19
0,04	9,47	0,143	1,35
0,05	11,83	0,005	0,06
0,03	7,10	0,308	2,19

10ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,607	0,00
0,01	2,37	0,531	1,26
0,02	4,73	0,415	1,96
0,03	7,10	0,280	1,99
0,04	9,47	0,128	1,21
0,05	11,83	0,006	0,07
0,03	7,10	0,280	1,99

11ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,62	0,00
0,01	2,37	0,542	1,28
0,02	4,73	0,423	2,00
0,03	7,10	0,288	2,04
0,04	9,47	0,133	1,26
0,05	11,83	0,015	0,18
0,03	7,10	0,288	2,04

12ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,642	0,00
0,01	2,37	0,562	1,33
0,02	4,73	0,45	2,13
0,03	7,10	0,311	2,21
0,04	9,47	0,158	1,50
0,05	11,83	0,015	0,18
0,03	7,10	0,311	2,21

13ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,653	0,00
0,01	2,37	0,579	1,37
0,02	4,73	0,463	2,19
0,03	7,10	0,329	2,34
0,04	9,47	0,183	1,73
0,05	11,83	0,015	0,18
0,03	7,10	0,329	2,34

14ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,663	0,00
0,01	2,37	0,567	1,34
0,02	4,73	0,495	2,34
0,03	7,10	0,357	2,53
0,04	9,47	0,223	2,11
0,05	11,83	0,065	0,77
0,06	14,20	0,015	0,21
0,03	7,10	0,329	2,53

15ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,584	0,00
0,01	2,37	0,522	1,24
0,02	4,73	0,412	1,95
0,03	7,10	0,281	2,00
0,04	9,47	0,145	1,37
0,05	11,83	0,015	0,18
0,03	7,10	0,281	2,00

Tabela. Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1	0,99	4,73	1515	42
2	0,86	4,73	1385	47
3	1,51	4,73	1380	47
4	1,69	4,73	1461	44
5	1,94	4,73	1660	36
6	1,59	4,73	1240	52
7	1,58	4,73	1304	50
8	1,94	4,73	1203	54
9	2,19	7,10	1192	54
10	1,99	7,10	1258	52
11	2,04	7,10	1130	57
12	2,21	7,10	929	64
13	2,34	7,10	1308	50
14	2,53	7,10	1176	55
15	2,00	7,10	1130	57
Média	1,83		1285	51
DP	0,45		173	7

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
2,10	1,48	0,63

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	Efluente (UFC/mL)	Câmara (UFC/mL)
1	7,33E+05	9,67E+05
2	9,33E+05	1,20E+06
3	-	-
4	-	-
5	2,10E+06	2,27E+06
6	1,13E+06	4,00E+05
7	8,83E+05	1,40E+06
8	8,03E+05	1,50E+06
9	5,80E+05	1,02E+06
10	8,10E+05	3,97E+06
11	2,23E+05	5,60E+05
12	1,23E+05	3,00E+05
13	8,33E+04	9,00E+04
14	8,33E+04	7,67E+05
15	2,17E+05	-

Dados Amostrais para o ensaio 6

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,209	0,00
0,01	2,37	0,138	0,33
0,02	4,73	0,027	0,13
0,03	7,10	0,019	0,13
0,01	2,37	0,138	0,33

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,613	0,00
0,01	2,37	0,53	1,25
0,02	4,73	0,461	2,18
0,03	7,10	0,409	2,90
0,04	9,47	0,265	2,51
0,05	11,83	0,116	1,37
0,06	14,20	0,005	0,07
0,03	7,10	0,409	2,90

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,687	0,00
0,01	2,37	0,629	1,49
0,02	4,73	0,512	2,42
0,03	7,10	0,383	2,72
0,04	9,47	0,259	2,45
0,05	11,83	0,115	1,36
0,06	14,20	0,005	0,07
0,03	7,10	0,383	2,72

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,618	0,00
0,01	2,37	0,545	1,29
0,02	4,73	0,44	2,08
0,03	7,10	0,321	2,28
0,04	9,47	0,179	1,69
0,05	11,83	0,035	0,41
0,03	7,10	0,321	2,28

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,513	0,00
0,01	2,37	0,453	1,07
0,02	4,73	0,331	1,57
0,03	7,10	0,216	1,53
0,04	9,47	0,119	1,13
0,05	11,83	0,065	0,77
0,02	4,73	0,331	1,57

6ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,501	0,00
0,01	2,37	0,433	1,02
0,02	4,73	0,329	1,56
0,03	7,10	0,234	1,66
0,04	9,47	0,173	1,64
0,05	11,83	0,131	1,55
0,06	14,20	0,095	1,35
0,07	16,57	0,035	0,58
0,03	7,10	0,234	1,66

7ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,624	0,00
0,01	2,37	0,556	1,32
0,02	4,73	0,451	2,13
0,03	7,10	0,368	2,61
0,04	9,47	0,318	3,01
0,05	11,83	0,279	3,30
0,06	14,20	0,244	3,47
0,07	16,57	0,215	3,56
0,08	18,93	0,186	3,52
0,09	21,30	0,149	3,17
0,1	23,67	0,12	2,84
0,11	26,04	0,093	2,42
0,12	28,40	0,007	0,20
0,07	16,57	0,215	3,56

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1	0,33	2,37	1385	47
2	2,90	7,10	845	68
3	2,72	7,10	703	73
4	2,28	7,10	724	72
5	1,57	4,73	856	67
6	1,66	4,73	814	69
7	3,56	16,57	740	72
Média	2,15		867	67
DP	0,99		219	8

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
2,22	1,18	1,04

Dados Amostrais para o ensaio 7

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,659	0,00
0,01	2,37	0,596	1,41
0,02	4,73	0,500	2,37
0,03	7,10	0,383	2,72
0,04	9,47	0,267	2,53
0,05	11,83	0,130	1,54
0,06	14,20	0,036	0,51
0,03	7,10	0,383	2,72

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,694	0,00
0,01	2,37	0,622	1,47
0,02	4,73	0,515	2,44
0,03	7,10	0,385	2,73
0,04	9,47	0,255	2,41
0,05	11,83	0,117	1,38
0,06	14,20	0,036	0,51
0,03	7,10	0,385	2,73

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,558	0,00
0,01	2,37	0,489	1,16
0,02	4,73	0,388	1,84
0,03	7,10	0,256	1,82
0,04	9,47	0,125	1,18
0,05	11,83	0,015	0,18
0,02	4,73	0,388	1,84

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,709	0,00
0,01	2,37	0,631	1,49
0,02	4,73	0,515	2,44
0,03	7,10	0,381	2,71
0,04	9,47	0,235	2,22
0,05	11,83	0,076	0,90
0,06	14,20	0,029	0,41
0,03	7,10	0,381	2,71

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,491	0,00
0,01	2,37	0,415	0,98
0,02	4,73	0,307	1,45
0,03	7,10	0,193	1,37
0,04	9,47	0,052	0,49
0,05	11,83	0,015	0,18
0,02	4,73	0,307	1,45

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1	2,72	7,10	1826	30
2	2,73	7,10	2446	6
3	1,84	4,73	1842	29
4	2,71	7,10	2531	3
5	1,45	4,73	1803	31
Média	2,29		2090	20
DP	0,54		327	13

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
2,25	0,96	1,28

Dados Amostrais para o ensaio 8

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,48	0,00
0,01	2,37	0,427	1,01
0,02	4,73	0,352	1,67
0,03	7,10	0,261	1,85
0,04	9,47	0,187	1,77
0,05	11,83	0,105	1,24
0,06	14,20	0,015	0,21
0,03	7,10	0,261	1,85

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,692	0,00
0,01	2,37	0,641	1,52
0,02	4,73	0,566	2,68
0,03	7,10	0,477	3,39
0,04	9,47	0,381	3,61
0,05	11,83	0,273	3,23
0,06	14,20	0,158	2,24
0,07	16,57	0,015	0,25
0,04	9,47	0,381	3,61

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,622	0,00
0,01	2,37	0,563	1,33
0,02	4,73	0,479	2,27
0,03	7,10	0,385	2,73
0,04	9,47	0,232	2,20
0,05	11,83	0,131	1,55
0,06	14,20	0,015	0,21
0,03	7,10	0,385	2,73

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,554	0,00
0,01	2,37	0,497	1,18
0,02	4,73	0,444	2,10
0,03	7,10	0,315	2,24
0,04	9,47	0,204	1,93
0,05	11,83	0,088	1,04
0,06	14,20	0,04	0,57
0,03	7,10	0,315	2,24

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,564	0,00
0,01	2,37	0,509	1,20
0,02	4,73	0,422	2,00
0,03	7,10	0,332	2,36
0,04	9,47	0,234	2,22
0,05	11,83	0,119	1,41
0,06	14,20	0,015	0,21
0,03	7,10	0,332	2,36

6ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,513	0,00
0,01	2,37	0,458	1,08
0,02	4,73	0,373	1,77
0,03	7,10	0,268	1,90
0,04	9,47	0,155	1,47
0,05	11,83	0,038	0,45
0,06	14,20	0,015	0,21
0,03	7,10	0,268	1,90

7ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,571	0,00
0,01	2,37	0,51	1,21
0,02	4,73	0,43	2,04
0,03	7,10	0,358	2,54
0,04	9,47	0,262	2,48
0,05	11,83	0,132	1,56
0,06	14,20	0,023	0,33
0,07	16,57	0,015	0,25
0,03	7,10	0,358	2,54

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1	1,85	7,1	1381	47
2	3,61	9,47	964	63
3	2,73	7,1	1374	47
4	2,24	7,1	1695	35
5	2,36	7,1	1036	60
6	1,9	7,1	1323	49
7	2,54	7,1	2755	-6
Média	2,46		1504	42
DP	0,55		558	21

Tabela Resumo pH anodo

Ciclo	pH anodo ¹
1	5,34
2	5,14
3	4,65
4	4,76
5	4,97
6	4,96
7	4,97
Média	4,97
DP	0,21

1 - pH anodo refere-se ao pH do efluente do anodo

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
2,29	1,07	1,22

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	<i>L. pentosus</i> Efluente ²	<i>L. pentosus</i> Câmara ³
1	1,27E+07	9,05E+07
2	4,48E+06	9,03E+07
3	7,22E+05	1,52E+07
4	8,33E+05	5,33E+06
5	3,00E+05	1,20E+06
6	3,77E+05	4,80E+05
7	3,38E+05	4,00E+05
2;3: <i>L. pentosus</i> quantificados em UFC/mL		
Escovilhão		5,52E+06

Dados Amostrais para o ensaio 9

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,432	0,00
0,01	2,37	0,365	0,86
0,02	4,73	0,282	1,33
0,03	7,10	0,179	1,27
0,04	9,47	0,065	0,62
0,05	11,83	0,015	0,18
0,02	4,73	0,282	1,33

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,429	0,00
0,01	2,37	0,372	0,88
0,02	4,73	0,277	1,31
0,03	7,10	0,165	1,17
0,04	9,47	0,058	0,55
0,05	11,83	0,015	0,18
0,02	4,73	0,277	1,31

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,794	0,00
0,01	2,37	0,755	1,79
0,02	4,73	0,695	3,29
0,03	7,10	0,648	4,60
0,04	9,47	0,59	5,59
0,05	11,83	0,52	6,15
0,06	14,20	0,456	6,48
0,07	16,57	0,348	5,77
0,08	18,93	0,306	5,79
0,09	21,30	0,247	5,26
0,1	23,67	0,187	4,43
0,11	26,04	0,154	4,01
0,12	28,40	0,11	3,12
0,13	30,77	0,05	1,54
0,06	14,20	0,456	6,48

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,856	0,00
0,01	2,37	0,79	1,87
0,02	4,73	0,698	3,30
0,03	7,10	0,599	4,25
0,04	9,47	0,494	4,68
0,05	11,83	0,386	4,57
0,06	14,20	0,275	3,91
0,07	16,57	0,158	2,62
0,08	18,93	0,015	0,28
0,04	9,47	0,494	4,68

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,698	0,00
0,01	2,37	0,643	1,52
0,02	4,73	0,59	2,79
0,03	7,10	0,546	3,88
0,04	9,47	0,541	5,12
0,05	11,83	0,468	5,54
0,06	14,20	0,424	6,02
0,07	16,57	0,374	6,20
0,08	18,93	0,345	6,53
0,09	21,30	0,306	6,52
0,1	23,67	0,28	6,63
0,11	26,04	0,247	6,43
0,12	28,40	0,226	6,42
0,13	30,77	0,204	6,28
0,14	33,14	0,19	6,30
0,15	35,50	0,176	6,25
0,16	37,87	0,17	6,44
0,17	40,24	0,161	6,48
0,18	42,60	0,127	5,41
0,19	44,97	0,117	5,26
0,2	47,34	0,1	4,73
0,21	49,70	0,015	0,75
0,1	23,67	0,28	6,63

6ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,548	0,00
0,01	2,37	0,477	1,13
0,02	4,73	0,382	1,81
0,03	7,10	0,278	1,97
0,04	9,47	0,165	1,56
0,05	11,83	0,078	0,92
0,06	14,20	0,015	0,21
0,03	7,10	0,278	1,97

7ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,688	0,00
0,01	2,37	0,616	1,46
0,02	4,73	0,514	2,43
0,03	7,10	0,401	2,85
0,04	9,47	0,285	2,70
0,05	11,83	0,165	1,95
0,06	14,20	0,048	0,68
0,07	16,57	0,015	0,25
0,03	7,10	0,401	2,85

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção CQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	CQOefluente (mg/L)	Remoção CQO (%)
1	1,33	4,73	1799	31
2	1,31	4,73	1219	53
3	6,48	14,2	979	62
4	4,68	9,47	916	65
5	6,63	23,67	662	75
6	1,97	7,1	1347	48
7	2,85	7,1	1442	45
Média	3,61		1195	54
DP	2,15		350	13

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
4,44	1,11	3,32

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	<i>L. pentosus</i> Efluente ²	<i>L. pentosus</i> Câmara ³
1	1,93E+07	4,10E+08
2	3,00E+07	7,52E+07
3	1,03E+06	3,43E+07
4	1,17E+06	-
5	5,00E+07	8,00E+07
6	1,30E+06	2,50E+06
7	1,00E+06	2,90E+07

2;3: *L. pentosus* quantificados em UFC/mL

Escovilhão	1,70E+08
------------	----------

Dados Amostrais para o ensaio 10

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,890	0,00
0,01	4	0,738	2,95
0,02	8	0,559	4,47
0,03	12	0,447	5,36
0,04	16	0,274	4,38
0,05	20	0,092	1,84
0,06	24	0,008	0,19
0,02	8	0,447	5,36

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,811	0,00
0,01	4	0,622	2,49
0,02	8	0,404	3,23
0,03	12	0,2	2,40
0,04	16	0,019	0,30
0,05	20	0,003	0,06
0,02	8	0,404	3,23

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,749	0,00
0,01	4	0,568	2,27
0,02	8	0,359	2,87
0,03	12	0,152	1,82
0,04	16	0,01	0,16
0,02	8	0,359	2,87

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,982	0,00
0,01	4	0,613	2,45
0,02	8	0,337	2,70
0,03	12	0,192	2,30
0,04	16	0,075	1,20
0,05	20	0,007	0,14
0,02	8	0,337	2,70

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	CDQOefluente ¹ (mg/L)	Remoção DQO (%)
1	5,36	12	1114	57
2	3,23	8	995	62
3	2,87	8	1215	53
4	2,7	8	1002	61
Média	3,54		1081	58
DP	1,07		91	3

1 - Amostra centrifugada a 4000 rpm, 15 min

Tabela Resumo pH anodo, catodo e temperatura

Semana	pH anodo ²	pH catodo ³	Temperatura (°C)
1	4,91	4,83	21,5
2	5,09	4,95	18,5
3	4,93	4,89	21
4	4,68	4,69	22
Média	4,90	4,84	20,75
DP	0,15	0,10	1,35

2 - pH anodo refere-se ao pH da câmara do anodo; 3 - pH catodo refere-se ao pH da câmara do catodo

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
4,50	2,90	1,59

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	<i>L. pentosus</i> Efluente ²	<i>L. pentosus</i> Câmara ³
1	3,97E+06	6,32E+06
2	1,47E+07	3,90E+07
3	1,30E+07	1,57E+07
4	7,67E+06	8,83E+06
Escovilhão		
		2,10E+07

2;3: *L. pentosus* quantificados em UFC/mL

Dados Amostrais para o ensaio 11

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,876	0,00
0,01	4	0,74	2,96
0,02	8	0,53	4,24
0,03	12	0,372	4,46
0,04	16	0,15	2,40
0,05	20	0,01	0,20
0,03	12	0,372	4,46

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,921	0,00
0,01	4	0,777	3,11
0,02	8	0,586	4,69
0,03	12	0,417	5,00
0,04	16	0,197	3,15
0,05	20	0,007	0,14
0,03	12	0,417	5,00

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,913	0,00
0,01	4	0,754	3,02
0,02	8	0,551	4,41
0,03	12	0,347	4,16
0,04	16	0,12	1,92
0,05	20	0,005	0,10
0,02	8	0,551	4,41

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,650	0,00
0,01	4	0,552	2,21
0,02	8	0,411	3,29
0,03	12	0,268	3,22
0,04	16	0,109	1,74
0,05	20	0,005	0,10
0,02	8	0,411	3,29

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,611	0,00
0,01	4	0,553	2,21
0,02	8	0,399	3,19
0,03	12	0,245	2,94
0,04	16	0,075	1,20
0,05	20	0,01	0,20

6ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,709	0,00
0,01	4	0,591	2,36
0,02	8	0,428	3,42
0,03	12	0,265	3,18
0,04	16	0,086	1,38
0,05	20	0,005	0,10

7ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,664	0,00
0,01	4	0,561	2,24
0,02	8	0,413	3,30
0,03	12	0,254	3,05
0,04	16	0,072	1,15
0,05	20	0,01	0,20

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1	4,46	12	1250	52
2	5,00	12	913	65
3	4,41	8	967	63
4	3,29	8	1002	61
5	3,19	8	1188	54
6	3,42	8	1138	56
7	3,30	8	1416	46
Média	3,87		1125	57
DP	0,68		165	6

Tabela Resumo pH anodo, catodo e temperatura

Ciclo	pH anodo ²	Temp. (°C)
1	5,26	23
2	4,4	20
3	4,62	21,5
4	-	21
5	4,88	19
6	4,86	18,5
7	4,64	18,5
Média	4,78	20,21
DP	0,27	1,58

2 - pH anodo refere-se ao pH do efluente do anodo; 3 - pH novo refere-se ao pH no início do ciclo

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
4,50	1,27	3,23

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	<i>L. pentosus</i> Efluente ²	<i>L. pentosus</i> Câmara ³
1	1,74E+07	1,12E+08
2	5,00E+06	4,12E+07
3	2,07E+06	3,17E+07
4	4,40E+06	9,83E+06
5	1,43E+06	1,63E+07
6	5,40E+06	3,50E+06
7	5,27E+06	5,20E+06

2;3: *L. pentosus* quantificados em UFC/mL

Escovilhão	2,63E+08
------------	----------

Dados Amostrais para o ensaio 12

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,782	0,00
0,01	4	0,464	1,86
0,02	8	0,123	0,98
0,03	12	0,007	0,08
0,01	4	0,464	1,86

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,693	0,00
0,01	4	0,495	1,98
0,02	8	0,259	2,07
0,03	12	0,032	0,38
0,04	16	0,007	0,11
0,02	8	0,259	2,07

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,635	0,00
0,01	4	0,463	1,85
0,02	8	0,225	1,80
0,03	12	0,009	0,11
0,01	4	0,463	1,85

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m²)	U (V)	P (mW/m²)
0	0	0,881	0,00
0,01	4	0,702	2,81
0,02	8	0,482	3,86
0,03	12	0,285	3,42
0,04	16	0,086	1,38
0,05	20	0,007	0,14
0,02	8	0,482	3,86

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Semana	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1ª	1,86	4	1099	58
2ª	2,07	8	801	69
3ª	1,85	4	817	69
4ª	3,86	8	1173	55
Média	2,41		973	63
DP	0,84		166	6

Tabela Resumo pH anodo, catodo e temperatura

Semana	pH anodo ²	pH catodo	Temperatura (°C)
1	5,72	5,09	21,50
2	5,27	5,12	21,50
3	6,58	6,07	25,00
4	7,32	6,30	25,50
Média	6,22	5,65	23,38
DP	0,79	0,55	1,88

2 - pH anodo refere-se ao pH do efluente do anodo

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
6,35	1,53	4,82

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	<i>L. pentosus</i> Efluente ²	<i>L. pentosus</i> Câmara ³
1	1,83E+08	3,31E+06
2	2,48E+07	1,22E+07
3	1,03E+07	1,08E+07
4	2,35E+06	< 10 ²

2;3: *L. pentosus* quantificados em UFC/mL

Escovilhão	1,72E+06
------------	----------

Dados Amostrais para o ensaio 13

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,661	0,00
0,01	4	0,500	2,00
0,02	8	0,338	2,70
0,03	12	0,191	2,29
0,04	16	0,030	0,48
0,05	20	0,010	0,20
0,02	8	0,338	2,70

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,692	0,00
0,01	4	0,49	1,96
0,02	8	0,315	2,52
0,03	12	0,133	1,60
0,04	16	0,003	0,05
0,02	8	0,315	2,52

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,698	0,00
0,01	4	0,501	2,00
0,02	8	0,314	2,51
0,03	12	0,142	1,70
0,04	16	0,01	0,16
0,02	8	0,314	2,51

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,715	0,00
0,01	4	0,509	2,04
0,02	8	0,314	2,51
0,03	12	0,120	1,44
0,04	16	0,010	0,16
0,02	8	0,314	2,51

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,679	0,00
0,01	4	0,486	1,94
0,02	8	0,297	2,38
0,03	12	0,12	1,44
0,04	16	0,005	0,08
0,02	8	0,297	2,38

6ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,644	0,00
0,01	4	0,467	1,87
0,02	8	0,289	2,31
0,03	12	0,123	1,48
0,04	16	0,005	0,08
0,02	8	0,289	2,31

7ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,619	0,00
0,01	4	0,462	1,85
0,02	8	0,295	2,36
0,03	12	0,139	1,67
0,04	16	0,005	0,08
0,02	8	0,295	2,36

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção DQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	DQOefluente (mg/L)	Remoção DQO (%)
1	2,70	8	1494	43
2	2,52	8	1076	59
3	2,51	8	1316	49
4	2,51	8	1614	38
5	2,38	8	1397	46
6	2,31	8	1900	27
7	2,36	8	2229	14
Média	2,47		1575	39
DP	0,12		356	14

Tabela Resumo pH anodo e temperatura

Ciclo	pH anodo ²	Temp. (°C)
1	3,09	22
2	3,84	2
3	4,21	22,5
4	3,51	21,5
5	4	22
6	4,17	21,5
7	4,28	20
Média	3,87	18,79
DP	0,40	6,89

2 - pH anodo refere-se ao pH da câmara do anodo

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
3,11	0,84	2,27

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	<i>L. pentosus</i> Efluente ²	<i>L. pentosus</i> Câmara ³
1	3,78E+06	2,53E+07
2	6,83E+05	1,01E+07
3	5,98E+06	7,90E+06
4	3,57E+07	5,17E+07
5	1,56E+07	8,90E+06
6	3,98E+06	3,65E+06
7	2,00E+07	-
Escovilhão		4,87E+06

2;3: *L. pentosus* quantificados em UFC/mL

Dados Amostrais para o ensaio 14

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,798	0,00
0,01	4	0,672	2,69
0,02	8	0,505	4,04
0,03	12	0,338	4,06
0,04	16	0,155	2,48
0,05	20	0,008	0,16
0,03	12	0,338	4,06

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,804	0,00
0,01	4	0,683	2,73
0,02	8	0,523	4,18
0,03	12	0,355	4,26
0,04	16	0,17	2,72
0,05	20	0,008	0,16
0,03	12	0,355	4,26

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,811	0,00
0,01	4	0,701	2,80
0,02	8	0,551	4,41
0,03	12	0,392	4,70
0,04	16	0,216	3,46
0,05	20	0,035	0,70
0,06	24	0,008	0,19
0,03	12	0,392	4,70

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,834	0,00
0,01	4	0,73	2,92
0,02	8	0,575	4,60
0,03	12	0,419	5,03
0,04	16	0,240	3,84
0,05	20	0,058	1,16
0,06	24	0,008	0,19
0,03	12	0,419	5,03

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,862	0,00
0,01	4	0,761	3,04
0,02	8	0,615	4,92
0,03	12	0,461	5,53
0,04	16	0,286	4,58
0,05	20	0,112	2,24
0,06	24	0,008	0,19
0,03	8	0,461	5,53

6ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,818	0,00
0,01	4	0,724	2,90
0,02	8	0,582	4,66
0,03	12	0,443	5,32
0,04	16	0,285	4,56
0,05	20	0,117	2,34
0,06	24	0,008	0,19
0,03	12	0,443	5,32

7ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,731	0,00
0,01	4	0,635	2,54
0,02	8	0,517	4,14
0,03	12	0,384	4,61
0,04	16	0,226	3,62
0,05	20	0,064	1,28
0,06	24	0,008	0,19
0,03	12	0,384	4,61

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção CQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	CQOefluente (mg/L)	Remoção CQO (%)
1	4,06	12	1258	52
2	4,26	12	1049	60
3	4,70	12	1556	40
4	5,03	12	1114	57
5	5,53	8	1397	46
6	5,32	12	1664	36
7	4,61	12	1739	33
Média	4,79		1397	46
DP	0,50		249	10

Tabela Resumo pH anodo e temperatura

Ciclo	pH anodo ²	Temp. (°C)
1	4,00	23
2	3,73	22
3	3,71	24
4	3,85	25
5	3,36	24
6	4,44	23
7	4,64	24
Média	3,96	23,57
DP	0,41	0,90

2 - pH anodo refere-se ao pH da câmara do anodo

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
9,73	4,89	4,84

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	<i>L. pentosus</i> Efluente ²	<i>L. pentosus</i> Câmara ³
1	2,58E+07	6,57E+07
2	5,03E+07	1,11E+08
3	4,30E+07	8,37E+07
4	4,40E+07	1,21E+08
5	1,00E+06	6,67E+06
6	< 10 ⁴	6,67E+05
7	3,33E+04	-

2;3: *L. pentosus* quantificados em UFC/mL

Escovilhão	6,33E+05
------------	----------

Dados Amostrais para o ensaio 15

1ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,659	0,00
0,01	4	0,445	1,78
0,02	8	0,243	1,94
0,03	12	0,051	0,61
0,04	16	0,005	0,08
0,02	8	0,243	1,94

2ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,689	0,00
0,01	4	0,484	1,94
0,02	8	0,28	2,24
0,03	12	0,09	1,08
0,04	16	0,008	0,13
0,02	8	0,28	2,24

3ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,739	0,00
0,01	4	0,551	2,20
0,02	8	0,352	2,82
0,03	12	0,171	2,05
0,04	16	0,008	0,13
0,02	8	0,352	2,82

4ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,732	0,00
0,01	4	0,558	2,23
0,02	8	0,368	2,94
0,03	12	0,190	2,28
0,04	16	0,029	0,46
0,05	20	0,008	0,16
0,02	8	0,368	2,94

5ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,727	0,00
0,01	4	0,548	2,19
0,02	8	0,359	2,87
0,03	12	0,197	2,36
0,04	16	0,036	0,58
0,05	20	0,008	0,16
0,02	8	0,359	2,87

6ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,755	0,00
0,01	4	0,59	2,36
0,02	8	0,416	3,33
0,03	12	0,246	2,95
0,04	16	0,094	1,50
0,05	20	0,008	0,16
0,02	8	0,416	3,33

7ª Polarização			
I (mA)	I (mA/m ²)	U (V)	P (mW/m ²)
0	0	0,73	0,00
0,01	4	0,571	2,28
0,02	8	0,396	3,17
0,03	12	0,23	2,76
0,04	16	0,079	1,26
0,05	20	0,008	0,16
0,02	8	0,396	3,17

Tabela Resumo da Potencia Máxima e Remoção CQO

Ciclo	P (mW/m ²)	I (mA/m ²)	CQOefluente (mg/L)	Remoção CQO (%)
1	1,94	8	1103	58
2	2,24	8	1091	58
3	2,82	8	1126	57
4	2,94	8	1358	48
5	2,87	8	1563	40
6	3,33	8	1343	48
7	3,17	8	1381	47
Média	2,76		1281	51
DP	0,46		165	6

Tabela Resumo pH anodo e temperatura

Ciclo	pH anodo ²	Temp. (°C)
1	3,75	23
2	3,56	22
3	3,68	24
4	3,86	25
5	3,37	24
6	3,88	23
7	4	24
Média	3,73	23,57
DP	0,20	0,90

2 - pH anodo refere-se ao pH da câmara do anodo

Tabela. Sólidos Quantificados no Biofilme

ST	SV (mg/mL)	SF
7,79	4,77	3,02

Tabela. Quantificação *L. pentosus*

Ciclo	<i>L. pentosus</i> Efluente ²	<i>L. pentosus</i> Câmara ³
1	4,66E+06	6,97E+07
2	5,31E+06	7,80E+07
3	2,83E+07	3,98E+07
4	3,88E+07	3,02E+07
5	6,17E+06	1,63E+07
6	1,12E+07	1,73E+07
7	1,27E+07	-
2;3: <i>L. pentosus</i> quantificados em UFC/mL		
	Escovilhão	1,11E+08