



Universidade Federal  
de São João del-Rei

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO ESTATÍSTICO DA INFLUÊNCIA E SIGNIFICÂNCIA DE  
PARÂMETROS OPERACIONAIS NA PERFORMANCE DE CÉLULAS  
DE ENERGIA MICROBIANA**

**MATHEUS HENRIQUE ALCÂNTARA DE LIMA CARDOZO**

**Ouro Branco**

**2024**

**MATHEUS HENRIQUE ALCÂNTARA DE LIMA CARDOZO**

**ESTUDO ESTATÍSTICO DA INFLUÊNCIA E SIGNIFICÂNCIA DE  
PARÂMETROS OPERACIONAIS NA PERFORMANCE DE CÉLULAS  
DE ENERGIA MICROBIANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Edson Romano Nucci.

Coorientadores: Profa. Dra. Isabel Cristina Braga Rodrigues e Prof. Dr. Demian Patrick Fabiano.

Bolsa de Mestrado: CAPES

**Ouro Branco**

**2024**

## **AGRADECIMENTOS**

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES),  
à Universidade Federal de São João del-Rei e ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química pelo suporte, fomento e financiamento.

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C268e      Cardozo , Matheus Henrique Alcântara de Lima.  
              Estudo estatístico da influência e significância de  
parâmetros operacionais na performance de células de  
energia microbiana / Matheus Henrique Alcântara de  
Lima Cardozo ; orientador Edson Romano Nucci;  
coorientadora Isabel Cristina Braga Rodrigues. --  
Ouro Branco, 2024.  
              74 p.

              Dissertação (Mestrado - Engenharia Química) --  
Universidade Federal de São João del-Rei, 2024.

              1. Bioeletroquímica. 2. Lógica fuzzy. 3.  
Planejamento experimental. I. Nucci, Edson Romano,  
orient. II. Rodrigues, Isabel Cristina Braga , co  
orient. III. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**NOMEAÇÃO DE BANCA EXAMINADORA Nº 6 / 2024 - PPGEQ (13.13)**

**Nº do Protocolo: 23122.005032/2024-04**

**Ouro Branco-MG, 15 de fevereiro de 2024.**

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **MATHEUS HENRIQUE ALCÂNTARA DE LIMA CARDOZO**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, EM 15 DE FEVEREIRO DE 2024.

**BANCA EXAMINADORA:**

*(Assinado digitalmente em 16/02/2024 14:08 )*

BOUTROS SARROUH  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DQBIO (12.26)  
Matrícula: 2028441

*(Assinado digitalmente em 15/02/2024 18:37 )*

DEMIAN PATRICK FABIANO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEQUI (12.29)  
Matrícula: 1810291

*(Assinado digitalmente em 15/02/2024 17:20 )*

EDSON ROMANO NUCCI  
COORDENADOR DE CURSO  
PPGEQ (13.13)  
Matrícula: 1811284

*(Assinado digitalmente em 19/02/2024 12:20 )*

ISABEL CRISTINA BRAGA RODRIGUES  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DQBIO (12.26)  
Matrícula: 2029466

*(Assinado digitalmente em 23/02/2024 09:52 )*

ANDRÉ AGUIAR MENDES  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 045.067.856-30

Visualize o documento original em <https://sipac.ufsj.edu.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **6**, ano: **2024**, tipo: **NOMEAÇÃO DE BANCA EXAMINADORA**, data de emissão: **15/02/2024** e o código de verificação: **ee7a334009**

## RESUMO

Células de energia microbiana (CEM) são uma tecnologia de interesse no cenário atual, pois possibilitam, simultaneamente, o biotratamento de resíduos e a biogeração de energia elétrica. Com o objetivo de otimizar as aplicações das CEM, há o interesse em investigar as variáveis que interferem mais significativamente em seu desempenho, uma vez que esses dispositivos são sistemas complexos. No âmbito dessa discussão, este trabalho objetivou empregar a lógica *fuzzy* aliada à técnica de planejamento experimental para avaliar estatisticamente como os parâmetros de operação das células de energia microbiana influenciam sua performance. Por meio de um levantamento bibliográfico baseado nas publicações da área na plataforma Google Acadêmico durante os últimos 10 anos, percebeu-se que as variáveis área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo são os parâmetros de entrada mais relatados em pesquisas com CEM e que densidade de corrente e densidade de potência geradas são os parâmetros de saída mais frequentemente retratadas nesses estudos, motivo pelo qual essas foram as variáveis selecionadas para a investigação estatística. Pela aplicação das simulações computacionais e subsequente planejamento experimental, notou-se que, para ambas as saídas estudadas, volume do dispositivo e área do anodo apresentaram efeito positivo, ao passo que a variável resistência elétrica externa exibiu efeito negativo. Foi possível, também, desenvolver modelos matemáticos que indicaram a relação entre cada uma das variáveis de entrada e as saídas estudadas, com significância estatística para o modelo referente à densidade de potência ( $R^2 = 86\%$ ). Para a etapa laboratorial, conduziu-se um ensaio em duplicada por 30 dias com tomada diária da diferença de potencial gerada nas CEM, a partir da qual foram calculados dados reais de densidade de potência. A comparação de densidade de potência obtida nos experimentos laboratoriais ( $860,69 \text{ mV/m}^2$ ) apresentou bom ajuste em relação à predição realizada por meio do modelo matemático desenvolvido para a densidade de potência ( $802,53 \text{ mV/m}^2$ ).

**Palavras-chave:** bioeletroquímica, lógica *fuzzy*, planejamento experimental.

## ABSTRACT

Microbial fuel cells (MFC) are a technology of interest in the current scenario, as they simultaneously enable the waste biotreatment and the electrical energy biogeneration. In order to optimize MFC applications, there is interest in investigating the variables that most significantly affect their performance, since these devices are complex systems. Thus, this work aimed to employ fuzzy logic combined with the design of experiments technique to statistically evaluate how the microbial fuel cells operating parameters influence their performance. Through a bibliographical search based on publications on Google Scholar platform over the last 10 years, it was noticed that anode area, external electrical resistance and reactor volume are the most reported input parameters in MFC research and current density and power density are the output parameters most frequently portrayed in these studies, which is why these variables were selected for statistical investigation. By applying computational simulations and subsequent design of experiments, it was noted that, for both outputs studied, reactor volume and anode area showed a positive effect, while the external electrical resistance showed a negative effect. It was also possible to develop mathematical models that indicated the relationship between the input and output variables studied, with statistical significance for power density model ( $R^2 = 86\%$ ). For the practical stage, a duplicate test was conducted for 30 days with daily measurement of potential difference generated in the MFC. The comparison of power density obtained in laboratory experiments (860.69 mV/m<sup>2</sup>) showed a good fit to the mathematical model prediction (802.53 mV/m<sup>2</sup>).

**Keywords:** bioelectrochemistry, fuzzy logic, design of experiments.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema geral da estrutura básica de uma célula de energia microbiana.....	11
Figura 2. Função de pertinência para a variável de entrada volume do dispositivo.....	27
Figura 3. Função de pertinência para a variável de entrada área do anodo. ....	27
Figura 4. Função de pertinência para a variável de entrada resistência elétrica externa. ....	28
Figura 5. Função de pertinência para a variável de saída densidade de potência.....	28
Figura 6. Função de pertinência para a variável de saída densidade de corrente. ....	29
Figura 7. Representação esquemática da conexão entre as variáveis de entrada, os blocos de regras e as variáveis de saída para as simulações no <i>software</i> InFuzzy.....	29
Figura 8. Representação da CEM construída. ....	32
Figura 9. Representação gráfica da comparação entre os resultados do conjunto de simulações computacionais para a densidade de potência e os dados obtidos pelo planejamento experimental do tipo DCCR. ....	41



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais parâmetros encontrados no levantamento bibliográfico, com seus números de ocorrência e limites inferiores e superiores.....	25
Tabela 2. Parâmetros e os intervalos de seus respectivos termos linguísticos empregados no conjunto de simulações no software InFuzzy.....	26
Tabela 3. Configurações empregadas nos blocos de regras para a saída densidade de corrente no conjunto de simulações no software InFuzzy.....	30
Tabela 4. Configurações empregadas nos blocos de regras para a saída densidade de potência no conjunto de simulações no software InFuzzy.....	30
Tabela 5. Meio de cultura para as culturas BRS utilizadas nas células de energia microbianas. ....	32
Tabela 6. Matriz de níveis e resultados do conjunto de simulações computacionais para as saídas de densidade de potência e tensão elétrica aplicados ao planejamento experimental do tipo DCCR. ....	34
Tabela 7. Valores de coeficiente, erro, teste t e p-valor para as variáveis do planejamento DCCR. ....	35
Tabela 8. Equações-modelo quadráticas para as variáveis estudadas no planejamento experimental do tipo DCCR. ....	38
Tabela 9. Dados da análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental do tipo DCCR da variável de saída densidade de corrente.....	38
Tabela 10. Dados da análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental do tipo DCCR da variável de saída densidade de potência. ....	39
Tabela 11. Comparação entre os resultados do conjunto de simulações computacionais para a densidade de potência e os dados obtidos pelo planejamento experimental do tipo DCCR. ...	40
Tabela 12. Valores de DDP medidos diariamente para as CEM 1 e 2, suas médias e potenciais elétricos e densidades de potência médios obtidos nos ensaios laboratoriais. ....	42
Tabela 13. Cinco maiores valores de densidades de potência médias obtidas nos testes práticos.....	44

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVOS.....	9
2.1 OBJETIVO GERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. CONCEITUALIZAÇÃO E MECANISMO DE OPERAÇÃO DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA.....	10
3.2 ELEMENTOS E MATERIAIS DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA.....	12
3.3 TRANSFERÊNCIA DE ELÉTRONS E MICROBIOLOGIA DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA.....	14
3.4 APLICABILIDADE DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA.....	16
3.5 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA.....	17
3.5.1. Influência do Volume do Dispositivo no desempenho das CEM.....	17
3.5.2 Influência da Resistência Externa no desempenho das CEM.....	18
3.5.3. Influência da Área do Anodo no desempenho das CEM.....	20
3.5.4. Influência da temperatura de operação e tempo de residência no desempenho das CEM.....	21
3.6. LÓGICA FUZZY E SUAS APLICAÇÕES EM CÉLULA DE ENERGIA MICROBIANA.....	21
4 METODOLOGIA.....	24
4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	24
4.2 ENSAIO LABORATORIAL.....	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
6 CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
ANEXO 1 - PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONÁRIO $2^{6-2}$ DE ESTUDO PRÉVIO	62
ANEXO 2 – Conceitos e definições envolvidos na tecnologia das células de energia microbiana.....	70

## 1 INTRODUÇÃO

Devido aos avanços urbanístico e industrial das últimas décadas, houve um aumento na produção de águas residuárias e, em muitos casos, não se aplicam a esses efluentes tratamento e descarte corretos, acarretando efeitos negativos no ambiente – o que afeta as reservas de água e os ecossistemas, por exemplo – e na saúde humana (Yongabi, 2010; Nath; Mishra; Pande, 2021). Como consequência da constatação desses efeitos, foram propostas diversas políticas e legislações ambientais que visam, entre outros itens, regular, monitorar e propor destinações e tratamentos apropriados às águas residuais e assegurar a existência de ambientes saudáveis e ecologicamente equilibrados (Macedo, 2000).

A escolha da técnica de tratamento mais adequada para determinado efluente é definida a partir da avaliação de um conjunto de aspectos do sistema de trabalho, tais como as características do resíduo a ser tratado, o atendimento às exigências legais, a área disponível para operação e o custo envolvido no tratamento. Atualmente, uma ampla variedade de métodos para tratamento de efluentes está disponível para aplicação e, em geral, se dividem em processos biológicos, físicos e físico-químicos (Mazzer; Cavalcanti, 2004). Apesar de vários dos métodos convencionais de tratamentos de efluentes apresentarem bons resultados, há a desvantagem de que muitos deles perdem a energia química contida nos efluentes que são tratados ou apresentam elevado consumo de energia para sua condução. Por esse motivo, tem havido, nas últimas décadas, um crescente esforço em desenvolver tecnologias de tratamento de efluentes que sejam capazes de recuperar parte da energia contida nos resíduos que se deseja tratar (Gude, 2015).

Nesse contexto, as células de energia microbiana (CEM), também chamadas de células combustíveis microbianas (CCM), surgem como uma tecnologia em potencial, já que esses dispositivos permitem promover, simultaneamente, o biotratamento de resíduos e a biogeração de energia elétrica. Ademais, as CEM são capazes de reduzir o custo operacional do tratamento de efluentes em comparação com sistemas convencionais, pois diminuem o consumo de eletricidade no processo de operação, o que comprova que essa ferramenta apresenta elevada potencialidade como alternativa sustentável para o tratamento de águas residuárias (Gude, 2015; Hidalgo *et al.*, 2014).

Analisando o histórico das CEM, percebe-se que essa é uma tecnologia recente. Apesar de desde o início do século XX já haver demonstrações de que organismos poderiam gerar tensão elétrica e entregar uma corrente, esses resultados ainda não eram interpretados em termos bioquímicos do processo metabólico naquela época, o que enfraqueceu os estudos

na área (Potter, 1911). A temática da geração de energia por meio do metabolismo de microrganismos só voltou a ganhar destaque no o início da era espacial, quando, na década de 1960, a *National American Spacial Agency* (NASA) demonstrou interesse no desenvolvimento de células a combustível microbianas para gerar energia e degradar resíduos orgânicos em viagens espaciais. Paralelamente, o trabalho com as CEM teve continuidade com pesquisadores japoneses e outros cientistas nos Estados Unidos e na América do Sul. No início da década de 90, surgiu um interesse ainda maior nessa área, de modo que estudos científicos relacionados às CEM começaram a expandir (Logan, 2009; Fung, 2016).

Assim, considerando a potencialidade das CEM, sua complexidade – com processos biológicos, químicos e físicos (Oliveira *et al.*, 2013) – e que essa tecnologia ainda está em fase de desenvolvimento, percebe-se que são relevantes pesquisas e estudos que buscam adquirir e atualizar o conhecimento a respeito dessa temática e suas contextualizações, de modo que se possa usufruir de todo o potencial apresentado pelas CEM no futuro (Trapero *et al.*, 2017; Rachinski, 2010).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Otimizar a performance das CEM por investigar as principais variáveis que interferem em seus desempenhos por meio da utilização de ferramentas computacionais e estatísticas para aprimorar e prever seus funcionamentos, avaliar condições que são difíceis de testar experimentalmente e reduzir despesas em termos de recursos e tempo de pesquisa.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Levantar os principais parâmetros de operação e resultados em pesquisas com CEM relatados na literatura o por meio de uma revisão bibliográfica.
2. Aplicar a lógica *fuzzy* para simular o desempenho de CEM em diferentes condições operacionais.
3. Utilizar os resultados obtidos pela aplicação da lógica *fuzzy* para subsequente emprego da técnica de planejamento experimental com a finalidade de avaliar estatisticamente os parâmetros de operação que influenciam mais significativamente o desempenho desses dispositivos.
4. Avaliar e provar os resultados obtidos computacionalmente por meio de ensaios laboratoriais, de modo a analisar se podem ser replicados em sistemas reais.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. CONCEITUALIZAÇÃO E MECANISMO DE OPERAÇÃO DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA

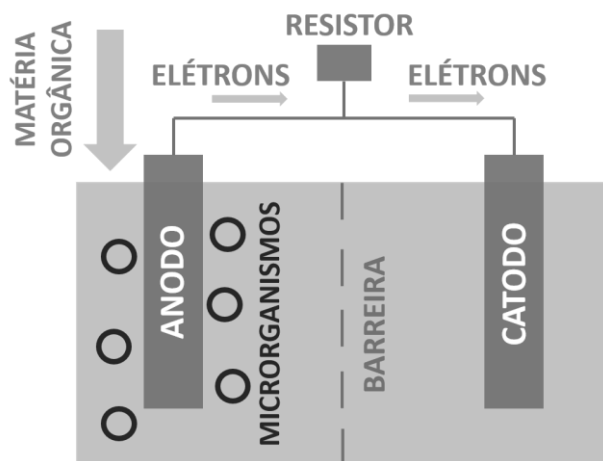
As células de energia microbianas são dispositivos eletroquímicos nos quais ocorre conversão da energia química contida em compostos orgânicos em energia elétrica por meio do metabolismo de microrganismos que crescem em condições anaeróbicas sobre eletrodos (Hidalgo *et al.*, 2014). A estrutura geral de uma CEM é constituída por dois compartimentos: o primeiro deles é anaeróbio e abriga um anodo, e o segundo é aeróbio e contém um catodo; esses eletrodos são separados internamente por uma barreira, que interdita a difusão de gás oxigênio (O<sub>2</sub>) da câmara catódica para a anódica, mas são conectados externamente por um circuito elétrico (Rahimnejad *et al.*, 2015).

Uma célula de energia microbiana pode ser construída sob diferentes configurações: empregando ou não uma membrana como barreira de troca de prótons, com catodo submerso ou exposto ao ar e em dupla câmara ou câmara única, por exemplo – e essas arquiteturas podem ainda ser associadas com a finalidade de se alcançar desempenho superiores (Marcon, 2011). Nesse contexto, destaca-se que, em geral, as CEM que adotam configuração de dupla câmara utilizam uma barreira de troca de prótons, que é empregada justamente para criar uma câmara anaeróbia onde os microrganismos possam oxidar substratos em separado do ambiente catódico, onde há presença de O<sub>2</sub> (Logan *et al.*, 2008). Já as CEM de câmara única podem ser construídas de modo que apresentem apenas uma câmara anódica, com catodo exposto diretamente ao ar, o que proporciona sistemas operacionais menos complexos e redução dos custos de construção (Liu; Cheng; Logan, 2005).

O mecanismo de funcionamento das CEM se baseia no processo de respiração celular, de modo que microrganismos que crescem no compartimento anódico desses dispositivos oxidam substratos e geram elétrons – além de íons H<sup>+</sup> e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) –, que são apanhados por mediadores de elétrons, transportados para o exterior da célula e conduzidos diretamente ao anodo. Então, os elétrons são transferidos até o catodo por meio do circuito elétrico externo – o que promove no sistema uma diferença de potencial, que pode ser convertida em corrente elétrica e recuperada na forma de energia elétrica – e, em geral, são finalmente transferidos ao O<sub>2</sub> presente na câmara catódica, que é reduzido (Hidalgo *et al.*, 2014; Fung, 2016). Para que esse processo seja realizável, é necessário que a oxidação do material orgânico decorra na ausência de aceitadores de elétrons, já que o anodo deve ser o

receptor final de elétrons nessa etapa, pois só assim há fluxo de elétrons – razão pela qual é preciso conter nesses dispositivos a barreira que evita a difusão de O<sub>2</sub> do compartimento catódico, que é aeróbio, para o anodo, que deve permanecer em condições anaeróbicas (Logan *et al.*, 2008). A Figura 1 apresenta a estrutura geral de uma CEM.

**Figura 1. Esquema geral da estrutura básica de uma célula de energia microbiana.**



Fonte: Cardozo e Nucci (2022).

Analisando o mecanismo de funcionamento das CEM, percebe-se que esses são sistemas complexos, em que processos biológicos, químicos e físicos estão envolvidos (Oliveira *et al.*, 2013). Assim, é possível notar que diversos fatores afetam suas performances, incluindo as taxas de degradação do substrato e de transferência de elétrons dos microrganismos para o anodo – bem como a seleção desses catalisadores biológicos –, a resistência do circuito elétrico, o desempenho do catodo, o fornecimento de oxigênio no sistema e sua redução no catodo (Liu *et al.*, 2005).

Diversos substratos podem ser aplicados nas células de energia microbiana, promovendo diferentes resultados e modos de operação. A utilização de substratos complexos como fonte de matéria orgânica para oxidação em uma CEM, por exemplo, contribui para a estabelecer uma comunidade microbiana diversificada e eletroquimicamente ativa no dispositivo, ao passo que substratos simples, em geral, melhoram sua produção de energia elétrica. Assim, ao longo das últimas décadas, a depender do objetivo das pesquisas conduzidas, diversos substratos, como biomassa lignocelulósica e glicose (Catal *et al.*, 2008), águas residuais (Rodrigo *et al.*, 2007), efluentes da indústria de alimentos e bebidas – como cerveja (Feng *et al.*, 2008) e chocolate (Patil *et al.*, 2009), por exemplo –, lixiviados de aterros sanitários (Greenman *et al.*, 2009), celulose (Rezaei; Richard; Logan, 2009) e xilose (Huang;

Angelidaki, 2008) foram testados em CEM. No entanto, a maior parte das pesquisas nesses dispositivos utiliza acetato como substrato, pois esse ácido orgânico é frequentemente utilizado como fonte de carbono para induzir microrganismos eletroativos. Ademais, o acetato é o produto final de várias vias metabólicas para fontes de carbono de ordem superior (Pant *et al.*, 2010).

Ainda outro ponto a se evidenciar no contexto do estudo dos substratos que podem ser aplicados nas CEM, a partir da constatação de que tais substâncias podem apresentar diversas origens, incluindo águas residuais domésticas, industriais e agrícolas, é que se percebe que esse dispositivo é capaz de realizar o biotratamento anaeróbio de efluentes, pois, por meio de sua operação, são empregados microrganismos para degradar matéria orgânica presente nos resíduos. Assim, ao passo que trata um efluente, por retirar dele parte de sua carga orgânica, há geração de energia na célula de energia microbiana, realizando um aproveitamento orgânico para geração de energia (Pant *et al.*, 2010; Rachinski, 2010).

As CEM podem ser operadas de modo contínuo ou em batelada, a depender das características de sua arquitetura e do substrato, dos microrganismos e do tipo de eletrodo empregados (Munoz-Cupa *et al.*, 2021). No caso da operação em batelada, favorece-se o acúmulo de biomassa e a produção de mediadores redox solúveis (Du; Li; Gu, 2007). Ademais, esse modo de operação, quando comparado ao funcionamento contínuo, apresenta a vantagem da maior remoção de demanda química de oxigênio e poluentes como compostos nitrogenados, devido ao ciclo mais longo e aos tempos de retenção (Ahn; Logan, 2010). Vale destacar, ainda, que as CEM podem ser utilizadas sob a operação de várias unidades em série com o objetivo de aumentar a densidade de potência e reforçar a sua aplicabilidade (Peixoto *et al.*, 2013).

### 3.2 ELEMENTOS E MATERIAIS DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA

De modo geral, os elementos básicos de uma CEM são dois eletrodos (anodo e catodo), uma barreira trocadora de prótons, um circuito elétrico e um reservatório, que podem se apresentar em variados materiais (Fung, 2016). Um material, para que possa ser empregado como anodo, deve ser condutor, biocompatível e quimicamente estável. Já os materiais utilizados para o catodo devem apresentar alto potencial redox e facilidade em capturar prótons (Lehnen, 2014). Nos vários anos de pesquisa em CEM, viu-se que alguns tipos de metais podem ser utilizados como anodos (Tanisho; Kamiya; Wakao, 1989), mas o material anódico mais versátil é o carbono – que se apresenta disponível em configurações diversas



como placas, barras, grânulos de grafite compactos, feltro, tecido, papel, fibras, espuma e carbono vítreo (Logan *et al.*, 2006).

Diferentes estratégias químicas e físicas podem ser adotadas para aumentar o desempenho do anodo, como incorporar Mn(IV), Fe(III), polímeros condutores ou substâncias electrocatalíticas ao material (Park; Zeikus, 2003; Schröder; Niessen; Scholz, 2003; Niessen *et al.*, 2004; Lowy *et al.*, 2006) e direcionar o fluxo do efluente através desse eletrodo (Cheng; Liu; Logan, 2006). Além disso, modificações estruturais do material anódico também podem ser úteis para promover o aumento do desempenho das CEM, como utilizar técnicas de nanoengenharia para potencializar a capacidade de transferência de elétrons desses materiais (Scott *et al.*, 2007).

Geralmente, os materiais que são empregados como anodos podem também ser utilizados como catodos, incluindo, dentre os materiais carbonáceos, haste, malha, papel e feltro de carbono, e, dentre os materiais à base de metais, chapas de aço inoxidável, níquel, cobre, ouro e titânio (Baudler; Riedl; Schröder, 2014; Baudler *et al.*, 2015; ZHOU *et al.*, 2016). Para além disso, é importante destacar que, apesar de a escolha do material dos eletrodos ser um parâmetro determinante na performance das CEM, o melhor desempenho desses materiais depende também de muitos fatores, tais como o espaçamento dos eletrodos, a condutividade da solução e o substrato empregado (Wang *et al.*, 2009).

A barreira trocadora de prótons é frequentemente alocada entre o anodo e o catodo das CEM para restringir a difusão de oxigênio da câmara catódica para a câmara anódica, ao passo que permite que prótons se movam do anodo para o catodo (Lovley, 2006). Em teoria, qualquer tipo de material poroso e que tenha resistência, inércia química e longevidade suficientes pode ser empregado como barreira trocadora de prótons em uma célula de energia microbiana. Inicialmente, várias aplicações empregaram membranas de troca catiônica como barreira trocadora de prótons (Angioni *et al.*, 2016), porém, devido ao alto custo desses materiais, muitos trabalhos buscaram alternativas, incluindo materiais como fibras de nylon e vidro, borracha natural, cerâmica e até sacolas biodegradáveis e luvas de laboratório (Rajan *et al.*, 2006; Fan; Hu; Liu, 2007; Zhang *et al.*, 2009; Behera; Jana; Ghangrekar, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Ghasemi *et al.*, 2013; Winfield *et al.*, 2013a; Winfield *et al.*, 2013b; Winfield *et al.*, 2014).

O circuito elétrico externo de uma CEM é composto, basicamente, por um fio condutor e uma resistência elétrica e deve ser alocado entre o anodo e o catodo para possibilitar que os elétrons gerados no dispositivo sejam recuperados na forma de eletricidade. Além disso, esse elemento pode ser conectado a um multímetro para medir a corrente elétrica

ou a diferença de potencial geradas no dispositivo e, se esses dados forem armazenados no decorrer do tempo de operação da CEM, uma análise da performance de geração de energia elétrica pode ser realizada (Logan *et al.*, 2006; Fung, 2016).

### 3.3 TRANSFERÊNCIA DE ELÉTRONS E MICROBIOLOGIA DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA

Considerando que os eletrodos presentes nas CEM são sólidos que não podem penetrar em células de microrganismos, percebe-se que é necessário que a transferência de elétrons nesses dispositivos seja realizada de dentro para fora da membrana celular microbiana (Lehnen, 2014). Nesse contexto, diferentes mecanismos de transferência de elétrons já foram identificados e estudados nas CEM e, dentro de uma classificação básica, dois tipos de mecanismos principais podem ser apontados: a transferência de elétrons por mediadores (MET), no qual o mediador é uma espécie redox solúvel, e a transferência direta de elétrons (DET), que é realizada por meio da ação de uma proteína redox ligada à membrana da célula microbiana (Schröder, 2007).

A transferência direta de elétrons (TED) ocorre por meio de contato físico da membrana da célula do microrganismo – ou de uma organela da membrana celular – com o anodo da CEM, sem o envolvimento de espécies redox externas. Para que essa categoria de transferência ocorra, os microrganismos devem apresentar conjuntos de proteínas que possibilitem a transferência de elétrons do interior da célula bacteriana para sua membrana celular e, após, para um aceptor de elétrons sólido – nesse caso, o eletrodo da CEM (Schröder, 2007). Ainda considerando que para que esse mecanismo de transferência de elétrons ocorra é requerido o contato físico da célula microbiana com o eletrodo da CEM, é relevante destacar que, como consequência dessa condição, em geral, apenas os microrganismos na primeira monocamada aderida à superfície do eletrodo se apresentam eletroquimicamente ativos para realizar tal transferência (Lovley, 2006). De acordo com pesquisas anteriores, alguns microrganismos que apresentam a capacidade de realizar a TED são bactérias dos gêneros *Geobacter* (Holmes *et al.*, 2004), *Rhodospirillum rubrum* (Chaudhuri; Lovley, 2003) e *Shewanella* (Kim *et al.*, 1999).

Ainda no que diz respeito à TED, estudos adicionais indicaram que algumas espécies de microrganismos apresentam nanofios – ou pili moleculares – eletronicamente condutores que os permitem alcançar e utilizar aceptores de elétrons sólidos mais distantes e que não estejam em contato direto com sua membrana celular (Reguera *et al.*, 2005). Desse modo, a

presença dos nanofios pode permitir o desenvolvimento de biofilmes eletroativos mais espessos e, conseqüentemente, melhores desempenhos nas CEM. Exemplos de microrganismos que apresentam essa capacidade são bactérias dos gêneros *Geobacter* (Holmes *et al.*, 2004) e *Shewanella* (Reguera *et al.*, 2006).

Para o caso da transferência de elétrons por mediadores (TEM), diferentes abordagens já foram propostas, e esses mecanismos podem ser classificados de acordo com a natureza das espécies redox mediadoras. Nesse cenário, uma das variedades de TEM é a transferência de elétrons via mediadores redox exógenos, que envolve a utilização de substâncias artificiais para facilitar a transferência de elétrons dos microrganismos atuantes na CEM para seu eletrodo. Nessa circunstância, uma das maiores desvantagens é a necessidade de adição regular do composto exógeno, o que é tecnologicamente desfavorável e ambientalmente questionável (Schröder, 2007).

Outra possibilidade para o mecanismo de TEM é a transferência de elétrons via metabólitos secundários, na qual os microrganismos atuantes na CEM produzem compostos de transporte de elétrons, por meio de vias metabólicas secundárias, que atuam como aceptores de elétrons terminais reversíveis, com capacidade de transferir elétrons da célula bacteriana para um oxidante sólido (Hernandez; Newman, 2001). Nesse caso, os metabólitos secundários, que são endógenos, apresentam grande relevância, pois sua presença torna a transferência de elétrons independente da presença de substâncias exógenas (Schröder, 2007). Ademais, uma molécula desses metabólitos pode ser reutilizada por centenas de ciclos redox, o que auxilia no aumento da eficiência da geração de corrente no dispositivo (Rabaey *et al.*, 2004; Rabaey *et al.*, 2005).

Ainda dentre as possibilidades de transferências do tipo TEM, encontra-se a transferência de elétrons via metabólitos primários – que são compostos cuja produção está associada à degradação oxidativa de substratos – e, nesse contexto, duas trajetórias metabólicas anaeróbias principais podem levar à formação de metabólitos reduzidos adequados para o funcionamento das CEM: a respiração anaeróbia e a fermentação (Schröder, 2007). No caso da respiração anaeróbica, microrganismos transferem elétrons residuais para receptores terminais de elétrons – que podem incluir materiais sólidos – sob condições anaeróbicas (Lovley, 2010). Assim, os eletrodos das CEM podem ser utilizados para remover os elétrons respiratórios em sistemas biológicos e recuperar energia na forma de eletricidade. Nessa circunstância, quanto mais positivo for o potencial redox do acceptor final de elétrons, maior será o ganho de energia possibilitado pelo sistema (Kim *et al.*, 2016). Já nos casos em que há oxidação incompleta do substrato, o ganho energético direto é inferior (Lehnen, 2014).

Independentemente do tipo de mecanismo de transferência de elétrons apresentado por um microrganismo, percebe-se que é fundamental que, para que ele contribua diretamente para a geração de corrente elétrica na CEM, apresente a capacidade de externar elétrons. No âmbito dessa discussão, é comum que esses microrganismos capazes de exocelular elétrons sejam nomeados como exoeletrogênicos, eletrígenos (Lovley, 2006) ou microrganismos eletroquimicamente ativos (In-Seop *et al.*, 2006). É importante salientar, também, que as densidades de potência mais altas em CEM são, na maioria das vezes, produzidas pelo emprego de inóculos com diversidade microbiana (Logan, 2009) – ademais, CEM que operam com culturas mistas podem utilizar fontes de carbono mais complexas devido à aceitabilidade do substrato mais ampla, relacionada à presença de diferentes espécies microbianas e à capacidade de converter substratos complexos em compostos mais simples (More; Ghangrekar, 2010; Pant *et al.*, 2010).

### 3.4 APLICABILIDADE DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA

Ao longo dos anos de estudo e pesquisa, a tecnologia das células de energia microbiana se mostrou relevante e versátil, pois exhibe possibilidades de aplicação nas áreas de geração de energia, tratamento de resíduos (Gude, 2015), recuperação de nutrientes (Kuntke *et al.*, 2012), sensoriamento (Jiang *et al.*, 2018) e monitoramento em tempo real do processamento de substratos (Gajda; Greenman; Ieropoulos, 2018), além de se apresentar como alternativa promissora ao uso de processos convencionais de tratamento de lodo ativado aerado. No caso da aplicação das CEM para o tratamento de águas residuais, pode-se destacar seu potencial para remover e recuperar contaminantes como demanda química de oxigênio (DQO), metais pesados e amônia (NH<sub>3</sub>) por meio da degradação biológica da matéria orgânica, com simultânea produção de energia elétrica (Trapero *et al.*, 2017). Ademais, a possibilidade de recuperação de produtos de alto valor como prata (Ag) ou cromo (Cr) e as vantagens de apresentar alta eficiência de conversão de substratos em energia e reduzido volume de lodo produzido são fatores que podem aumentar a relevância de sua aplicação em larga escala (Ali *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2017; Do *et al.*, 2018).

Ainda em se tratando da aplicabilidade das CEM para tratamento de águas residuais, é importante destacar que as principais desvantagens dos tratamentos convencionais de efluentes são as altas demandas relacionadas ao consumo de energia e custos operacionais (Aelterman *et al.*, 2006). A tecnologia das células de energia, por outro lado, é uma abordagem economicamente positiva para remover poluentes de águas residuais,

considerando sua concomitante produção de energia elétrica (Munoz-Cupa *et al.*, 2021). Ademais, a aplicação de CEM para tratar resíduos tem apresentado bons resultados em pesquisa da área, incluindo taxas de remoção de DQO na ordem – ou superiores – de 80% (Ahn; Logan, 2010; Liu *et al.*, 2004). Assim, quando se considera tais resultados alcançados, percebe-se um indicativo de que o tratamento biológico de efluentes em CEM se mostra relevante, já que as eficiências que podem ser apresentadas estão dentro ou acima da remoção média de DQO esperada para reatores anaeróbios (65-80%) (Foresti, 2002) e são superiores à mínima imposta em normas estaduais no Brasil (Morais; Santos, 2019) – ademais, o fato de que o processo de tratamento de efluentes nas CEM é acompanhado de geração de energia elétrica dá o indício de que as células combustíveis microbianas são promissoras alternativas para tratamento de águas residuais com sustentabilidade energética (Park *et al.*, 2017).

### 3.5 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DAS CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA

#### 3.5.1. Influência do Volume do Dispositivo no desempenho das CEM

O tamanho do reator é um parâmetro chave no projeto e desenvolvimento das CEM. Mas a relação entre o aumento do volume do reator e a performance do dispositivo não é uma questão trivial. Xiao e colaboradores (2014) afirmam que os resultados de seu estudo encorajam o aumento da escala das CEM, porque a recuperação de energia geral não diminui com o aumento do tamanho da CEM sob certas condições. De modo similar, Liu e colaboradores (2008) obtiveram maior densidade de potência volumétrica de uma CEM maior com um espaçamento de eletrodo mais curto e uma maior área de superfície do ânodo por volume em comparação com uma CEM menor. Ainda, no estudo de Walter e colaboradores (2020), a potência máxima gerada aumentou com o tamanho do dispositivo.

Por outro lado, apesar de algumas exceções, a literatura indica que é difícil desenvolver reatores de grande escala para promover maiores potências, porque a geração de densidade de potência não é uma função linear do tamanho do reator (Park; Ren, 2012). De acordo com Fan, Han e Liu (2012), aumentar os dispositivos de escala milimétrica para reatores de litros de volume não leva necessariamente a um aumento significativo na potência. Além disso, esses pesquisadores destacam que várias CEM em escala de litro foram desenvolvidas nos últimos anos, mas, em geral, apresentaram densidades de potência que foram de 2 a 4 vezes menores que as apresentadas pelas CEM em escala de mililitros. Assim,

os autores afirmam que o principal objetivo do aumento de escala das CEM não deve ser apenas ampliar o tamanho do reator, mas também elevar a potência e a corrente geradas.

No estudo de Singh e Kaushik (2021), quando o volume de trabalho do reator foi reduzido para a escala de mililitros houve um aumento acentuado no valor de densidade de potência máxima quando comparado com a escala de litros. Similarmente, Ieropoulos, Greenman e Melhuish (2008) notaram que, no que diz respeito à saída de potência da CEM testada em seu estudo, o aumento de escala resultou em diminuição da potência por unidade de volume. Em consonância, Zhang e colaboradores (2013) apontam que a geração de corrente em CEM de maior escala é menor em comparação com aquelas de tamanhos pequenos. Nawaz e colaboradores (2020) também afirmam que aumentar o tamanho do reator reduz a produção de corrente na CEM devido ao aumento simultâneo na resistência interna, que se dá justamente pelo aumento de escala – e como alternativa, os pesquisadores sugerem que esse problema pode ser resolvido conectando vários dispositivos em série.

Em suma, é possível notar, com base na literatura, que uma CEM em escala de litro tende a apresentar densidade de potência muito menor em comparação com um CEM em menor escala (Zhang *et al.*, 2013). Assim, nessa área de pesquisa, alguns fatores ainda devem ser otimizados: por exemplo, se o volume da CEM for aumentado e as áreas dos anodos e catodos não forem suficientemente aumentadas, o desempenho diminuirá devido à área de superfície do eletrodo insuficiente. Além disso, testes de laboratório indicam que, se a distância entre os eletrodos for aumentada demasiadamente, a densidade de potência gerada poderá diminuir (Logan *et al.*, 2015). Entretanto, há resultados que sugerem que se esses obstáculos forem superados e houver a otimização desses fatores-chave, será possível, no processo de aumento de escala de uma CEM, que a densidade de potência seja mantida ou até melhorada (Liu *et al.*, 2008).

### **3.5.2 Influência da Resistência Externa no desempenho das CEM**

A resistência externa impacta significativamente o desempenho do dispositivo, incluindo a produção de eletricidade, remoção de matéria orgânica e crescimento microbiano (González del Campo, 2014). Ao longo dos últimos anos de pesquisa, variados estudos apontaram como a resistência elétrica externa aplicada em uma CEM afeta diferentes aspectos de sua performance.

### 3.5.2.1 Influência da Resistência Elétrica Externa na geração de tensão elétrica nas CEM

Numa regra geral, tem-se que a tensão máxima gerada em uma CEM é obtida em circuito aberto – quando a resistência externa é infinita – e, quando a resistência externa diminui, a tensão gerada pela CEM também diminui (González del Campo, 2014). Isso ocorre devido às limitações apresentadas na CEM em relação à cinética de reação do eletrodo e aos fenômenos de transporte nelas presentes (Menicucci, 2006). Essa relação entre resistência elétrica externa e geração de tensão pode ser verificada no estudo de Ghangrekar e Shinde (2007), em que se notou aumento da tensão gerada no dispositivo com o aumento da resistência externa de 0 a 4.000  $\Omega$ . Nos resultados, observou-se que a tensão máxima (358 mV) foi observada no maior valor de resistência externa testado.

### 3.5.2.2. Influência da Resistência Elétrica Externa na geração de corrente nas CEM

Da teoria, tem-se que, quando uma CEM é operada em resistências externas mais baixas, maiores correntes são geradas. Isso se dá à maior transferência de elétrons para o catodo, levando a uma reação catódica mais rápida e a altas atividades eletrogênicas (Rismani-Yazdi *et al.*, 2011). Ademais, operando em altas resistências externas, que quase imitam um circuito aberto, os microrganismos podem ser incapazes de transferir seus elétrons, restringindo a corrente. Essa relação entre resistência externa e corrente gerada pode ser exemplificada pelo estudo de Aelterman e colaboradores (2008), em que a redução da resistência externa resultou em aumento significativo na geração contínua de corrente.

### 3.5.2.3. Influência da Resistência Elétrica Externa na geração de potência nas CEM

Estudos teóricos demonstram que a potência máxima de uma CEM é extraída quando a resistência externa da fonte de energia elétrica é igual à resistência interna do dispositivo. Então, se a resistência externa for maior ou menor que a resistência interna, a potência gerada diminuirá (González del Campo, 2014). Em concordância com esse fato, Katuri e colaboradores (2011) observaram, em sua pesquisa, que quando a resistência externa da CEM de trabalho – cuja resistência interna era de 1000  $\Omega$  – foi aumentada de 100 para 1000  $\Omega$ , a densidade de potência aumentou. Além disso, queda na geração de energia foi observada em valores de resistência externa de 10000 a 50000  $\Omega$ . Lyon e colaboradores (2010) também observaram esse efeito: em seu estudo com uma CEM de resistência interna de 300  $\Omega$ , a

maior produção de energia foi obtida com uma resistência externa de 470  $\Omega$ , seguida de 1000  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 10000  $\Omega$  e, finalmente, 10  $\Omega$ .

Apesar dessa relação aparecer em muitos estudos, em vários outros a resistência interna não é medida. Nesse caso, observa-se um aumento da potência quando a resistência externa é aumentada até determinado valor, e então, quando a resistência externa continua a aumentar, a potência diminui, o que sugere que valores médios de resistência elétrica externa podem favorecer a geração de potência nas CEM. Zhang e colaboradores (2011), por exemplo, observaram aumento na potência obtida na CEM quando a resistência externa aumentou de 10 para 50  $\Omega$ . Porém, quando a resistência externa aumentou de 50 para 1000  $\Omega$ , a potência diminuiu. Esse fenômeno pode estar ligado ao fato de que, com resistência externa de 50  $\Omega$ , foi possível ocorrer maior produção de biomassa ativa na superfície do eletrodo. Já a resistência externa de 10  $\Omega$ , apesar de proporcionar maior biomassa ativa, pode apresentar significativa perda ôhmica (González del Campo, 2014).

Analisado que a relação entre potência gerada na CEM e as resistências interna e externa apresentadas ser bastante fundamentada, é importante destacar também que, em alguns estudos, essa relação não é satisfeita. Nas pesquisas conduzidas por Song e colaboradores (2010) e Lee e colaboradores (2010), por exemplo, a densidade de potência aumentou com o aumento da resistência elétrica externa.

### **3.5.3. Influência da Área do Anodo no desempenho das CEM**

A área, o material e a configuração do ânodo representam parâmetros importantes em uma CEM, pois influenciam, principalmente, o desenvolvimento da comunidade microbiana envolvida nas reações eletroquímicas. Segundo Chaudhuri e Lovley (2003) a geração de potência elétrica em uma CEM, em geral, aumenta com maiores áreas de superfície anódica. Em harmonia com isso, no estudo desenvolvido por Di Lorenzo e colaboradores (2010) em uma CEM em batelada, a maior corrente elétrica gerada decorreu da maior área superficial de anodo utilizada. Além disso, foi observado que a maior área de superfície do anodo testada aumentou também a eficiência coulômbica do dispositivo. De acordo com os autores, o aumento da área de superfície do ânodo aumenta a adesão microbiana e, conseqüentemente, a geração de bioeletricidade.



### 3.5.4. Influência da temperatura de operação e tempo de residência no desempenho das CEM

No caso da temperatura de operação das CEM, a literatura indica que valores elevados deste parâmetro causam diminuição na potência gerada em células de energia microbiana (Gadkari *et al.*, 2020). Já no caso do tempo de residência, a literatura indica que menores valores desse fator favorecem a geração de energia nas células de energia microbiana (Long *et al.*, 2019).

### 3.6. LÓGICA FUZZY E SUAS APLICAÇÕES EM CÉLULA DE ENERGIA MICROBIANA

A lógica *fuzzy* foi desenvolvida por Zadeh (1965), engenheiro e cientista de sistemas, como uma alternativa aos recursos tecnológicos disponíveis na época, que eram incapazes de lidar com situações que compreendessem circunstâncias não passíveis de processamento por meio da lógica booleana. Assim, a abordagem *fuzzy* é capaz de combinar lógica multivalorada, teoria probabilística, inteligência artificial e redes, ao passo que liga a linguística e a inteligência humana, já que muitos conceitos são mais bem definidos por palavras do que pela matemática (Afonso, 2009).

Essa ferramenta tem por objetivo alinhar as decisões tomadas pela máquina às decisões humanas, principalmente ao trabalhar com uma grande variedade de informações vagas e incertas, com regras expressas por meio de implicações lógicas da forma “se ... então” (Zadeh, 1965). Dentre as principais vantagens do emprego da lógica *fuzzy*, encontram-se o mecanismo de raciocínio similar ao do ser humano, por meio do uso de termos linguísticos, a modelagem de conhecimento de senso comum, a técnica de aproximação universal, a robustez e tolerância à falha e os baixos custos de desenvolvimento e de manutenção (Nogueira, 2013).

Já há algum tempo – e até hoje –, as aplicações da lógica *fuzzy* são as mais amplas e diversas, envolvendo, por exemplo, as áreas da Engenharia Civil, Química, Ciências da Computação, Economia, Medicina, Bioprocessos e Geologia (Ayyub, 1991; Rouvray, 1997; Ramón-Fernández *et al.*, 2019). Esta versatilidade de aplicações está ligada justamente à possibilidade apresentada pela lógica *fuzzy* de modelar e manipular matematicamente informações vagas e imprecisas, naturais da linguagem humana (Zadeh, 1965).

Tendo em vista que as células de energia microbianas são sistemas complexos – pois nelas ocorrem processos biológicos, eletroquímicos e de transferência de massa, que afetam seu desempenho – há grande interesse em investigar estas inter-relações e promover um

aprimoramento do sistema. Neste contexto, técnicas matemáticas, como a lógica *fuzzy*, são capazes de auxiliar neste estudo, já que podem ser empregadas para otimizar a operação e/ou concepção do sistema e identificar os principais fatores envolvidos no processo (Picioreanu *et al.*, 2010; Gadkari; Gu; Sadhukhan, 2018).

Yan e Fan (2013) estudaram a geração de tensão elétrica em célula de combustível microbiana de duas câmaras sob controle *fuzzy* e, segundo os autores, o controle proposto se mostrou adequado e de interesse, pois além de apresentar uma característica de resposta rápida, exibiu um bom comportamento em regime permanente, e os resultados da simulação indicaram que o controlador é eficaz para manter a saída de tensão elétrica constante na CEM, o que é fundamental para o funcionamento do dispositivo quando há mudanças de carga elétrica.

Luo e colaboradores (2019) também estudaram o controle de tensão de uma CEM com base em estratégia de lógica *fuzzy* e concluíram que esta abordagem é capaz de conter perturbações e garantir que a saída de tensão em uma CEM não sofra grandes flutuações, protegendo, assim, as cargas elétricas quando houver interferência externa. De modo semelhante, Fu, Fu e Marrani (2021) utilizaram um controle *fuzzy* em uma célula de energia microbiana de câmara única a fim de cobrir os efeitos de termos não lineares, incertezas de parâmetros e perturbações presentes no sistema, ajustando, além das concentrações de substrato e biomassa, a tensão de saída no dispositivo e, de acordo com os testes realizados e resultados obtidos, o método aplicado foi capaz de atingir com sucesso tais objetivos definidos e sua robustez foi satisfatória tanto em condições simulatórias quanto práticas.

Serhat e colaboradores (2017) realizaram uma investigação experimental e uma modelagem, baseada na teoria *fuzzy*, dos desempenhos de termos como potência elétrica gerada, temperatura, tempo e efeito de bolha em células de energia microbiana, de modo a demonstrar que é possível avaliar o desempenho de uma CEM por meio da geração de um modelo de lógica *fuzzy*. Segundo os autores, a partir da comparação dos resultados experimentais com os resultados do estudo de lógica *fuzzy*, foi possível perceber que os resultados obtidos pela modelagem são bastante compatíveis – com coeficiente de determinação múltipla ( $R^2$ ) de 98,79% para todos os dados –, o que indica que esta técnica pode ser utilizada com bom desempenho para estudos e pesquisas envolvendo células de energia microbiana.

Ramón-Fernández e colaboradores (2019) utilizaram a abordagem *fuzzy* para realizar uma modelagem da captação de energia em uma CEM à base de cerâmica e, neste estudo, a lógica *fuzzy* foi usada para modelar o efeito de diferentes parâmetros de projeto e

operacionais, como área do ânodo, a espessura da cerâmica e a resistência elétrica gerada. De acordo com os autores, o modelo baseado em lógica *fuzzy* desenvolvido permitiu prever o desempenho de potência elétrica gerada nesta configuração de CEM com uma precisão de 94,85%. Ademais, o emprego da lógica *fuzzy* permitiu um dimensionamento mais preciso dos protótipos quando projetados para aplicações práticas em maiores escalas. Assim, a pesquisa indicou que o sistema de inferência *fuzzy* se mostrou uma ferramenta útil e confiável para prever e modelar a captação de energia de CEM baseadas em cerâmica, com a perspectiva de facilitar o processo de implementação da tecnologia em aplicações em escalas superiores às laboratoriais, o que é de grande interesse, pois este ainda é um gargalo nos estudos envolvendo estes dispositivos (Oliveira *et al.*, 2013).

No âmbito dessa discussão, vale ressaltar, ainda, que é a lógica *fuzzy* pode ser aliada à técnica de planejamento de experimentos a fim de alcançar resultados de grande relevância, uma vez que essa ferramenta possibilita observar os efeitos das variáveis envolvidas em um processo monitorado – bem como suas interações –, determinar as melhores condições de operação e realizar uma otimização simultânea de todos os fatores envolvidos no sistema, com necessidade de um menor número de experimentos e maiores rapidez e eficiência (Pereira; Pereira-Filho, 2018).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, para a realização do levantamento bibliográfico – que teve como objetivo observar os principais parâmetros de operação e os resultados alcançados em pesquisas com CEM relatados na literatura e suas grandezas –, adotou-se a metodologia sugerida por Galvão (2011), com o objetivo de obter informações precisas e relevantes relacionadas ao tema de estudo e em quantidade razoável, de modo que se pudesse subsidiar o projeto. Para isso, de posse do tema da pesquisa, delimitado na fase de delineamento do projeto, selecionou-se a base de dados bibliográficos que seria consultada. Para essa pesquisa, elegeu-se a plataforma Google Acadêmico como fonte de informações, a partir da percepção de que essa é uma ferramenta de acesso popular e que pode ser de grande relevância quando utilizada atentando-se às condições de haver, no conteúdo informacional disponibilizado, autoria, ano de publicação, associação com instituição científica de credibilidade e referências bibliográficas.

Após, selecionou-se os termos de pesquisa adequados para a elaboração da estratégia de busca pelo campo assunto. Para tanto, verificou-se terminologias especializadas em bases de dados bibliográficos a fim de adotar termos e conceitos padronizados e adotados por pesquisadores da área. Para essa etapa, utilizou-se dos Descritores em Ciências da Saúde (DECS). Nessa plataforma, para o tema da pesquisa, o descritor em inglês é “Bioelectric Energy Sources”, o descritor em espanhol é “Fuentes de Energía Bioeléctrica”, o descritor em português é “Fontes de Energia Bioelétrica” e os termos alternativos são “Biocélulas Combustíveis”, “Biopilhas”, “Células Biocombustíveis”, “Células Biológicas Combustíveis”, “Células Biológicas de Combustível”, “Células de Biocombustível”, “Células de Combustível Biológicas”, “Células de Combustível Enzimáticas”, “Células de Combustível Microbianas” e “Fontes de Potência Bioelétrica”. Assim, os 13 termos – descritores em inglês, espanhol e português e termos alternativos – foram selecionados para a pesquisa na plataforma Google Acadêmico sob o modelo de busca para termos compostos (utilizando aspas), um por vez.

Em seguida, determinou-se o período e o idioma das publicações que seriam analisadas: materiais em português, inglês ou espanhol publicados entre 2013 e 2023 – buscando, assim, por estudos realizados na última década. Por fim, os materiais foram selecionados e organizados para leitura e coleta de informações. Nessa fase, os documentos

bibliográficos – que totalizaram 327 publicações – tiveram, inicialmente, seus resumos avaliados, com o objetivo de averiguar se condiziam com a finalidade do projeto de pesquisa. Aqueles julgados condizentes tiveram seu conteúdo analisado e suas informações registradas.

Do total de trabalhos que compuseram o banco bibliográfico, 59 publicações foram incluídas no levantamento dos principais parâmetros de operação e resultados alcançados em CEM – o restante dos trabalhos, de acordo com a avaliação inicial não estavam de acordo com as diretrizes da pesquisa, pois não se tratavam especificamente sobre CEM, mas de suas contextualizações, se tratavam de revisões bibliográficas, não apresentando dados experimentais que pudessem ser incorporadas à pesquisa, apresentavam metodologias que não se adequavam ao objetivo do estudo e questões afins.

A Tabela 1 descreve os principais dados encontrados no levantamento, com seus números de ocorrência, assim como os limites inferior e superior de seus valores experimentais relatados nos trabalhos científicos, que foram usados na metodologia de desenvolvimento das simulações computacionais – sendo que os parâmetros densidade de potência e densidade de corrente elétrica são variáveis de saída (respostas ou resultados dos experimentos), e os demais parâmetros são dados de entrada (ou de operação).

**Tabela 1. Principais parâmetros encontrados no levantamento bibliográfico, com seus números de ocorrência e limites inferiores e superiores.**

Parâmetro	Número de ocorrências	Limites do parâmetro	
		Inferior	Superior
Área do anodo (cm <sup>2</sup> )	18	0,04	64
Densidade de Corrente (mA·m <sup>-2</sup> )	16	10	40000
Densidade de Potência (mW·m <sup>-2</sup> )	24	0,57	3610
Resistência Elétrica Externa (Ω)	12	47	1000
Volume do Dispositivo (L)	20	0,04	3,4

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

\* Apenas os parâmetros com maiores números de ocorrência e que se adequam às diretrizes da pesquisa foram incluídos na tabela.

\*\* Os dados de densidade de potência e corrente elétricas coletados correspondem aos dados máximos dessas saídas apresentadas nas publicações analisadas.

Com base na busca bibliográfica apresentada na Tabela 1 – que se alinha aos resultados de um trabalho prévio desta mesma linha de pesquisa (Anexo 1) –, determinou-se os parâmetros e os níveis de trabalho para a realização do estudo. Assim, a pesquisa foi

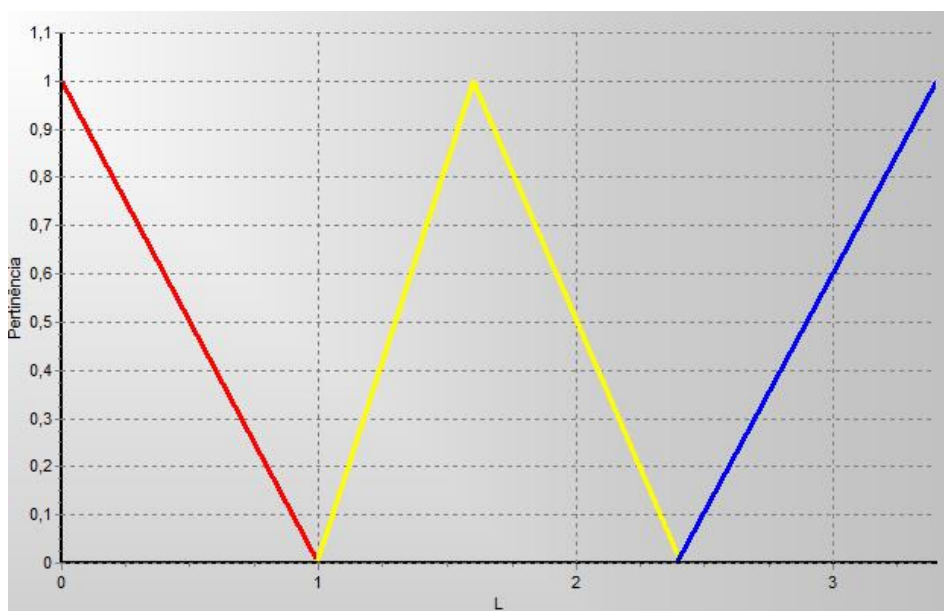
baseada em 3 variáveis de entrada – área do anodo, resistência elétrica externa, e volume do dispositivo – e 2 variáveis de saída – densidade de potência e densidade de corrente. Em seguida, esses parâmetros e suas faixas de trabalho levantadas na literatura foram utilizadas para constituir um conjunto de simulações utilizando o *software* InFuzzy. Para isso, inicialmente, foram adicionadas e configuradas as 3 variáveis de entrada e as 2 variáveis de saída, com seus nomes, faixas e funções de trabalho e unidades. Além disso, definiu-se a lista de termos linguísticos para cada uma delas de acordo com os dados do levantamento e os conhecimentos do programador, como apresentado na Tabela 2 – que também exhibe os intervalos de grandeza correspondentes a cada termo linguístico para as variáveis em estudo. As Figuras de 2 a 6 apresentam as funções de pertinência adotadas para as variáveis de entrada e saída.

**Tabela 2. Parâmetros e os intervalos de seus respectivos termos linguísticos empregados no conjunto de simulações no software InFuzzy.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Classificações</b>			
Área do anodo (cm <sup>2</sup> )	Baixa: 0 a 20,1	Média: 19, 9 a 40,1	Alta: 39,9 a 64	
Densidade de Corrente (mAm <sup>-2</sup> )	Baixa: 0 a 101	Média Baixa: 99 a 1001	Média Alta: 999 a 10001	Alta: 9999 a 40000
Densidade de Potência (mWm <sup>-2</sup> )	Baixa: 0 a 801	Média Baixa: 799 a 1751	Média Alta: 1699 a 2601	Alta: 2599 a 3610
Resistência Elétrica Externa (Ω)	0 a 251	249 a 600	599 a 1000	
Volume do Dispositivo (L)	0 a 1	0,99 a 2,41	2,39 a 3,4	

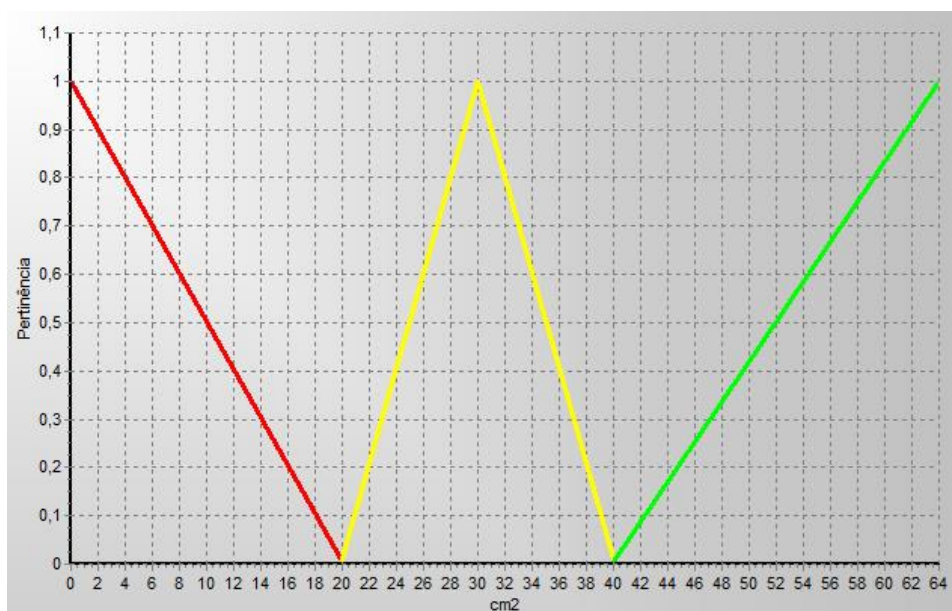
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

**Figura 2. Função de pertinência para a variável de entrada volume do dispositivo.**



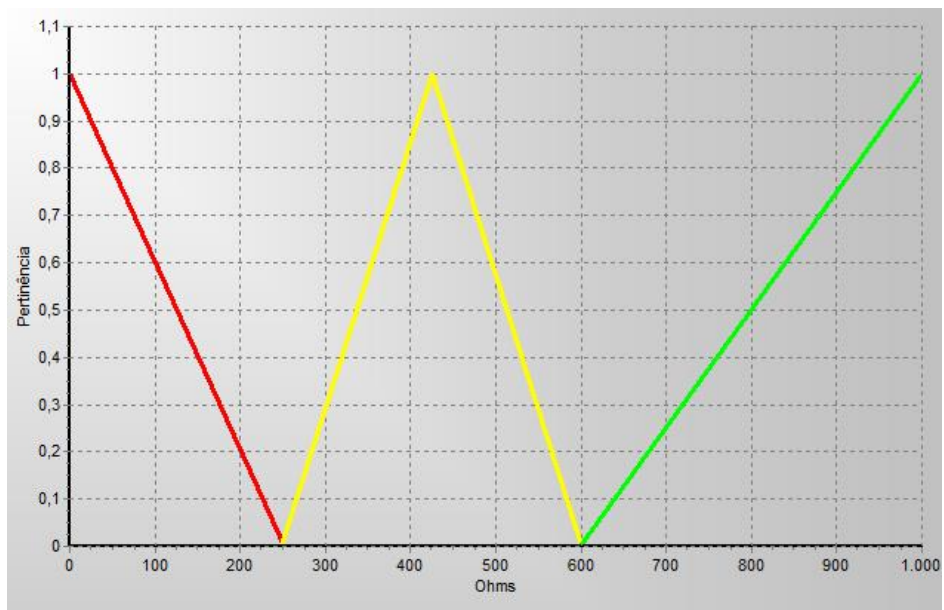
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

**Figura 3. Função de pertinência para a variável de entrada área do anodo.**



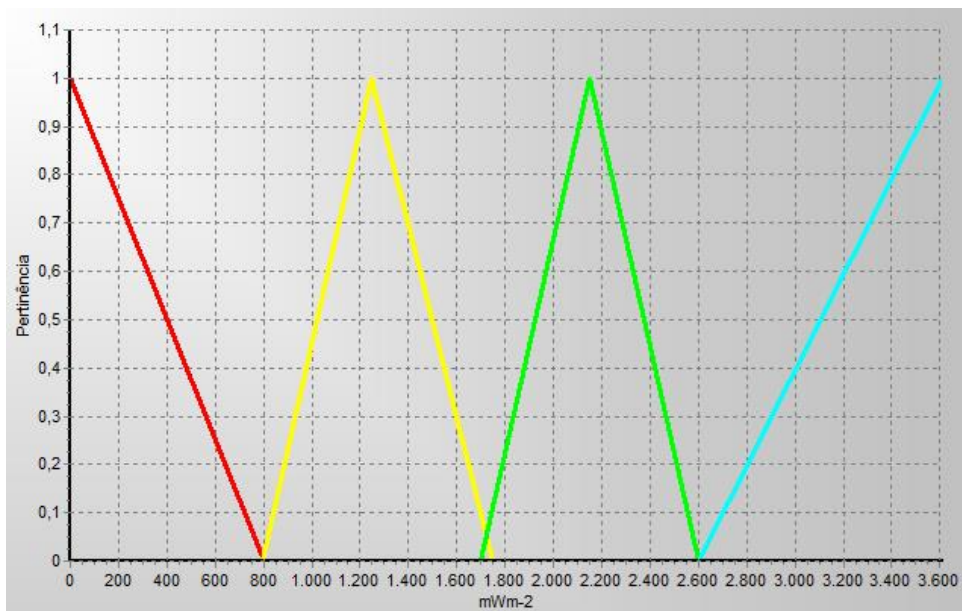
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

**Figura 4. Função de pertinência para a variável de entrada resistência elétrica externa.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

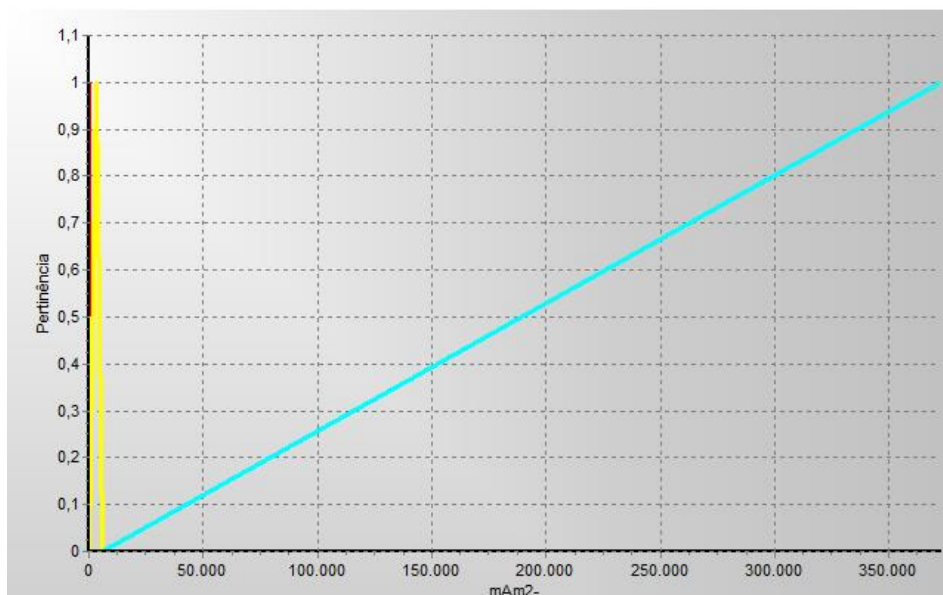
**Figura 5. Função de pertinência para a variável de saída densidade de potência.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).



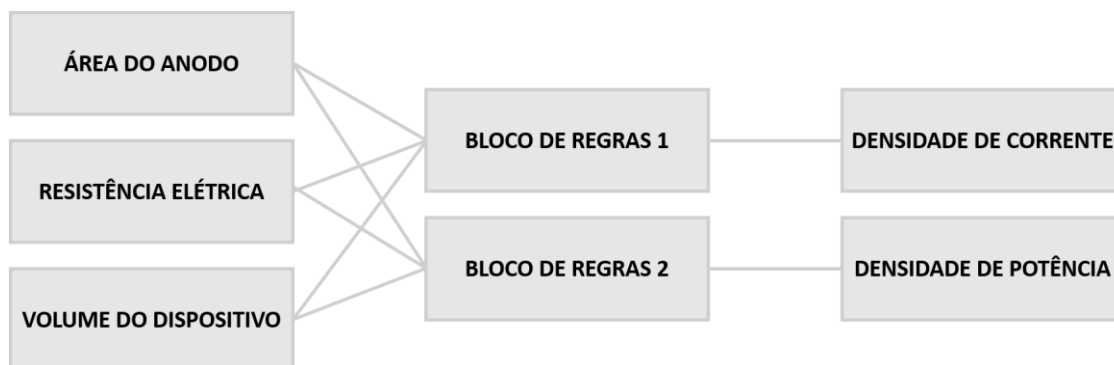
**Figura 6. Função de pertinência para a variável de saída densidade de corrente.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

Depois da configuração das variáveis de entrada e saída, realizou-se a etapa de definição das regras do projeto. Para tanto, foram criados 2 blocos de regras – sendo que todas as entradas foram conectadas a cada um dos blocos de regras, e cada saída foi conectada a apenas um dos blocos – como ilustrado na Figura 7.

**Figura 7. Representação esquemática da conexão entre as variáveis de entrada, os blocos de regras e as variáveis de saída para as simulações no *software* InFuzzy.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

Após suas criações, cada um dos blocos de regras foi configurado de acordo com suas entradas e pertencente saída, considerando conhecimentos da literatura e do programador. As

Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, as configurações utilizadas nos blocos de regras referentes à densidade de corrente e densidade de potência nessa etapa do projeto.

**Tabela 3. Configurações empregadas nos blocos de regras para a saída densidade de corrente no conjunto de simulações no software InFuzzy.**

Parâmetro	Volume	Área do Anodo	Resistência Elétrica Externa	Densidade de Corrente
Conjunto de Regras	Baixo	Baixa	Baixa	Média Baixa
	Médio	Baixa	Baixa	Média Baixa
	Baixo	Alta	Baixa	Média Baixa
	Médio	Alta	Baixa	Alta
	Baixo	Baixa	Alta	Baixa
	Médio	Baixa	Alta	Baixa
	Baixo	Alta	Alta	Média Baixa
	Médio	Alta	Alta	Média Baixa
	Baixo	Alta	Média	Média Baixa
	Alto	Média	Média	Média Alta
	Médio	Média	Média	Média Baixa
	Médio	Baixa	Média	Média Baixa
	Médio	Média	Baixa	Média Alta
	Médio	Média	Alta	Média Baixa
	Médio	Média	Média	Média Alta
Alto	Média	Baixa	Alta	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

**Tabela 4. Configurações empregadas nos blocos de regras para a saída densidade de potência no conjunto de simulações no software InFuzzy.**

Parâmetro	Volume	Área do Anodo	Resistência Elétrica Externa	Densidade de Potência
Conjunto de Regras	Baixo	Baixa	Não Média	Baixa
	Médio	Baixa	Não Média	Baixa
	Baixo	Alta	Não Média	Média Baixa
	Médio	Alta	Não Média	Média Alta
	Baixo	Média	Média	Média Baixa
	Alto	Média	Média	Média Alta
	Médio	Baixa	Média	Média Baixa
	Médio	Alta	Média	Alta
	Médio	Média	Não Média	Média Baixa
	Médio	Média	Média	Média Alta
	Alto	Alta	Média	Alta

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

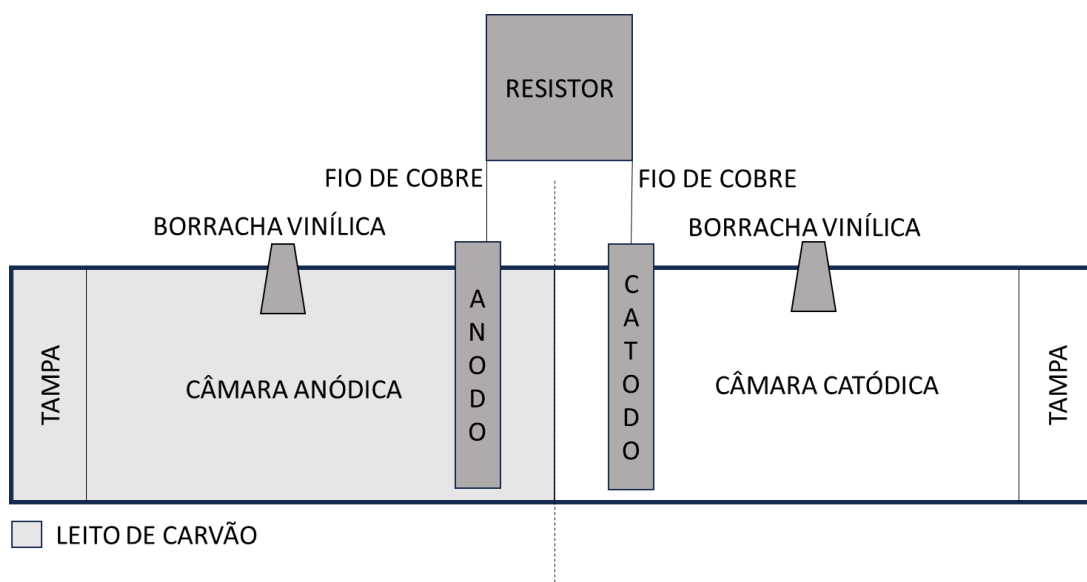
\*O termo “Não Média” corresponde às classificações “Alta” e “Baixa”.

Após a construção dos blocos de regras, foram realizadas as simulações computacionais no *software* InFuzzy baseadas nos dados da literatura com o objetivo de obter respostas computacionais para as saídas de densidade de potência e densidade de corrente e, subsequentemente, executar um planejamento fatorial do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR), além de definir a significância estatística das variáveis de trabalho. Para isso, foram usadas planilhas eletrônicas do *software* Excel<sup>®</sup> desenvolvidas por Teófilo e Ferreira (2006) com as mesmas variáveis de entrada apresentadas na Tabela 2. Nesse estudo, utilizou-se de 8 experimentos no planejamento fatorial, 6 experimentos nos pontos axiais e triplicatas no ponto central – ou seja, 17 conjuntos de dados no total –, em cinco níveis ( $+\alpha$ , +1, 0, -1 e  $-\alpha$ , em que  $+\alpha = 1,681$  e  $-\alpha = -1,681$ ). Os resultados foram analisados de acordo com as respostas de significância estatística fornecidas pelas tabelas eletrônicas, além dos dados que compõem a análise de variância (ANOVA).

#### 4.2 ENSAIO LABORATORIAL

Para a etapa laboratorial do projeto, tomou-se como base a metodologia utilizada por Rodrigues (2021). Cilindros de policloreto de vinila (PVC) soldáveis foram utilizados para a montagem das células de energia microbiana, com orifícios em suas partes superiores, destinados à adição de nutrientes, saída de gases e instalação de eletrodos. Cada orifício foi vedado por borracha butílica e recebeu uma agulha com seringa para saída de gases. Os eletrodos, constituídos de barras de grafite, foram fixados por resina epóxi e receberam soldas de fios de cobre para fechar o circuito elétrico externo. A câmara anódica e a câmara catódica foram fixadas em junções do tipo “luva” de PVC com o auxílio de um anel de PVC do mesmo diâmetro dos tubos utilizados. O comprimento total dos reatores foi de 210 mm, com diâmetro de 40 mm e volume nominal de 75 mL para cada câmara. As barras de grafite que compuseram o catodo e o anodo foram alocadas em cerca de 15 mm do centro do reator, um de cada lado, e apresentaram 9,6 mm de diâmetro, sendo que a área útil total dos eletrodos no interior da CEM foi de  $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Os fios de cobre do circuito elétrico externo foram de 1,5 mm, e o resistor elétrico de 1 k $\Omega$ . A Figura 8 exibe uma representação da CEM construída.

**Figura 8. Representação da CEM construída.**



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2021).

O inóculo utilizado para os ensaios é oriundo de um reator UASB de escala laboratorial do Laboratório de Bio&Hidrometalurgia do Departamento de Metalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), com trabalhos cadastrados no SISGEN com o código A7BD947. Os microrganismos foram adaptados e enriquecidos em BRS utilizando o meio de cultura Postgat C modificado (Bertolino *et al.*, 2012). Para a operação, os reatores foram preenchidos com 50 g de carvão de ossos bovinos – utilizado como leito que pode auxiliar no crescimento de biofilme (Rodrigues, 2021) –, 75 mL de meio de cultura na câmara catódica e, na câmara anódica, 55 mL de meio de cultura e 20 mL de inóculo. Ainda antes da inoculação, foi determinado o pH do meio de cultura (6,79), utilizando pHmetro de bancada, seu potencial redox (Eh, com valor de -9 mV), utilizando medidor digital, e sua condutividade (8,04 mS/cm), utilizando um condutímetro de bancada. A Tabela 5 descreve o meio de cultura utilizado na pesquisa.

**Tabela 5. Meio de cultura para as culturas BRS utilizadas nas células de energia microbianas.**

<b>Componente</b>	<b>Concentração (g/L)</b>
Lactose	6
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,96
NaHCO <sub>3</sub>	1
NH <sub>4</sub> CL	1
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,06
FeSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	0,1

**Tabela 5. Meio de cultura para as culturas BRS utilizadas nas células de energia microbianas.**

(Continuação)

<b>Componente</b>	<b>Concentração (g/L)</b>
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0,5
Extrato de Levedura	0,4

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

As CEM foram operadas em batelada, em duplicata – com o experimento em dois dispositivos ocorrendo simultaneamente –, em período de 30 dias, um intervalo indicado em ensaios de Rodrigues (2021) para que ocorra a estabilização de potencial elétrico (DDP) gerado. A DDP foi medida diariamente, durante 5 minutos, utilizando um multímetro digital. A potência (Watts) gerada nas CEM foi calculada utilizando os potenciais medidos diariamente e a Lei de Ohm, com a relação  $P = E^2/R$ , em que P é potência (W), E é o potencial elétrico (V) gerado na CEM e R é a resistência externa ( $\Omega$ ) aplicada. A densidade de potência gerada foi calculada pela normalização do potencial elétrico para a área externa do eletrodo ( $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ). Por fim, os valores de geração de eletricidade nas CEM foram utilizados para comparar dados laboratoriais com aqueles indicados pelas simulações computacionais e pelo planejamento experimental a fim de analisar se os modelos gerados se adequam a sistemas reais.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6 exibe os resultados das simulações computacionais obtidas para as saídas de densidade de corrente e densidade de potência considerando os fatores de entrada área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo aplicados ao planejamento DCCR realizado nas planilhas eletrônicas.

**Tabela 6. Matriz de níveis e resultados do conjunto de simulações computacionais para as saídas de densidade de potência e tensão elétrica aplicados ao planejamento experimental do tipo DCCR.**

Ensaio	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Densidade de Corrente (mA <sup>m</sup> - <sup>2</sup> )	Densidade de Potência (mW <sup>m</sup> - <sup>2</sup> )
1	-1	-1	-1	545,11	343,93
2	1	-1	-1	20000	1805
3	-1	1	-1	545,11	1271,7
4	1	1	-1	26466	1805
5	-1	-1	1	43,35	343,93
6	1	-1	1	20000	1805
7	-1	1	1	542,94	1271,5
8	1	1	1	20000	1805
9	-1,682	0	0	537,62	1268,8
10	1,682	0	0	4509,5	2150
11	0	-1,682	0	537,62	881,04
12	0	1,682	0	537,62	2772
13	0	0	-1,682	4254	1267,2
14	0	0	1,682	534,42	1267,2
15	0	0	0	4509,5	1740,5
16	0	0	0	4509	1740,4
17	0	0	0	4510	1740,6

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

\*X<sub>1</sub>: volume do dispositivo, com 0 L no nível - $\alpha$  (-1,682), 0,7 L no nível baixo (-1), 1,7 L no nível (0), 2,7 L no nível alto (+1) e 3,4 L no nível + $\alpha$  (+1,682); X<sub>2</sub>: área do anodo, com 0 cm<sup>2</sup> no nível - $\alpha$  (-1,682), 13 cm<sup>2</sup> no nível baixo (-1), 32 cm<sup>2</sup> no nível (0), 51 cm<sup>2</sup> no nível alto (+1) e 64 cm<sup>2</sup> no nível + $\alpha$  (+1,682); X<sub>3</sub>: resistência elétrica externa, com 0  $\Omega$  no nível - $\alpha$  (-1,682), 200  $\Omega$  no nível baixo (-1), 500  $\Omega$  no nível (0), 800  $\Omega$  no nível alto (+1) e 1000  $\Omega$  no nível + $\alpha$  (+1,682).

A Tabela 7 apresenta os valores de coeficiente, erro, teste t e p-valor, calculados a partir das planilhas eletrônicas, para cada uma das variáveis estudadas no planejamento DCCR.

**Tabela 7. Valores de coeficiente, erro, teste t e p-valor para as variáveis do planejamento DCCR.**

Fator	Densidade de Corrente				Densidade de Potência			
	Coeficiente	Erro	t(2)	P-valor	Coeficiente	Erro	t(2)	P-valor
Média	3908,52	±0,29	13562,23	5E-09	1758,87	±0,06	30523,8	1E-09
X <sub>1</sub>	6697,07	±0,14	49487,63	4E-10	400,57	±0,03	14803,9	5E-09
X <sub>2</sub>	509,99	±0,14	3768,57	7E-08	368,70	±0,03	13626,2	5E-09
X <sub>3</sub>	-968,37	±0,14	7155,71	2E-08	-0,02	±0,03	0,73	0,541
X <sub>11</sub>	1375,22	±0,15	9233,85	1E-08	-74,50	±0,03	2501,75	2E-07
X <sub>22</sub>	673,25	±0,15	4520,52	5E-08	-33,11	±0,03	1111,91	8E-07
X <sub>33</sub>	1329,48	±0,15	8926,77	1E-08	-230,80	±0,03	7750,54	2E-08
X <sub>12</sub>	745,81	±0,18	4217,79	6E-08	-231,92	±0,04	6559,65	2E-08
X <sub>13</sub>	-745,26	±0,18	4214,72	6E-08	0,03	±0,04	0,95	0,441
X <sub>23</sub>	-745,81	±0,18	4217,79	6E-08	-0,03	±0,04	0,95	0,441

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

\*X<sub>1</sub>: volume do dispositivo; X<sub>2</sub>: área do anodo; X<sub>3</sub>: resistência elétrica externa; X<sub>11</sub>: quadrado do fator volume; X<sub>22</sub>: quadrado do fator área do anodo; X<sub>33</sub>: quadrado do fator resistência elétrica externa; X<sub>12</sub>: interação entre os fatores volume do dispositivo e área do anodo; X<sub>13</sub>: interação entre os fatores volume do dispositivo e resistência elétrica externa; X<sub>23</sub>: interação entre os fatores área do anodo e resistência elétrica externa.

Nesse tipo de estudo, se uma variável apresenta efeito positivo, sua influência nas variáveis de saídas é maior em suas condições de nível mais alto, ou seja, quando uma variável apresenta coeficiente positivo, quanto maior for sua magnitude, mais ela impactará positivamente nas variáveis de saída. Por outro lado, se seu efeito for negativo (com coeficientes abaixo de zero), quando sua magnitude for maior, ela impactará mais negativamente nas variáveis de saída (Wang *et al.*, 2005). Assim, a partir dos dados da Tabela 7 referentes à densidade de corrente, verifica-se que condições de trabalho em que as variáveis de entrada X<sub>1</sub> e X<sub>2</sub> (volume do dispositivo e área do anodo) estão em seus níveis mais altos influenciaram positivamente a produção dessa saída. Por outro lado, ainda de acordo com os dados da Tabela 7, condições de trabalho em que a variável resistência elétrica externa está em seu nível mais alto impactaram de forma negativa na densidade de corrente.

O resultado de efeito para a área do anodo está de acordo com estudos prévios, nos quais já se observou que a geração de corrente elétrica nas CEM aumenta com o emprego de anodos com maiores áreas superficiais (Di Lorenzo *et al.*, 2010). No caso do efeito do volume do dispositivo, há estudos em consonância com o apontado, ou seja, em que os melhores resultados de geração de energia elétrica se deram com a utilização de maiores volumes do dispositivo, como no caso do estudo de Xiao e colaboradores (2014), em que os autores afirmaram que a recuperação de energia geral não diminui com o aumento do tamanho da CEM sob certas condições. Contudo, é preciso também analisar que, em geral, se o volume da

CEM for aumentado e as áreas dos anodos e catodos não forem suficientemente aumentadas, o desempenho do dispositivo pode ser prejudicado (Logan *et al.*, 2015). Assim, pode se considerar que o apontamento a respeito da relação entre o volume do dispositivo e a geração de densidade de corrente obtido é válido nos casos em que as limitações discutidas possam ser superadas, pois, nessas situações, o aumento de escala das CEM pode, de fato, melhorar a performance da tecnologia (Liu *et al.*, 2008) – e, para casos mais gerais, análises mais detalhadas podem ser realizadas.

Já para a relação entre resistência elétrica externa e densidade de corrente gerada na CEM apontada nos dados da Tabela 7, observa-se que esse é um resultado que se adequa às informações disponíveis na literatura a respeito dessa temática como no estudo de Aelterman e colaboradores (2008), em que a redução da resistência externa levou ao aumento na geração de corrente na CEM, o que pode ser explicado pela maior transferência de elétrons para o catodo nesses casos, possibilitando reações catódicas mais rápidas e altas atividades eletrogênicas (Rismani-Yazdi *et al.*, 2011).

No caso dos dados da Tabela 7 referentes à densidade de potência, verifica-se que condições de trabalho em variáveis de entrada  $X_1$  e  $X_2$  – volume do dispositivo e área do anodo – estão em seus níveis mais altos influenciaram positivamente a produção dessa saída. A relação entre a geração de densidade de potência elétrica e o volume do dispositivo obtida pode ser analisada de modo análogo à discussão a respeito da relação entre a geração de densidade de potência corrente e o volume do dispositivo realizada anteriormente nessa seção. Assim, reitera-se que esse resultado está em conformidade com estudos em que melhores performances de geração de energia elétrica se deram com a utilização de maiores volumes do dispositivo (Xiao *et al.*, 2014). Contudo, deve-se considerar que essa relação é válida nos casos em que as limitações de ampliação de escala possam ser superadas, e que, para casos mais gerais, investigações mais detalhadas podem ser realizadas.

O resultado de efeito para relação entre a área do anodo e a geração de densidade de potência está de acordo com pesquisas prévias, nos quais já se notou que a geração de potência nas CEM aumenta com a utilização de anodos de maiores áreas (Chaudhuri; Lovley, 2003). Para a relação entre resistência elétrica externa e densidade de potência gerada na CEM obtida, uma consideração também deve ser feita, já que de fato se observa aumento da potência gerada na CEM quando a resistência externa é diminuída até determinado valor. Contudo, quando a resistência externa continua a diminuir para aquém do valor da resistência elétrica interna, a potência tende a diminuir (González del Campo, 2014; Zhang *et al.*, 2011).



Assim, o resultado obtido pode ser considerado válido para os casos em que a resistência elétrica externa não seja diminuída para aquém da resistência elétrica interna do sistema.

Em estudos de planejamento experimental, uma forma de analisar se uma variável é estatisticamente significativa é por comparar o valor  $p$  do teste estatístico amostral com o nível de significância  $\alpha$  adotado, de modo que, se para uma variável  $p \leq \alpha$ , ela é significativa (Silveira; Lopes; Rosa, 2017). Assim, analisando as informações apresentadas na Tabela 7 para a densidade de corrente sob um nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ), percebe-se que todas as variáveis de entrada – área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo – bem como seus quadrados e interações –, foram estatisticamente significativas, já que todos esses fatores apresentaram  $p$ -valor  $< \alpha$ .

Para a densidade de potência sob um nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ), área do anodo e volume do dispositivo – bem como seus quadrados e interações –, foram estatisticamente significativas, pois apresentaram  $p$ -valor  $< \alpha$ . Já para o caso da resistência elétrica – bem como suas interações, exceto por seu quadrado –, houve apresentação de  $p$ -valor  $> \alpha$ , indicando não significância estatística para essa variável. Analisando informações teóricas a respeito da relação entre densidade de potência gerada na CEM e a resistência elétrica aplicada, observa-se que essa constatação pode não estar ligada ao fato de a resistência elétrica não influenciar de fato na variável de saída em questão, e sim à circunstância de não haver uma relação matemática direta entre essas variáveis. Ou seja, o fato de a potência máxima de uma CEM ser obtida apenas quando a resistência externa da fonte de energia elétrica é igual à resistência interna do dispositivo pode ter influenciado na não indicação de uma significância fixa para os valores de resistência elétrica empregados, pois se a resistência externa for tanto maior quanto menor que a resistência interna do sistema, a potência gerada diminuirá (González del Campo, 2014).

Apesar do apontamento de não significância estatística da resistência elétrica externa em relação à potência gerada na CEM, a partir de conhecimentos do programador e da literatura, que indicam e confirmam sua influência, essa variável foi considerada na obtenção de modelos. Assim, a partir dos coeficientes calculados nas tabelas eletrônicas, foi possível obter equações-modelo quadráticas que demonstram a relação entre cada uma das variáveis de entrada e as saídas estudadas, como é apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8. Equações-modelo quadráticas para as variáveis estudadas no planejamento experimental do tipo DCCR.**

	<b>Equação Quadrática</b>
<b>Densidade de Corrente</b>	$y_1 = 3908,52 + 66970,7x_1 + 509,99x_2 - 968,37x_3 + 1375,22x_{11} + 673,25x_{22} + 1329,48x_{33} + 745,81x_{12} - 745,26x_{13} - 745,81x_{23}$
<b>Densidade de Potência</b>	$y_2 = 1758,87 + 400,57x_1 + 368,70x_2 - 0,02x_3 - 74,5x_{11} - 33,11x_{22} - 230,80x_{33} - 231,92x_{12} + 0,03x_{13} - 0,03x_{23}$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

\* $x_1$ : volume do dispositivo;  $x_2$ : área do anodo;  $x_3$ : resistência elétrica externa;  $x_{11}$ : quadrado do fator volume;  $x_{22}$ : quadrado do fator área do anodo;  $x_{33}$ : quadrado do fator resistência elétrica externa;  $x_{12}$ : interação entre os fatores volume do dispositivo e área do anodo;  $x_{13}$ : interação entre os fatores volume do dispositivo e resistência elétrica externa;  $x_{23}$ : interação entre os fatores área do anodo e resistência elétrica externa;  $y_1$ : densidade de corrente;  $y_2$ : densidade de potência.

Levando em consideração que as células de energia microbiana são sistemas complexos que compreende balanços de massa e energia, além de processos biológicos, elétricos e químicos, e que é necessário compreender e prever o comportamento dinâmico desses sistemas (Yao *et al.*, 2016), percebe-se que o desenvolvimento de modelos matemáticos é relevante nesse campo de estudo, já que essas ferramentas permitem a simplificação da representação de sistemas e de seus mecanismos, bem com sua melhor compreensão (He; Ma, 2016), além de identificar fatores governantes no sistema, o que pode favorecer estudos de aumento de escala (JADHAV *et al.*, 2021).

Os dados que compõem a análise de variância (ANOVA) para o estudo de cada uma das variáveis de saída, utilizada para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos obtidos, estão apresentados nas Tabela 9 e 10.

**Tabela 9. Dados da análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental do tipo DCCR da variável de saída densidade de corrente.**

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>nGL</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Regressão</b>	7E+08	9	7E+07	0,90	0,59
<b>Resíduos</b>	6E+08	7	8E+07		
<b>Falta de Ajuste</b>	6E+08	5	1E+08	5E+08	2E-09
<b>Erro Puro</b>	0,5003	2	0,2501		
<b>Total</b>	1E+09	16			
<b>R<sup>2</sup></b>			0,54		
Porcentagem Máxima de Variação Explicável			100,00		
			$F_{(9;7;0,05)} = 3,79$		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

\*FV: Fonte de Variação; SQ: Soma dos Quadrados; nGL: Número de Graus de Liberdade; MQ: Quadrados Médios.

**Tabela 10. Dados da análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental do tipo DCCR da variável de saída densidade de potência.**

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>nGL</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Regressão</b>	5E+06	9	566354	4,91	0,02
<b>Resíduos</b>	808178	7	115454		
<b>Falta de Ajuste</b>	808178	5	161636	2E+07	6,2E-08
<b>Erro Puro</b>	0,02	2	0,01		
<b>Total</b>	6E+06	16			
<b>R<sup>2</sup></b>				0,86	
Porcentagem Máxima de Variação Explicável				100,00	
				$F_{(9;7;0,05)} = 3,79$	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

\*FV: Fonte de Variação; SQ: Soma dos Quadrados; nGL: Número de Graus de Liberdade; MQ: Quadrados Médios.

Considerando que quanto mais próximo o valor de  $R^2$  estiver de 1, melhor será o ajuste do modelo aos dados experimentais, já que menor será a distância entre os valores previstos e reais (Wang *et al.*, 2005), e observando os valores de  $R^2$  obtidos nos cálculos das planilhas eletrônicas verifica-se um indicativo que os modelos gerados estão apresentando promissores resultados, necessitando ainda de novos ajustes. Essa observação é reforçada pelo quando se nota que as faixas de trabalho das variáveis de trabalho são bastante amplas, o que seria difícil replicar em condições práticas, uma vez que lidar com faixas de operação tão extensas complexifica as condições de trabalho e dificulta o alcance de ajustes muito bem definidos. Ademais, é relevante lembrar que os modelos ainda serão melhor ajustados nas etapas posteriores da pesquisa, de modo que poderão alcançar resultados ainda mais favoráveis.

Observando as faltas de ajustes apresentadas nos modelos, percebe-se que para ambos houve significância estatística. Porém, quando modelos matemáticos teóricos são gerados, outra análise pertinente em relação às suas significâncias é a seguinte: para que um modelo seja considerável estatisticamente significativo, deve apresentar valor de F calculado ( $F_{calc}$ ) superior ao valor de F tabelado ( $F_{tab}$ ) (Simon, Cabral e Sousa, 2012). Segundo essa análise, para a variável de saída densidade de potência, obteve-se um valor de  $F_{calc}$  igual a 4,91, enquanto o valor de  $F_{tab}$  foi de 3,79, ou seja, o valor de  $F_{calc}$  é 1,3 vezes maior que o  $F_{tab}$ , indicando que o modelo para esta variável de saída é significativo. Já para a variável de saída densidade de corrente, o valor de  $F_{calc}$  foi menor que o  $F_{tab}$  e, portanto, seu modelo não foi significativo.

A não significância estatística apontada para o modelo gerado para a corrente elétrica pode estar ligada ao fato de a medida de corrente nas CEM ser complexa e bastante suscetível a erros, já que esses dispositivos, sobretudo em escalas laboratoriais, geram baixa corrente elétrica, o que torna dificultoso a seleção e o emprego do método de avaliação e medida dessa grandeza. Além disso, a fuga de corrente elétrica nestes dispositivos é considerável e, conseqüentemente, a precisão das medições – de tensão e corrente elétricas – não é tão alta, acarretando dificuldade na geração e ajuste de modelos teóricos nessa área de estudo (Tavakolian *et al.*, 2020). Assim, considerando que o modelo gerado para a corrente elétrica não foi significativo do ponto de vista estatístico, as comparações de dados simulados e reais foram realizadas apenas para o modelo referente à densidade de potência.

A Tabela 11 apresenta os valores de resposta de densidade de potência geradas nas simulações computacionais para os conjuntos de dados referentes aos dados codificados no DCCR em comparação com as respostas estimadas pelo modelo obtido no planejamento experimental. A Figura 9 representa graficamente essa comparação.

**Tabela 11. Comparação entre os resultados do conjunto de simulações computacionais para a densidade de potência e os dados obtidos pelo planejamento experimental do tipo DCCR.**

Ensaio	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Densidade de Potência gerada por lógica fuzzy (mWm <sup>-2</sup> )	Densidade de Potência obtida pelo modelo obtido (mWm <sup>-2</sup> )
1	-1	-1	-1	343,93	419,291
2	1	-1	-1	1805	1684,2
3	-1	1	-1	1271,7	1620,61
4	1	1	-1	1805	1957,84
5	-1	-1	1	343,93	419,252
6	1	-1	1	1805	1684,3
7	-1	1	1	1271,5	1620,43
8	1	1	1	1805	1957,8
9	-1,682	0	0	1268,8	874,349
10	1,682	0	0	2150	2221,87
11	0	-1,682	0	881,04	1045,04
12	0	1,682	0	2772	2285,36
13	0	0	-1,682	1267,2	1105,95
14	0	0	1,682	1267,2	1105,88
15	0	0	0	1740,5	1758,87
16	0	0	0	1740,4	1758,87
17	0	0	0	1740,6	1758,87

**Tabela 11. Comparação entre os resultados do conjunto de simulações computacionais para a densidade de potência e os dados obtidos pelo planejamento experimental do tipo DCCR.**

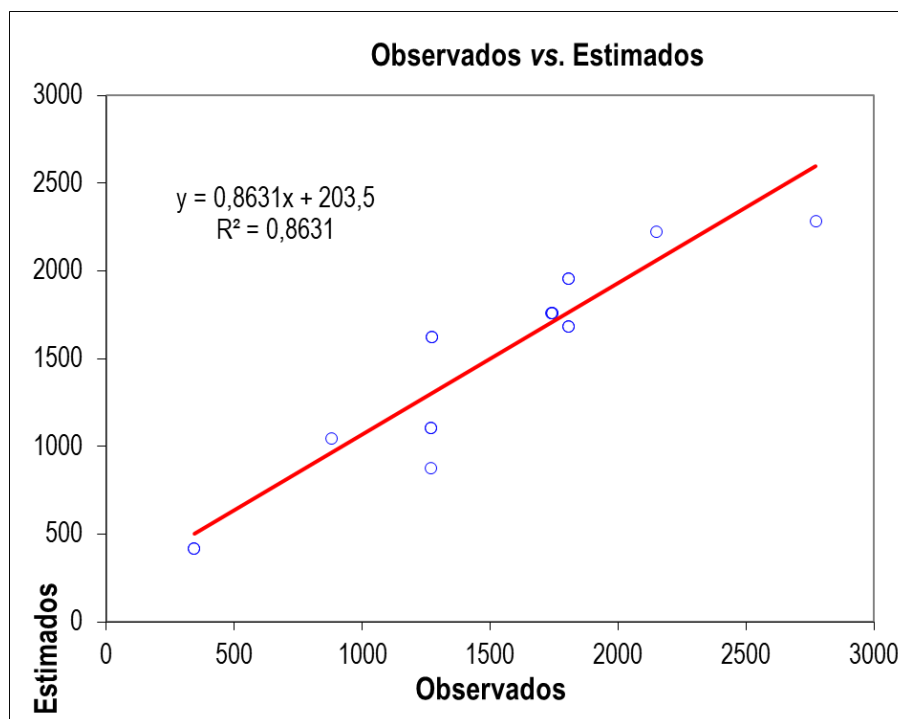
(Continuação)

Ensaio	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Densidade de Potência gerada por lógica fuzzy (mWm <sup>-2</sup> )	Densidade de Potência obtida pelo modelo obtido (mWm <sup>-2</sup> )
16	0	0	0	1740,4	1758,87
17	0	0	0	1740,6	1758,87

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

\*X<sub>1</sub>: volume do dispositivo, com 0 L no nível -α (-1,682), 0,7 L no nível baixo (-1), 1,7 L no nível (0), 2,7 L no nível alto (+1) e 3,4 L no nível +α (+1,682); X<sub>2</sub>: área do anodo, com 0 cm<sup>2</sup> no nível -α (-1,682), 13 cm<sup>2</sup> no nível baixo (-1), 32 cm<sup>2</sup> no nível (0), 51 cm<sup>2</sup> no nível alto (+1) e 64 cm<sup>2</sup> no nível +α (+1,682); X<sub>3</sub>: resistência elétrica externa, com 0 Ω no nível -α (-1,682), 200 Ω no nível baixo (-1), 500 Ω no nível (0), 800 Ω no nível alto (+1) e 1000 Ω no nível +α (+1,682).

**Figura 9. Representação gráfica da comparação entre os resultados do conjunto de simulações computacionais para a densidade de potência e os dados obtidos pelo planejamento experimental do tipo DCCR.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

A análise da Tabela 11 e da Figura 9 indica que os dados obtidos pelo modelo gerado pelo planejamento experimental estão bastante próximos daqueles obtidos por meio das simulações computacionais de lógica fuzzy. Essa análise reforça o bom ajuste do modelo

gerado, especialmente quando se considera, como já discutido, as largas faixas de trabalho das variáveis em exame e o fato de o sistema das CEM ser complexo e multivariável.

Para uma melhor investigação dos resultados obtidos no projeto, além de comparar os dados obtidos nas simulações computacionais e no planejamento experimental, julgou-se pertinente comparar os dados gerados pelo modelo matemático e os obtidos nos ensaios laboratoriais, a fim de observar o nível de adequação desses a sistemas reais. A Tabela 12 apresenta os valores de DDP medidos diariamente, utilizando um multímetro digital, para as duas CEM em operação nos 30 dias de condução do ensaio e suas médias, que foram utilizados para calcular os potenciais elétricos médios e as densidades de potência médias resultantes dos testes laboratoriais. A Figura 10 apresenta graficamente os dados de densidade de potência média gerada em função dos dias de condução do experimento.

**Tabela 12. Valores de DDP medidos diariamente para as CEM 1 e 2, suas médias e potenciais elétricos e densidades de potência médios obtidos nos ensaios laboratoriais.**

<b>Dia</b>	<b>DDP da CEM 1 (mV)</b>	<b>DDP da CEM 2 (mV)</b>	<b>DDP média das CEM 1 e 2 (mV)</b>	<b>Potencial Elétrico Médio (mV)</b>	<b>Densidade de Potência Média (mV/m<sup>2</sup>)</b>
1	-3,2	-2,3	-2,75	0,01	5,82
2	-5,8	-2,5	-4,15	0,02	13,25
3	-9,4	2,5	-3,45	0,01	9,16
4	-0,1	-1,9	-1	0,00	0,77
5	4,4	12	8,2	0,07	51,72
6	6,3	7	6,65	0,04	34,02
7	14,6	3,6	9,1	0,08	63,70
8	9,1	0,5	4,8	0,02	17,72
9	30,1	7,8	18,95	0,36	276,23
10	14,3	19	16,65	0,28	213,25
11	22,6	9	15,8	0,25	192,03
12	12,4	16,9	14,65	0,21	165,09
13	20,3	6,6	13,45	0,18	139,16
14	6,8	14,5	10,65	0,11	87,25
15	11,1	6,2	8,65	0,07	57,56
16	5,8	8,3	7,05	0,05	38,23
17	14,2	3,2	8,7	0,08	58,22
18	14,9	4,4	9,65	0,09	71,63
19	15,5	5,6	10,55	0,11	85,62
20	11,6	8	9,8	0,10	73,88
21	30	7,5	18,75	0,35	270,43
22	32,7	9,1	20,9	0,44	336,01
23	18,1	1	9,55	0,09	70,16
24	31	3,4	17,2	0,30	227,57
25	46	5,7	25,85	0,67	514,02
26	59	7,9	33,45	1,12	860,69

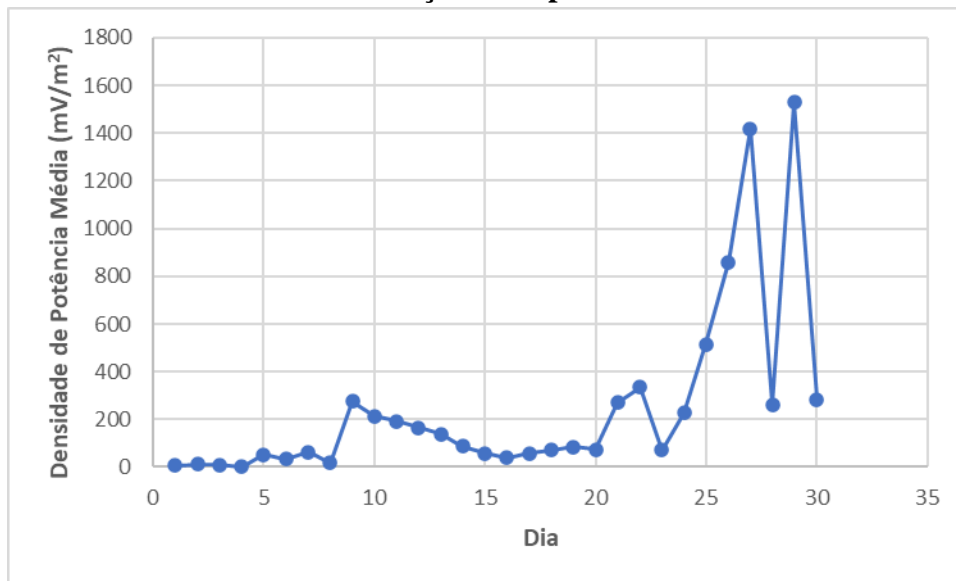
**Tabela 12. Valores de DDP medidos diariamente para as CEM 1 e 2, suas médias e potenciais elétricos e densidades de potência médios obtidos nos ensaios laboratoriais.**

(Continuação)

Dia	DDP da CEM 1 (mV)	DDP da CEM 2 (mV)	DDP média das CEM 1 e 2 (mV)	Potencial Elétrico Médio (mV)	Densidade de Potência Média (mV/m <sup>2</sup> )
27	75,5	10,4	42,95	1,84	1419,00
28	32,2	4,8	18,5	0,34	263,27
29	79	10,2	44,6	1,99	1530,12
30	32,5	5,9	19,2	0,37	283,57

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

**Figura 10. Medidas de densidade de potência média gerada em função dos dias de condução do experimento.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

Como os dados de densidade de potência coletados no levantamento bibliográfico correspondem aos máximos dessas saídas apresentados nas publicações analisadas, serão analisadas e comparadas as maiores densidades de potência média obtidas nos ensaios laboratoriais. O valor de densidade de potência obtido por meio do modelo matemático para os dados de entrada utilizados nos testes laboratoriais – volume do reator de 0,15 L, área de eletrodo de  $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  (13 cm<sup>2</sup>) e resistência elétrica de 1000  $\Omega$  – foi de 802,53 mV/m<sup>2</sup>. A Tabela 13 apresenta as cinco maiores densidades de potência médias obtidas nos testes práticos.

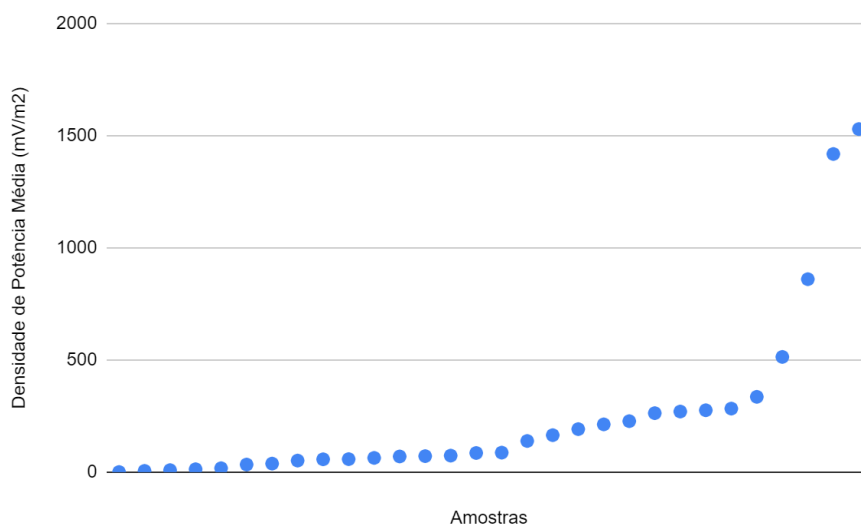
**Tabela 13. Cinco maiores valores de densidades de potência médias obtidas nos testes práticos.**

Posição	Densidade de Potência Média
1°	1530,123
2°	1419,002
3°	860,6942
4°	514,0173
5°	336,0077

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

Comparando o valor de densidade de potência gerado pelo modelo matemático e os maiores valores de densidade de potência média obtidos no teste laboratorial, é possível perceber que a previsão do modelo não apresenta grande ajuste quando comparado às duas maiores densidades de potência observadas em laboratório. Contudo, há de se observar que essas medidas de densidade de potência advêm de valores não tão próximos dos demais, o que pode ser observado na Figura 10, que apresenta a dispersão das densidades de potência médias obtidas nos testes laboratoriais.

**Figura 10. Representação gráfica da dispersão das densidades de potência médias obtidas nos testes laboratoriais.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

Analisando a dispersão dos dados em questão, é possível perceber que os dois maiores valores de densidade de potência média se distanciam bastante dos demais, o que pode indicar inconsistência acerca desses. Esse fato pode se relacionar a erros de medição, humanos ou de



execução, à variabilidade inerente dos elementos da população, a descalibrações dos aparelhos de medida – especialmente ao considerar que, nos testes em questão, foram utilizados medidores bastante simples – ou à – anteriormente já discutida – sensibilidade na corrente e densidade elétricas das CEM que dificulta a precisão dessas medições e a adequação dos modelos teóricos aos sistemas reais (Figueira, 1998; Tavakolian *et al.*, 2020). Por outro lado, a terceira maior densidade de potência média obtida (860,69 mV/m<sup>2</sup>), apesar de ainda ser maior que os demais dados – o que é de se esperar, já que é a tomada de uma medida máxima –, não apresenta um afastamento inconsistente dos demais valores obtidos. Assim, se esse ponto for admitido como o dado de comparação, pode se perceber um ajuste bastante relevante de seu valor em comparação com a predição do modelo matemático desenvolvido (802,53 mV/m<sup>2</sup>).

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho aplicou a lógica *fuzzy* para simular a performance de células de energia microbiana e empregou a técnica de planejamento experimental para avaliar estatisticamente o modo como tais parâmetros influenciam o desempenho desses dispositivos. Por meio da etapa inicial do estudo, notou-se que, para ambas as saídas estudadas – densidades de corrente e potência –, que volume do dispositivo e área do anodo apresentaram efeito positivo, ao passo que a variável resistência elétrica externa exibiu efeito negativo. Quanto à significância das variáveis de entrada para a densidade de corrente, todas as variáveis de entrada – área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo – bem como seus quadrados e interações –, foram estatisticamente significativas. Já para o caso da densidade de potência, apenas área do anodo e volume do dispositivo – bem como seus quadrados e interações – foram estatisticamente significativas, enquanto a resistência elétrica – bem como suas interações, exceto por seu quadrado – não apresentaram significância estatística. Vale destacar, ainda, que os resultados de previsão por meio do modelo matemático para as condições de operação testadas experimentalmente se mostraram bastante próximas ao considerar ( $802,53 \text{ mV/m}^2$ ) ou não ( $802,51 \text{ mV/m}^2$ ) as variáveis indicadas como não significativas. A partir desse desenvolvimento, foi possível obter modelos matemáticos que indicaram a relação entre cada uma das variáveis de entrada e as saídas estudadas, o que é de grande relevância do ponto de vista de simplificação e melhor compreensão do complexo sistema das CEM.

Ainda analisando estatisticamente os modelos gerados, percebeu-se que, para a densidade de corrente, o modelo obtido não foi significativo – o que pode estar relacionado ao fato de a medida de corrente nas CEM ser complexa e bastante suscetível a erros. No caso da densidade de potência, o modelo foi significativo, o que foi reforçado pela proximidade entre os dados de simulação e os dados preditos pelo modelo, o que é de grande relevância quando se considera as largas faixas de trabalho das variáveis em estudo. Por fim, analisando a maior densidade de potência média obtida nos experimentos laboratoriais que não apresentou afastamento inconsistente dos demais valores gerados, percebeu-se bom ajuste em comparação com a predição do modelo matemático desenvolvido.

Os avanços alcançados por meio desse estudo são de grande valia para o estudo das células de energia microbiana, uma vez que são capazes de contribuir com a investigação da influência de algumas das mais importantes variáveis de operação das CEM e com o aprimoramento do sistema. Além disso, cumpriram todos os objetivos do projeto ao levantar

os principais parâmetros de operação das CEM relatados na literatura, empregar a lógica *fuzzy* para simular o desempenho desses sistemas, aplicar a técnica de planejamento experimental para avaliar estatisticamente os parâmetros de operação que influenciam mais significativamente o desempenho das CEM e analisar os resultados obtidos computacionalmente em comparação com ensaios laboratoriais. Destaca-se também o bom ajuste obtido para o modelo de densidade de potência, principalmente ao considerar a aplicação combinada de duas técnicas matemáticas, o que pode dificultar sua adequação aos sistemas reais.

Para estudos futuros, sugere-se identificar, analisar e gerar modelos matemáticos para outras variáveis de operação das CEM que influenciam seus desempenhos na geração de energia elétrica, uma vez que inúmeras variáveis estão envolvidas na produção de eletricidade nas células de energia microbiana. Para além, sugere-se, ainda, desenvolver estudos do mesmo gênero para identificar e analisar as principais variáveis operacionais das CEM que influenciam em sua performance para degradação de matéria orgânica e tratamento de efluentes.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AELTERMAN, P. *et al.* Microbial fuel cells for wastewater treatment. **Water Science and Technology**, v. 54, n. 8, p. 9-15, 2006. DOI: 10.2166/wst.2006.702. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/54/8/9/13169/Microbial-fuel-cells-for-wastewater-treatment>. Acesso em: 11 jan. 2024.

AELTERMAN, P. *et al.* Loading rate and external resistance control the electricity generation of microbial fuel cells with different three-dimensional anodes. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 18, p. 8895-8902, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.04.061. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852408003830>. Acesso em: 12 jan. 2024.

AFONSO, A. **Lógica fuzzy aplicada à modelagem da transferência de água em solos**. 2009. 95 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9849>. Acesso em 12 jan. 2024.

AHN, Y.; LOGAN, B. E. Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. **Bioresource technology**, v. 101, n. 2, p. 469-475, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.07.039. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852409009158>. Acesso em: 11 jan. 2024.

ALI, J. *et al.* Bioelectrochemical recovery of silver from wastewater with sustainable power generation and its reuse for biofouling mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 1425-1437, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.07.065. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619324047>. Acesso em: 11 jan. 2024.

ANGIONI, S. *et al.* Improving the performances of Nafion<sup>TM</sup>-based membranes for microbial fuel cells with silica-based, organically-functionalized mesostructured fillers. **Journal of Power Sources**, v. 334, p. 120-127, 2016. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.10.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775316313969>. Acesso em: 11 jan. 2024.

AYYUB, B. M. Systems framework for fuzzy sets in civil engineering. **Fuzzy sets and systems**, v. 40, n. 3, p. 491-508, 1991. DOI: 10.1016/0165-0114(91)90174-O. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016501149190174O>. Acesso em: 12 jan. 2024.

BAUDLER, A.; RIEDL, S.; SCHRÖDER, U. Long-term performance of primary and secondary electroactive biofilms using layered corrugated carbon electrodes. **Frontiers in Energy Research**, v. 2, p. 30, 2014. DOI: 10.3389/fenrg.2014.00030. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2014.00030/full>. Acesso em: 11 jan. 2024.

BAUDLER, A. *et al.* Does it have to be carbon? Metal anodes in microbial fuel cells and related bioelectrochemical systems. **Energy & Environmental Science**, v. 8, n. 7, p. 2048-2055, 2015. DOI: 10.1039/c5ee00866b. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/ee/c5ee00866b>. Acesso em: 11 jan. 2024.

BEHERA, M.; JANA, P. S.; GHANGREKAR, M. M. Performance evaluation of low cost microbial fuel cell fabricated using earthen pot with biotic and abiotic cathode. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 4, p. 1183-1189, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.07.089. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852409010153>. Acesso em: 11 jan. 2024.

BERTOLINO, S. M. *et al.* Implications of volatile fatty acid profile on the metabolic pathway during continuous sulfate reduction. **Journal of Environmental Management**, v. 103, p. 15-23, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.02.022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479712000916>. Acesso em: 16 já. 2024.

CARDOZO, M. H. A. L.; NUCCI, E. R. Células de energia microbiana: uma tecnologia para biotratamento de efluente aliado à biogeração de energia elétrica. In: PONTE, M. L.; WENCESLAU, E. C. **Sustentabilidade – Conceito Articulador de Saberes e Práticas**. 2022. cap. 21, p. 306-320. ISBN: 978-65-994536-4-9.

CATAL, T. *et al.* Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells. **Journal of Power Sources**, v. 175, n. 1, p. 196-200, 2008. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.09.083. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775307020277>. Acesso em: 10 jan. 2024.

IN-SEOP, C. *et al.* Electrochemically active bacteria (EAB) and mediator-less microbial fuel cells. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 16, n. 2, p. 163-177, 2006. Disponível em: <https://www.jmb.or.kr/journal/view.html?spage=163&volume=16&number=2>. Acesso em: 11 jan. 2024.

CHAUDHURI, S. K.; LOVLEY, D. R. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. **Nature Biotechnology**, v. 21, n. 10, p. 1229-1232, 2003. DOI: 10.1038/nbt867. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nbt867>. Acesso em: 11 jan. 2024.

CHENG, S.; LIU, H.; LOGAN, B. E. Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. **Environmental science & Technology**, v. 40, n. 7, p. 2426-2432, 2006. DOI: 10.1021/es051652w. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es051652w>. Acesso em: 11 jan. 2024.

DI LORENZO, M. *et al.* Effect of increasing anode surface area on the performance of a single chamber microbial fuel cell. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 40-48, 2010. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.031. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894709006743>. Acesso em: 12 jan. 2024.

DO, M. H. *et al.* Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: a mini review. **Science of the Total Environment**, v. 639, p. 910-920, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.136. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718317777>. Acesso em: 11 jan. 2024.

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. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.05.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975007000547>. Acesso em: 11 jan. 2024.

FAN, Y.; HU, H.; LIU, H. Enhanced Coulombic Efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration. **Journal of Power Sources**, v. 171, n. 2, p. 348-354, 2007. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.06.220. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775307013419>. Acesso em: 11 jan. 2024.

FAN, Y.; HAN, S.; LIU, H. Improved performance of CEA microbial fuel cells with increased reactor size. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 8, p. 8273-8280, 2012. DOI: 10.1039/C2EE21964F. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/ee/c2ee21964f/>. Acesso em: 12 jan. 2024.

FENG, Y. *et al.* Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 78, p. 873-880, 2008. DOI: 10.1007/s00253-008-1360-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-008-1360-2>. Acesso em: 10 jan. 2024.

FIGUEIRA, Maria Manuela Caria. Identificação de outliers. **Millenium**, 1998. Disponível em: <https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/820/1/Identifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20Outliers.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FORESTI, E. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. **Water Science and Technology**, v. 45, n. 10, p. 181-186, 2002. DOI: 10.2166/wst.2002.0324. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/45/10/181/5996/Anaerobic-treatment-of-domestic-sewage-established>. Acesso em: 11 jan. 2024.

FU, L.; FU, X.; MARRANI, H. I. Robust adaptive fuzzy control for single-chamber single-population microbial fuel cell. **Systems Science & Control Engineering**, v. 9, n. 1, p. 98-108, 2021. DOI: 10.1080/21642583.2020.1870580. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21642583.2020.1870580>. Acesso em: 15 jan. 2024.

FUNG, A. **Otimização da geração de energia em célula a combustível microbiana com Escherichia coli utilizando eletrodo modificado por eletrodeposição de polipirrol**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2914>. Acesso em: 10 jan. 2024.

GADKARI, S.; GU, S.; SADHUKHAN, J. Towards automated design of bioelectrochemical systems: A comprehensive review of mathematical models. **Chemical Engineering Journal**, v. 343, p. 303-316, 2018. DOI: 10.1016/j.cej.2018.03.005. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894718303462>. Acesso em: 12 jan. 2024.

GADKARI, S. *et al.* Influence of temperature and other system parameters on microbial fuel cell performance: Numerical and experimental investigation. **Chemical Engineering Journal**, v. 388, p. 124176, 2020. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124176. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894720301674>. Acesso em: 12 jan. 2024.

GAJDA, I.; GREENMAN, J.; IEROPOULOS, I. A. Recent advancements in real-world microbial fuel cell applications. **Current opinion in electrochemistry**, v. 11, p. 78-83, 2018. DOI: 0.1016/j.coelec.2018.09.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451910318301820>. Acesso em: 11 jan. 2024.

GALVÃO, M. C. B. Levantamento bibliográfico e pesquisa científica. **Fundamentos de Epidemiologia**. 2011. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002499360>. Acesso em: 05 jan. 2024

GHANGREKAR, M. M.; SHINDE, V. B. Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production. **Bioresour. Technol.**, v. 98, n. 15, p. 2879-2885, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.09.050. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852406005153>. Acesso em: 12 jan. 2024.

GHASEMI, M. *et al.* Effect of pre-treatment and biofouling of proton exchange membrane on microbial fuel cell performance. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 13, p. 5480-5484, 2013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.148. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991202215X>. Acesso em: 11 jan. 2024.

GONZÁLEZ DEL CAMPO, A. *et al.* Effects of external resistance on microbial fuel cell's performance. **Environment, Energy and Climate Change II: Energies from New Resources and the Climate Change**, p. 175-197, 2014. DOI: 10.1007/698\_2014\_290. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/698\\_2014\\_290](https://link.springer.com/chapter/10.1007/698_2014_290). Acesso em: 12 jan. 2024.

GREENMAN, J. *et al.* Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: comparison with a biological aerated filter. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 44, n. 2, p. 112-119, 2009. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2008.09.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141022908002639>. Acesso em: 10 jan. 2024.

GUDE, V. G. Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 45, p. 52-68, 2015. DOI: [doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.055](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.055). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115000659>. Acesso em: 09 jan. 2023.

HE, Y.-J.; MA, Z.-F. A Data-Driven Gaussian Process Regression Model for Two-Chamber Microbial Fuel Cells. **Fuel Cells**, v. 16, n. 3, p. 365-376, 2016. DOI: 10.1002/fuce.201500109. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fuce.201500109>. Acesso em: 15 jan. 2024.

HERNANDEZ, M. E.; NEWMAN, D. K. Extracellular electron transfer. **Cellular and Molecular Life Sciences CMLS**, v. 58, p. 1562-1571, 2001. DOI: /10.1007/PL00000796. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/pl00000796>. Acesso em: 11 jan. 2024.

HIDALGO, D. *et al.* Streamlining of commercial Berl saddles: a new material to improve the performance of microbial fuel cells. **Energy**, v. 71, p. 615-623, 2014. DOI 10.1016/j.energy.2014.05.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214005611>. Acesso em: 19 dez. 2023.

HOLMES, D. E. *et al.* Potential role of a novel psychrotolerant member of the family *Geobacteraceae*, *Geopsychrobacter electrophilus* gen. nov., sp. nov., in electricity production by a marine sediment fuel cell. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 10, p. 6023-6030, 2004. DOI: 10.1128/AEM.70.10.6023-6030.2004. Disponível em: <https://journals.asm.org/doi/full/10.1128/aem.70.10.6023-6030.2004>. Acesso em: 11 jan. 2024.

HUANG, L.; ANGELIDAKI, I. Effect of humic acids on electricity generation integrated with xylose degradation in microbial fuel cells. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 100, n. 3, p. 413-422, 2008. DOI: 10.1002/bit.21786. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bit.21786>. Acesso em: 10 jan. 2024.

IEROPOULOS, I.; GREENMAN, J.; MELHUISH, C. Microbial fuel cells based on carbon veil electrodes: stack configuration and scalability. **International Journal of Energy Research**, v. 32, n. 13, p. 1228-1240, 2008. DOI: 10.1002/er.1419. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.1419>. Acesso em: 12 jan. 2024.

JADHAV, D. A. *et al.* Modeling and optimization strategies towards performance enhancement of microbial fuel cells. **Bioresource Technology**, v. 320, p. 124256, 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124256. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420315303>. Acesso em: 15 jan. 2024.

JIANG, Y. *et al.* Microbial fuel cell sensors for water quality early warning systems: Fundamentals, signal resolution, optimization and future challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 292-305, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.099. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117310420>. Acesso em: 11 jan. 2024.

KATURI, K. P. *et al.* Microbial fuel cells meet with external resistance. **Bioresource technology**, v. 102, n. 3, p. 2758-2766, 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.10.147. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410018560>. Acesso em: 12 jan. 2024.



KIM, B. H. *et al.* Electrochemical activity of an Fe (III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens* IR-1, in the presence of alternative electron acceptors. **Biotechnology Techniques**, v. 13, p. 475-478, 1999. DOI: 10.1023/A:1008993029309. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008993029309>. Acesso em: 11 jan. 2024.

KIM, C. *et al.* Metabolic flux change in *Klebsiella pneumoniae* L17 by anaerobic respiration in microbial fuel cell. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 21, p. 250-260, 2016. DOI: 10.1007/s12257-015-0777-6. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12257-015-0777-6>. Acesso em: 11 jan. 2024.

KIM, C. *et al.* Hexavalent chromium as a cathodic electron acceptor in a bipolar membrane microbial fuel cell with the simultaneous treatment of electroplating wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 328, p. 703-707, 2017. DOI: 10.1016/j.cej.2017.07.077. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589471731224X>. Acesso em: 11 jan. 2024.

KUNTKE, P. *et al.* Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell. **Water research**, v. 46, n. 8, p. 2627-2636, 2012. DOI: 10.1016/j.watres.2012.02.025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135412001285>. Acesso em: 11 jan. 2024.

LEE, C.; CHEN, J.; CAI, Y. Bioelectricity generation and organic removal in microbial fuel cells used for treatment of wastewater from fish-market. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 20, p. 173–180, 2010.

LEHNEN, D. **Desenvolvimento de células de combustível microbiana**. 2014. 79 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/108365>. Acesso em: 11 jan. 2024.

LIU, H. *et al.* Scale-up of membrane-free single-chamber microbial fuel cells. **Journal of Power Sources**, v. 179, n. 1, p. 274-279, 2008. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.12.120. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775308000256>. Acesso em: 12 jan. 2024.

LIU, H.; CHENG, S.; LOGAN, B. E. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration. **Environmental Science & Technology**, v. 39, n. 14, p. 5488-5493, 2005. DOI: 10.1021/es050316c. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es050316c>. Acesso em: 10 jan. 2024.

LIU, H.; RAMNARAYANAN, R.; LOGAN, B. E. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 7, p. 2281-2285, 2004. DOI: 10.1021/es034923g. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es034923g>. Acesso em: 11 jan. 2024.

LOGAN, B. E. *et al.* Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. **Environmental Science & Technology**, v. 40, p. 5181-5192, 2006. DOI: 10.1021/es0605016. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0605016>. Acesso em: 11 jan. 2024.

LOGAN, B. E. *et al.* Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 23, p. 8630-8640, 2008. DOI: 10.1038/nrmicro2113. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nrmicro2113>. Acesso em: 09 jan. 2024.

LOGAN, B. E. *et al.* Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities. **Environmental Science & Technology Letters**, v. 2, n. 8, p. 206-214, 2015. DOI: 10.1021/acs.estlett.5b00180. Acesso em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.estlett.5b00180>. Disponível em: 12 jan. 2024.

LOGAN, B. E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. **Nature Reviews Microbiology**, v. 7, n. 5, p. 375-381, 2009. DOI: 10.1021/es801553z. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es801553z>. Acesso em: 10 jan. 2024.

LONG, X. *et al.* Characterization of electricity generation and microbial community structure over long-term operation of a microbial fuel cell. **Bioresource Technology**, v. 285, p. 121395, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121395. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241930625X>. Acesso em: 12 jan. 2024.

LOVLEY, D. R. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. **Nature Reviews Microbiology**, v. 4, n. 7, p. 497-508, 2006. DOI: 10.1038/nrmicro1442. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nrmicro1442>. Acesso em: 11 jan. 2024.

LOVLEY, D. R. Powering microbes with electricity: direct electron transfer from electrodes to microbes. **Environmental Microbiology Reports**, v. 3, n. 1, p. 27-35, 2010. DOI: 10.1111/j.1758-2229.2010.00211.x. Disponível em: <https://ami-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1758-2229.2010.00211.x>. Acesso em: 11 jan. 2024.

LOWY, D. A. *et al.* Harvesting energy from the marine sediment–water interface II: kinetic activity of anode materials. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 21, n. 11, p. 2058-2063, 2006. DOI: 10.1016/j.bios.2006.01.033. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956566306000431>. Acesso em: 11 jan. 2024.

LUO, Q. *et al.* Non-linear performance analysis and voltage control of MFC based on feedforward fuzzy logic PID strategy. **Journal of Central South University**, v. 26, n. 12, p. 3359-3371, 2019. DOI: 10.1007/s11771-019-4259-4. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11771-019-4259-4>. Acesso em: 15 jan. 2024.

LYON, D. Y. *et al.* Is resistance futile? Changing external resistance does not improve microbial fuel cell performance. **Bioelectrochemistry**, v. 78, n. 1, p. 2-7, 2010. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2009.09.001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1567539409001716>. Acesso em: 12 jan. 2024.

MARCON, L. **Potencialidade da célula combustível microbiana para geração de energia elétrica a partir de esgoto sanitário**. 2011. 113 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MACEDO, J. A. B. As indústrias farmacêuticas e o Sistema de Gestão Ambiental (SGA). **Revista Fármacos & Medicamentos**. v. 1, n. 4, p. 46-50, 2000.

MAZZER, C.; CAVALCANTI, O. Introdução à gestão Ambiental de resíduos. **Infarma**, v. 16, n. 11/12, p. 66-77, 2004. Disponível em: <https://revistas.cff.org.br/infarma/article/view/299>. Acesso em: 19 dez. 2023.

MENICUCCI, J. *et al.* Procedure for determining maximum sustainable power generated by microbial fuel cells. **Environmental Science & Technology**, v. 40, n. 3, p. 1062-1068, 2006. DOI: 10.1021/es051180l. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es051180l>. Acesso em: 12 jan. 2024.

MORAIS, N. W. S.; SANTOS, A. B. **Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/43168>. Acesso em: 11 jan. 2024.

MORE, T. T.; GHANGREKAR, M. M. Improving performance of microbial fuel cell with ultrasonication pre-treatment of mixed anaerobic inoculum sludge. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 2, p. 562-567, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.045. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852409010815>. Acesso em: 11 jan. 2024.

MUNOZ-CUPA, C. *et al.* An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 142429, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142429. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720359581>. Acesso em: 11 jan. 2024.

NATH, A.; MISHRA, A.; PANDE, P. A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 6113-6117, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.551. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320323324>. Acesso em: 27 dez. 2023.

NAWAZ, A. *et al.* A state of the art review on electron transfer mechanisms, characteristics, applications and recent advancements in microbial fuel cells technology. **Green Chemistry Letters and Reviews**, v. 13, n. 4, p. 365-381, 2020. DOI: 10.1080/17518253.2020.1854871. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17518253.2020.1854871>. Acesso em: 12 jan. 2024.

NIESSEN, J. *et al.* Fluorinated polyanilines as superior materials for electrocatalytic anodes in bacterial fuel cells. **Electrochemistry Communications**, v. 6, n. 6, p. 571-575, 2004. DOI: 10.1016/j.elecom.2004.04.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1388248104000815>. Acesso em: 11 jan. 2024.

NOGUEIRA, M. **Aplicando lógica fuzzy no controle de robôs móveis usando dispositivos lógicos programáveis e a linguagem VHDL**. 2013. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2013.

Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/7091fb5e-d07f-43ea-886c-ccacc7b8ef97>. Acesso em: 12 jan. 2024.

OLIVEIRA, V. B. *et al.* Overview on the developments of microbial fuel cells. **Biochemical Engineering Journal**, v. 73, p. 53-64, 2013. DOI: 10.1016/j.bej.2013.01.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X13000235>. Acesso em: 09 jan. 2024.

PANT, D. *et al.* A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. **Bioresour. Technol.**, v. 101, n. 6, p. 1533-1543, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.10.017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852409013595>. Acesso em: 10 jan. 2024.

PARK, D. H.; ZEIKUS, J. G. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 81, n. 3, p. 348-355, 2003. DOI: 10.1002/bit.10501. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bit.10501>. Acesso em: 11 jan. 2024.

PARK, J.; REN, Z. High efficiency energy harvesting from microbial fuel cells using a synchronous boost converter. **Journal of Power Sources**, v. 208, p. 322-327, 2012. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.035. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775312003953>. Acesso em: 12 jan. 2024.

PARK, Y. *et al.* Complete nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in flat-panel air-cathode microbial fuel cells treating domestic wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 316, p. 673-679, 2017. DOI: 10.1016/j.cej.2017.02.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894717301626>. Acesso em: 11 jan. 2024.

PATIL, S. A. *et al.* Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. **Bioresour. Technol.**, v. 100, n. 21, p. 5132-5139, 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.05.041. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085240900577X>. Acesso em: 10 jan. 2024.

PEIXOTO, L. *et al.* Células de combustível microbianas: um processo inovador para produção de energia e tratamento de águas residuais em sistemas descentralizados. **Papers in Proceedings**, p. 1-11, 2013. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/27418>. Acesso em: 11 jan. 2024.

PEREIRA, F. M. V.; PEREIRA-FILHO, E. R. Aplicação de programa computacional livre em planejamento de experimentos: um tutorial. **Química Nova**, v. 41, p. 1061-1071, 2018. DOI: 10.21577/0100-4042.20170254. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/tV8spcx7Qny86z8xGpDSbvH/>. Acesso em: 15 jan. 2024.

PICIOREANU, C. *et al.* Modelling microbial fuel cells with suspended cells and added electron transfer mediator. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 40, p. 151-162, 2010. DOI: 10.1007/s10800-009-9991-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10800-009-9991-2>. Acesso em: 12 jan. 2024.

POTTER, M. C. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 84, p. 260-276, 1911. DOI: 10.1098/rspb.1911.0073. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspb.1911.0073>. Acesso em: 09 jan. 2023.

RABAEY, K.; VERSTRAETE, W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. **Trends in Biotechnology**, v. 23, n. 6, p. 291-298, 2005. DOI: 10.1016/j.tibtech.2005.04.008. Disponível em: [https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799\(05\)00092-2](https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799(05)00092-2). Acesso em: 11 jan. 2024.

RABAEY, K. *et al.* Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells. **Environmental Science & Technology**, v. 39, n. 9, p. 3401-3408, 2005. DOI: 10.1021/es048563o. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es048563o>. Acesso em: 11 jan. 2024.

RABAEY, K. *et al.* Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 9, p. 5373-5382, 2004. DOI: 10.1128/AEM.70.9.5373-5382.2004. Disponível em: <https://journals.asm.org/doi/full/10.1128/aem.70.9.5373-5382.2004>. Acesso em: 11 jan. 2024.

RACHINSKI, S. **Uso de Subprodutos da Indústria Agropecuária na Geração Elétrica Através de Células Combustíveis Microbianas**. 2010. 74 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

RAHIMNEJAD, M. *et al.* Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. **Alexandria Engineering Journal**, v. 54, n. 3, p. 745-756, 2015. DOI: 10.1016/j.aej.2015.03.031. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815000484>. Acesso em: 10 jan. 2024.

RAJAN, V. V. *et al.* Science and technology of rubber reclamation with special attention to NR-based waste latex products. **Progress in Polymer Science**, v. 31, n. 9, p. 811-834, 2006. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2006.08.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670006000700>. Acesso em: 11 jan. 2024.

RAMÓN-FERNÁNDEZ, A. *et al.* Modelling the energy harvesting from ceramic-based microbial fuel cells by using a fuzzy logic approach. **Applied Energy**, v. 251, p. 113321, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191930995X>. Acesso em: 12 jan. 2024.

REGUERA, G. *et al.* Extracellular electron transfer via microbial nanowires. **Nature**, v. 435, n. 7045, p. 1098-1101, 2005. DOI: 10.1038/nature03661. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature03661>. Acesso em: 11 jan. 2024.

REGUERA, G. *et al.* Biofilm and nanowire production leads to increased current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 72, n. 11, p. 7345-7348, 2006. DOI: 10.1128/AEM.01444-06. Disponível em: <https://journals.asm.org/doi/full/10.1128/aem.01444-06>. Acesso em: 11 jan. 2024.

REZAEI, F.; RICHARD, T. L.; LOGAN, B. E. Analysis of chitin particle size on maximum power generation, power longevity, and coulombic efficiency in solid-substrate microbial fuel cells. **Journal of Power Sources**, v. 192, n. 2, p. 304-309, 2009. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.03.023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775309005291>. Acesso em: 10 jan. 2024.

RISMANI-YAZDI, H. *et al.* Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 278-283, 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.05.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410008230>. Acesso em: 12 jan. 2024.

RODRIGO, M. A. *et al.* Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. **Journal of Power Sources**, v. 169, n. 1, p. 198-204, 2007. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.01.054. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775307002285>. Acesso em: 10 jan. 2024.

RODRIGUES, I. C. B. **Otimização de parâmetros de construção e operação de células de energia microbiana aplicadas à remoção de sulfato**. 2021. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2021. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/13348>. Acesso em 16 jan. 2024.

ROUVRAY, D. H. **Fuzzy logic in chemistry**. Academic Press, 1997. ISBN 978-0-12-598910-7.

SCHRÖDER, U. Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 9, n. 21, p. 2619-2629, 2007. DOI: 10.1039/B703627M. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2007/cp/b703627m/>. Acesso em: 11 jan. 2024.

SCHRÖDER, U.; NIESSEN, J.; SCHOLZ, F. A generation of microbial fuel cells with current outputs boosted by more than one order of magnitude. **Angewandte Chemie**, v. 42, p. 2880-2883, 2003. DOI: 10.1016/j.elecom.2004.04.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1388248104000815>. Acesso em: 11 jan. 2024.

SCOTT, K. *et al.* Application of modified carbon anodes in microbial fuel cells. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 85, n. 5, p. 481-488, 2007. DOI:

10.1205/psep07018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582007714520>. Acesso em: 11 jan. 2024.

SERHAT, E. A. *et al.* Experimental investigation and fuzzy logic modeling of 8x8 cm<sup>2</sup> membrane performance of microbial fuel cell. **Machines. Technologies. Materials.**, v. 11, n. 8, p. 404-406, 2017. Disponível em: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2017/8/404>. Acesso em: 15 jan. 2024.

SILVEIRA, M. V.; LOPES, T. J.; ROSA, G. R. N-arilação do imidazol via CuI: um tutorial para otimização de um sistema catalítico através do planejamento experimental. **Educación Química**, v. 28, n. 1, p. 44-50, 2017. DOI: 10.1016/j.eq.2016.10.001. Disponível em: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-893X2017000100005&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-893X2017000100005&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 15 jan. 2024.

SIMON, A.; CABRAL, L. M.; SOUSA, V. P. Desenvolvimento e validação de método analítico por CLAE para a quantificação simultânea de dipropionato de betametasona e fosfato sódico de betametasona em suspensão injetável. **Química Nova**, v. 35, p. 593-600, 2012. DOI: 10.1590/S0100-40422012000300027. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/VDk7rYdgk44zf8G5SVZkT8w/>. Acesso em: 18 jan. 2024.

SINGH, A.; KAUSHIK, A. Sustained energy production from wastewater in microbial fuel cell: effect of inoculum sources, electrode spacing and working volume. **3 Biotech**, v. 11, n. 7, p. 344, 2021. DOI: 10.1007/s13205-021-02886-6. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-021-02886-6>. Acesso em: 12 jan. 2024.

SONG, T. *et al.* Removal of organic matter in freshwater sediment by microbial fuel cells at various external resistances. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 85, n. 11, p. 1489-1493, 2010. DOI: 10.1002/jctb.2454. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.2454>. Acesso em: 12 jan. 2024.

TANISHO, S.; KAMIYA, N.; WAKAO, N. Microbial fuel cell using *Enterobacter aerogenes*. **Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry**, v. 275, n. 1, p. 25-32, 1989. DOI: 10.1016/0022-0728(89)87189-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002207288987189X>. Acesso em: 11 jan. 2024.

TAVAKOLIAN, M. *et al.* New design of benthic microbial fuel cell for bioelectricity generation: Comparative study. **ScienceDirect**, v. 43, n. 45, p. 23533-23542, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.181. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920323661>. Acesso em: 19 jan. 2024

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M. Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, v. 29, p. 338-350, 2006. DOI: 10.1590/S0100-40422006000200026. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/JwRbS5DqdGmVMcb3M3xLrfJ/?lang=pt>. Acesso em: 15 jan. 2024.

TRAPERO, J. R. *et al.* Is microbial fuel cell technology ready? An economic answer towards industrial commercialization. **Applied energy**, v. 185, p. 698-707, 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.109. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916315562>. Acesso em: 09 jan. 2024.

WALTER, X. A. *et al.* Scaling up self-stratifying supercapacitive microbial fuel cell. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 46, p. 25240-25248, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.070. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920322072>. Acesso em: 12 jan. 2024.

WANG, Y. *et al.* Optimization of medium composition for the production of clavulanic acid by *Streptomyces clavuligerus*. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 3-4, p. 1161-1166, 2005. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.04.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032959204001608>. Acesso em: 15 jan. 2024.

WANG, X. *et al.* Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 17, p. 6870-6874, 2009. DOI: 10.1021/es900997w. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es900997w>. Acesso em: 11 jan. 2024.

WINFIELD, J. *et al.* Towards disposable microbial fuel cells: natural rubber glove membranes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 36, p. 21803-21810, 2014. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.071. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319914026305>. Acesso em: 11 jan. 2024.

WINFIELD, J. *et al.* 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, 2013a. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.08.163. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852413014211>. Acesso em: 11 jan. 2024.

WINFIELD, J. *et al.* Biodegradation and proton exchange using natural rubber in microbial fuel cells. **Biodegradation**, v. 24, p. 733-739, 2013b. DOI: 10.1007/s10532-013-9621-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10532-013-9621-x>. Acesso em: 11 jan. 2024.

XIAO, L. *et al.* Evaluation of normalized energy recovery (NER) in microbial fuel cells affected by reactor dimensions and substrates. **Bioresource technology**, v. 157, p. 77-83, 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.086. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852414001114>. Acesso em: 12 jan. 2024.

YAN, M.; FAN, L. Constant voltage output in two-chamber microbial fuel cell under fuzzy PID control. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 8, n. 3, p. 3321-3332, 2013. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)14393-8. Disponível em:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123143938>. Acesso em: 12 jan. 2024.

YAO, S. *et al.* A two-dimensional, two-phase mass transport model for microbial fuel cells. **Electrochimica Acta**, v. 212, p. 201-211, 2016. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.06.167. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468616314967>. Acesso em: 15 jan. 2024.

YONGABI, K. A. Biocoagulants for water and waste water purification: a review. **International Review of Chemical Engineering**, v. 2, p. 444-458, 2010. DOI 10.15866/IREBIC.V5I3.5976. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265532081\\_Biocoagulants\\_for\\_Water\\_and\\_Waste\\_Water\\_Purification\\_a\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/265532081_Biocoagulants_for_Water_and_Waste_Water_Purification_a_Review). Acesso em: 27 dez. 2023.

ZADEH, L. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>. Acesso em: 12 jan. 2024.

ZHANG, L. *et al.* Anodic current distribution in a liter-scale microbial fuel cell with electrode arrays. **Chemical Engineering Journal**, v. 223, p. 623-631, 2013. DOI: 10.1016/j.cej.2013.03.035. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894713003598>. Acesso em: 12 jan. 2024.

ZHANG, L. *et al.* 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. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.04.013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775311007981>. Acesso em: 12 jan. 2024.

ZHANG, X. *et al.* Separator characteristics for increasing performance of microbial fuel cells. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 21, p. 8456-8461, 2009. DOI: 10.1021/es901631p. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es901631p>. Acesso em: 11 jan. 2024.

ZHANG, X. *et al.* The use of nylon and glass fiber filter separators with different pore sizes in air-cathode single-chamber microbial fuel cells. **Energy & Environmental Science**, v. 3, n. 5, p. 659-664, 2010. DOI: 10.1039/B927151A. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/ee/b927151a/>. Acesso em: 11 jan. 2024.

ZHOU, X. *et al.* Surface oxygen-rich titanium as anode for high performance microbial fuel cell. **Electrochimica Acta**, v. 209, p. 582-590, 2016. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.05.103. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468616311690>. Acesso em: 11 jan. 2024.

## ANEXO 1 - PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONÁRIO 2<sup>6-2</sup> DE ESTUDO PRÉVIO

A Tabela A1 descreve os principais dados encontrados no levantamento – nos quais a pesquisa foi baseada –, com seus números de ocorrência e faixas de trabalho relatados nos trabalhos científicos – sendo que os parâmetros densidade de potência e tensão elétrica são variáveis de saída (respostas ou resultados dos experimentos), e os 6 demais parâmetros são dados de entrada (ou de operação).

**Tabela A1. Principais parâmetros encontrados no levantamento bibliográfico, com seus números de ocorrência e limites inferiores e superiores.**

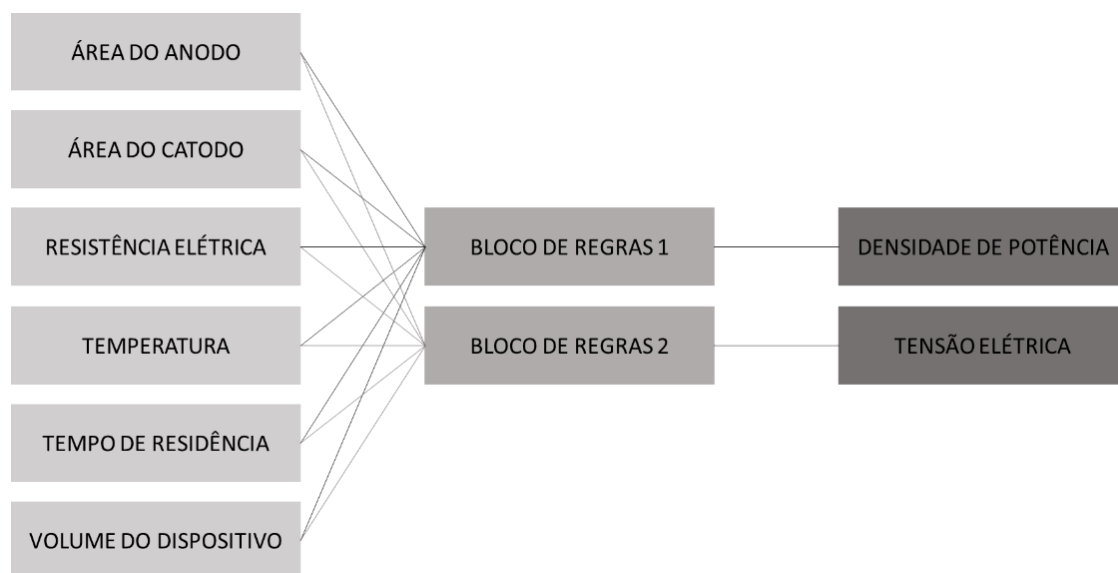
Parâmetro	Número de ocorrências	Limites do parâmetro	
		Inferior	Superior
Área do anodo (cm <sup>2</sup> )	22	1,0	1760
Área do catodo (cm <sup>2</sup> )	22	1,5	2380
Densidade de Potência (mWm <sup>-2</sup> )	19	0,72	1771
Resistência Elétrica Externa (Ω)	27	100	10000
Temperatura (°C)	20	23	50
Tempo de Residência (dias)	9	0,46	270
Tensão Elétrica (V)	8	0,162	0,946
Volume do Dispositivo (mL)	32	28	45000

Fonte: Próprio autor (2021).

Em seguida, essas informações foram utilizadas para constituir um primeiro conjunto de simulações aplicando a lógica *fuzzy* no *software* InFuzzy. Para isso, foram adicionadas e configuradas as 6 variáveis de entrada e as 2 variáveis de saída, com seus nomes, faixas e funções de trabalho e unidades. Além disso, definiu-se, do seguinte modo, a lista de termos linguísticos que seria empregada nas simulações: para as variáveis resistência elétrica externa e temperatura, empregou-se os termos “Moderada” e “Alta”; para o tempo de residência, os termos “Baixo” e “Alto”; para a densidade de potência, os termos “Muito Baixa”, “Baixa”, “Média” “Baixa”, “Média”, “Alta” e “Muito Alta”; e, para as demais variáveis, empregou-se os termos “Baixo”, “Médio” e “Alto”;

Posteriormente, realizou-se a etapa de definição das regras do projeto. Para esse estudo, foram criados 2 blocos de regras, sendo que todas as entradas foram conectadas a cada um dos blocos, e cada saída foi conectada a apenas um deles, como ilustrado na Figura 2.

**Figura A1. Representação da conexão entre as variáveis de entrada, os blocos de regras e as variáveis de saída para o primeiro conjunto de simulações no InFuzzy.**



Fonte: Próprio autor (2021).

Após, cada um dos blocos de regras foi configurado de acordo com suas entradas e pertencente saída, considerando conhecimentos da literatura e do programador. As Tabelas A2 e A3 apresentam, respectivamente, as configurações utilizadas nos blocos de regras referentes à densidade de potência e tensão elétrica nessa etapa do projeto.

**Tabela A2. Configurações empregadas nos blocos de regras para a saída densidade de potência no primeiro conjunto de simulações no InFuzzy.**

Parâmetro	Área do catodo	Área do anodo	Resistência Elétrica Externa	Temperatura	Tempo de Residência	Volume do Dispositivo	Densidade de Potência
Regras	Baixa	Baixa	Moderada	Moderada	Baixo	Baixo	Média Baixa
	Alta	Baixa	Moderada	Moderada	Alto	Baixo	Média Baixa
	Baixa	Alta	Moderada	Moderada	Alto	Alto	Alta
	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Baixo	Alto	Muito Alta

**Tabela A2. Configurações empregadas nos blocos de regras para a saída densidade de potência no primeiro conjunto de simulações no InFuzzy.**

(Continuação)

<b>Parâmetro</b>	Área do catodo	Área do anodo	Resistência Elétrica Externa	Temperatura	Tempo de Residência	Volume do Dispositivo	Densidade de Potência
<b>Regras</b>	Baixa	Baixa	Alta	Moderada	Alto	Alto	Baixa Média
	Alta	Baixa	Alta	Moderada	Baixo	Alto	Baixa Média
	Baixa	Alta	Alta	Moderada	Baixo	Baixo	Baixa Média
	Alta	Alta	Alta	Moderada	Alto	Baixo	Baixa
	Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Baixo	Alto	Média
	Alta	Baixa	Moderada	Alta	Alto	Alto	Média
	Baixa	Alta	Moderada	Alta	Alto	Baixo	Média Baixa
	Alta	Alta	Moderada	Alta	Baixo	Baixo	Alta
	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alto	Baixo	Muito Baixa
	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixo	Baixo	Baixa
	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixo	Alto	Média
	Alta	Alta	Alta	Alta	Alto	Alto	Média

Fonte: Próprio autor (2021).

**Tabela A3. Configurações empregadas nos blocos de regras para a saída tensão elétrica no primeiro conjunto de simulações no InFuzzy.**

<b>Parâmetro</b>	Área do catodo	Área do anodo	Resistência Elétrica Externa	Temperatura	Tempo de Residência	Volume do Dispositivo	Tensão Elétrica
<b>Regras</b>	Baixa	Baixa	Moderada	Moderada	Baixo	Baixo	Baixa
	Alta	Baixa	Moderada	Moderada	Alto	Baixo	Baixa
	Baixa	Alta	Moderada	Moderada	Alto	Alto	Média
	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Baixo	Alto	Alta
	Baixa	Baixa	Alta	Moderada	Alto	Alto	Média
	Alta	Baixa	Alta	Moderada	Baixo	Alto	Média
	Baixa	Alta	Alta	Moderada	Baixo	Baixo	Média
	Alta	Alta	Alta	Moderada	Alto	Baixo	Média
	Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Baixo	Alto	Baixa
	Alta	Baixa	Moderada	Alta	Alto	Alto	Baixa
	Baixa	Alta	Moderada	Alta	Alto	Baixo	Baixa
	Alta	Alta	Moderada	Alta	Baixo	Baixo	Baixa
	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alto	Baixo	Baixa
	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixo	Baixo	Baixa
	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixo	Alto	Alta
	Alta	Alta	Alta	Alta	Alto	Alto	Alta

Fonte: Próprio autor (2021).

A Tabela A4 apresenta a matriz de níveis e os resultados das primeiras simulações computacionais obtidas no *software* InFuzzy para as saídas de densidade de potência e tensão elétrica aplicados ao planejamento fatorial fracionário do tipo  $2^{6-2}$ .

**Tabela A4. Matriz de níveis e resultados do primeiro conjunto de simulações computacionais para as saídas de densidade de potência e tensão elétrica aplicados ao planejamento fatorial fracionário do tipo  $2^{6-2}$ .**

Ensaio	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	Densidade de Potência (mWm <sup>-2</sup> )	Tensão Elétrica (mV)
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	450,00	0,18
2	1	-1	-1	-1	1	-1	450,00	0,18
3	-1	1	-1	-1	1	1	1.033,33	0,49
4	1	1	-1	-1	-1	1	1.550,65	0,82
5	-1	-1	1	-1	1	1	180,00	0,49
6	1	-1	1	-1	-1	1	450,00	0,49
7	-1	1	1	-1	-1	-1	450,00	0,49
8	1	1	1	-1	1	-1	450,00	0,49
9	-1	-1	-1	1	-1	1	885,00	0,18
10	1	-1	-1	1	1	1	750,00	0,18
11	-1	1	-1	1	1	-1	450,00	0,18
12	1	1	-1	1	-1	-1	1.033,33	0,18
13	-1	-1	1	1	1	-1	33,78	0,18
14	1	-1	1	1	-1	-1	180,00	0,18
15	-1	1	1	1	-1	1	750,00	0,18
16	1	1	1	1	1	1	885,14	0,82

Fonte: Próprio autor (2021).

\*X<sub>1</sub>: área do catodo, com 1,5 cm<sup>2</sup> no nível baixo (-1) e 2380 cm<sup>2</sup> no nível alto (+1); X<sub>2</sub>: área do anodo, com 1 cm<sup>2</sup> no nível baixo (-1) e 1760 cm<sup>2</sup> no nível alto (+1); X<sub>3</sub>: resistência elétrica externa, com 100 Ω no nível baixo (-1) e 10.000 Ω no nível alto (+1); X<sub>4</sub>: temperatura, com 23 °C no nível baixo (-1) e 50 °C no nível alto (+1); X<sub>5</sub>: tempo de residência, com 0,46 dias no nível baixo (-1) e 270 dias no nível alto (+1); X<sub>6</sub>: volume do dispositivo, com 28 mL no nível baixo (-1) e 45000 mL no nível alto (+1).

A Tabela A5 apresenta os valores de efeito, erro, teste t e *p-valor*, calculados a partir das planilhas eletrônicas, para as variáveis estudadas nas primeiras simulações computacionais e no planejamento fatorial fracionário do tipo  $2^{6-2}$ .

**Tabela A5. Valores de efeito, erro, teste t e *p*-valor das variáveis do primeiro conjunto de simulações computacionais e do planejamento fatorial fracionário do tipo 2<sup>6-2</sup>.**

Fator	Densidade de Potência				Tensão Elétrica			
	Efeito	Erro	t(10)	<i>p</i> -valor	Efeito	Erro	t(10)	<i>p</i> -valor
Média	623,83	± 66,12	9,43	0,00	0,39	± 0,05	7,68	0,00
X <sub>1</sub>	189,63	± 132,24	1,43	0,18	0,04	± 0,10	0,39	0,69
X <sub>2</sub>	402,96	± 132,24	3,05	0,01	0,27	± 0,10	2,69	0,02
X <sub>3</sub>	-402,92	± 132,24	3,05	0,01	0,19	± 0,10	1,90	0,08
X <sub>4</sub>	-5,84	± 132,24	0,04	0,97	-0,11	± 0,10	1,10	0,29
X <sub>5</sub>	-189,59	± 132,24	1,43	0,18	-0,04	± 0,10	0,39	0,69
X <sub>6</sub>	373,38	± 132,24	2,82	0,02	0,27	± 0,10	2,69	0,02

Fonte: Próprio autor (2021).

\*X<sub>1</sub>: área do catodo; X<sub>2</sub>: área do anodo; X<sub>3</sub>: resistência elétrica externa; X<sub>4</sub>: temperatura; X<sub>5</sub>: tempo de residência; X<sub>6</sub>: volume do dispositivo.

Nesse tipo de estudo, se uma variável apresenta efeito positivo, sua influência nas variáveis de saídas é maior em suas condições de nível mais (+). Por outro lado, se seu efeito for negativo, sua influência nas variáveis de saídas é maior em suas condições de nível menos (-) (Wang *et al.*, 2005). Assim, a partir dos dados da Tabela A5 referentes à densidade de potência, verifica-se que condições de trabalho em que as variáveis de entrada área do catodo, área do anodo e volume do dispositivo estão em seus níveis mais altos influenciaram positivamente a produção dessa saída. Esses resultados estão de acordo com estudos prévios, nos quais já se observou que o aumento da superfície da área do catodo, o emprego de anodos com maiores áreas superficiais e o acréscimo do volume do dispositivo podem causar aumento na potência geral produzida em uma CEM (Nitorisavut; Thanh; Regmi, 2017; Walter *et al.*, 2020). Por outro lado, ainda de acordo dos dados da Tabela A5, condições de trabalho em que as variáveis resistência elétrica externa, temperatura e tempo de residência estão em seu nível mais alto impactaram de forma negativa na densidade de potência. Essas observações também estão de acordo com apontamentos anteriores, nos quais verificou-se que valores de resistência elétrica externa, temperatura e tempo de residência elevados podem diminuir a potência gerada em CEM (González del Campo *et al.*, 2014; Gadkari *et al.*, 2020; Long *et al.*, 2019).

Para a tensão elétrica, os dados da Tabela A5 indicam que condições de operação em que as variáveis área do catodo, área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo estão em seus níveis superiores influenciaram positivamente a produção dessa saída. Essas observações, mais uma vez, estão de acordos com resultados antecedentes, uma vez que já se notou que a tensão elétrica produzida por uma CEM pode ser aumentada por ampliar a área de superfície de seu catodo (Oh; Min; Logan, 2004), expandir o volume de seu

anodo (Atnafu; Leta, 2021), elevar sua resistência elétrica externa (González del Campo *et al.*, 2014) e aumentar o volume do dispositivo (Prasad; Tripathi, 2021). Em contrapartida, os dados da Tabela A5 apontam que condições de operação em que as entradas temperatura e tempo de residência estão em seus níveis superiores impactam negativamente a produção de tensão elétrica, o que também está de acordo com observações anteriores, que indicam que grandes aumentos na temperatura operacional e no tempo de operação desses dispositivos podem prejudicar a geração de tensão elétrica nas CEM (Behera; Murthy; Ghangrekar, 2011; Long *et al.*, 2019).

Em estudos de planejamentos experimentais, uma maneira de concluir se uma variável é estatisticamente significativa é por comparar o valor  $p$  do teste estatístico amostral com o nível de significância  $\alpha$  adotado, de modo que, se para uma variável,  $p \leq \alpha$ , ela é significativa (Silveira; Lopes; Rosa, 2017). Assim, analisando as informações apresentadas na Tabela A5 para a densidade de potência sob um nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ), percebe-se que as variáveis área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo, que exibiram  $p$ -valor  $< \alpha$ , se apresentam estatisticamente significativas nesse planejamento – de forma que nenhuma das demais variáveis se mostrou estaticamente significativa, bem como suas interações. Analogamente, considerando as informações da mesma Tabela para a tensão elétrica sob o mesmo nível de confiança ( $\alpha = 0,05$ ), percebe-se que as variáveis área do anodo e volume do dispositivo, que exibiram  $p$ -valor  $< \alpha$  para esse caso, se apresentam estatisticamente significativas nesse planejamento – e, novamente, nenhuma outra variável, ou suas interações, se mostrou estaticamente significativa. Desse modo, conclui-se que, para a variável-saída densidade de potência, as variáveis área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo se apresentaram como mais relevantes, e, para a variável-saída tensão elétrica, as variáveis área do anodo e volume do dispositivo se apresentaram como mais influentes. Conseqüentemente, esses 3 fatores mais significantes – área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo – foram selecionados para a execução do planejamento DCCR com o objetivo de obter informações estatísticas mais completas relacionadas a esses parâmetros e às respostas estudadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATNAFU, T.; LETA, S. New fragmented electro-active biofilm (FAB) reactor to increase anode surface area and performance of microbial fuel cell. **Environmental Systems Research**, v. 10, n. 1, p. 31, 2021. DOI: 10.1186/s40068-021-00234-4. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40068-021-00234-4>. Acesso em: 24 jan. 2024.

BEHERA, M.; MURTHY, S. S. R.; GHANGREKAR, M. M. Effect of operating temperature on performance of microbial fuel cell. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 4, p. 917-922, 2011. DOI: 10.2166/wst.2011.704. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/64/4/917/16945/>. Acesso em: 24 jan. 2024.

GADKARI, S. *et al.* Influence of temperature and other system parameters on microbial fuel cell performance: Numerical and experimental investigation. **Chemical Engineering Journal**, v. 388, p. 124176, 2020. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124176. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894720301674>. Acesso em: 12 jan. 2024.

GONZÁLEZ DEL CAMPO, A. *et al.* Effects of external resistance on microbial fuel cell's performance. **Environment, Energy and Climate Change II: Energies from New Resources and the Climate Change**, p. 175-197, 2014. DOI: 10.1007/698\_2014\_290. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/698\\_2014\\_290](https://link.springer.com/chapter/10.1007/698_2014_290). Acesso em: 12 jan. 2024.

LONG, X. *et al.* Characterization of electricity generation and microbial community structure over long-term operation of a microbial fuel cell. **Bioresource Technology**, v. 285, p. 121395, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121395. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241930625X>. Acesso em: 12 jan. 2024.

NITISORAVUT, R.; THANH, C. N. D.; REGMI, R. Microbial fuel cells: Advances in electrode modifications for improvement of system performance. **International Journal of Green Energy**, v. 14, n. 8, p. 712-723, 2017. DOI: 10.1080/15435075.2017.1326049. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15435075.2017.1326049>. Acesso em: 24 jan. 2024.

OH, S.; MIN, B.; LOGAN, B. E. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 18, p. 4900-4904, 2004. DOI: 10.1021/es049422p. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es049422p>. Acesso em: 24 jan. 2024.

PRASAD, J.; TRIPATHI, R. K. Scale-up and control the voltage of sediment microbial fuel cell for charging a cell phone. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 172, p. 112767, 2021. DOI: 10.1016/j.bios.2020.112767. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956566320307545>. Acesso em: 24 jan. 2024.

SILVEIRA, M. V.; LOPES, T. J.; ROSA, G. R. N-arilacção do imidazol via CuI: um tutorial para otimização de um sistema catalítico através do planeamento experimental. **Educación Química**, v. 28, n. 1, p. 44-50, 2017. DOI: 10.1016/j.eq.2016.10.001. Disponível em:



[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-893X2017000100005&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-893X2017000100005&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 15 jan. 2024.

WALTER, X. A. *et al.* Scaling up self-stratifying supercapacitive microbial fuel cell. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 46, p. 25240-25248, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.070. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920322072>. Acesso em: 12 jan. 2024.

WANG, Y. *et al.* Optimization of medium composition for the production of clavulanic acid by *Streptomyces clavuligerus*. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 3-4, p. 1161-1166, 2005. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.04.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032959204001608>. Acesso em: 15 jan. 2024.

## ANEXO 2 – Conceitos e definições envolvidos na tecnologia das células de energia microbiana

- Água residual: toda água descartada após passar por intervenções realizadas por humanos; podem ser domésticas, industriais e urbanas, por exemplo. Muitas vezes é referida como água residuária, efluente ou esgoto (Silva; Bahia, 2019).
- Tratamentos de efluente: conjunto de técnicas que visa reduzir a carga poluidora dos efluentes antes de sua disposição final a fim de evitar a degradação da qualidade das águas (Beltrame *et al.*, 2016). Se nomeia como tratamento biológico, ou biotratamento, o processo de tratamento que se dá por meio da atuação de microrganismos, na ausência ou presença de oxigênio (Guedes *et al.*, 2015).
- Energia química: é a energia armazenada nas ligações químicas entre átomos ou moléculas (Moreira *et al.*, 2021).
- Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: o desenvolvimento sustentável é objetivo a ser alcançado e a sustentabilidade é o processo para atingir o desenvolvimento sustentável. Sustentabilidade pode ser definida como o equilíbrio entre três pilares: ambiental, econômico e social (ELKINGTON, 1994).
- Eletrodo, anodo e catodo: De forma geral, pode se conceitualizar o eletrodo como uma superfície sólida condutora que possibilita a troca de elétrons. Anodo é o eletrodo no qual ocorre a oxidação (perda de elétrons), Catodo é o eletrodo no qual ocorre a redução (ganho de elétrons) (ARAÚJO *et al.*, 2021).
- Célula combustível: é uma máquina térmica que converte energia química em energia elétrica (Sharaf; Orhan, 2014).
- Biogeração de energia elétrica: conversão da energia química em eletricidade por meio da ação de microrganismos (Oliveira; Santos, 2018).
- Corrente elétrica, potência elétrica e tensão elétrica: corrente elétrica pode ser definida como o deslocamento de elétrons para uma determinada direção, em um único sentido; tensão elétrica é a força capaz de mover elétrons ordenadamente em um conduto; potência elétrica é o produto entre corrente e tensão elétrica, ou seja, a capacidade de uma carga de produzir trabalho (Gussow, 2009).
- Compostos orgânicos: de forma geral, são moléculas que apresentam carbono e hidrogênio como pilares de suas constituições químicas (Souza Filho; Fagan, 2007).

- Aeróbio e anaeróbio: dizem respeito à presença e ausência de oxigênio gasoso respectivamente. Microrganismos anaeróbios são aqueles que sobrevivem na ausência de oxigênio gasoso, não podem crescer na presença de ar e não utilizam oxigênio para suas reações de produção de energia (Pelczar *et al.*, 1997).
- Eletroquímica: é um ramo da química que investiga as reações que envolvem correntes e potenciais elétricos (Freitas, 2021).
- Respiração celular: reação na qual as células processam o “alimento” (como a glicose, por exemplo) para produzir energia (Trazzi; Oliveira, 2016).
- Resistores elétricos: são componentes com a finalidade de oferecer oposição à passagem de corrente elétrica (Moraes; Alves; Novais, 2019).
- Batelada e contínuo: processos em batelada são aqueles que ocorrem por unidade de produção, até que seja concluído, e são repetidos em ciclos; processos contínuos são aqueles que operam por longos períodos ininterruptamente (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2009).
- Receptor de elétrons: molécula que recebe (aceita) elétrons transferidos de outro composto. Também chamado de aceitador ou acceptor de elétrons (Ferreira, 2017).
- Biofilme: nome dado a uma comunidade de microrganismos incorporados em uma matriz extracelular aderida a uma superfície (Rautemaa; Ramage, 2011).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, M. *et al.* Eletroquímica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 7, p. 1478–1483, 2021. DOI: 10.51891/rease.v7i10.2675. Disponível em: <https://www.periodicorease.pro.br/rease/article/view/2675>. Acesso em: 25 jul. 2023.

BELTRAME, T. F. *et al.* Efluentes, resíduos sólidos e educação ambiental: Uma discussão sobre o tema. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, p. 283–294, 2016. DOI: 105902/2236117015827. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/view/15827/0>. Acesso em: 17 jul. 2023.

ELKINGTON, J. Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. **California Management Review**, v. 36, p. 90-100, 1994. DOI: 10.2307/41165746. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.2307/41165746>. Acesso em: 17 jul. 2023.

FERREIRA, D. H. **Processamento e caracterização do SnO<sub>2</sub>(s) dopado com doadores/receptores de elétrons para aplicação como eletrodo óxido condutor**. 2017. 107 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Itajubá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/713>. Acesso em: 24 jan. 2024.

FREITAS, G. **Desenvolvimento e validação de um checklist para análise do conteúdo de Eletroquímica em Livros Didáticos de Ensino Superior**. 2021. 65 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual Paulista, 2021. Disponível em: [https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UNSP\\_68c15ea6c020c98cf4c508b40ddb9e18](https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UNSP_68c15ea6c020c98cf4c508b40ddb9e18). Acesso em: 24 jan. 2024.

GUEDES, N. *et al.* Avaliação do potencial da lagoa de estabilização do Aterro Sanitário do Município de Puxinanã-PB, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 3, p. 129–136, 2015. Disponível em: <https://revista.ecogestaobrasil.net/v2n3/v02n03a05a.html>. Acesso em: 24 jan. 2024.

GUSSOW, M. **Eletricidade básica**. Porto Alegre: Bookman, 2009.  
MORAES, I.; ALVES, R. NOVAIS, E. Experimento para visualização das linhas de campo elétrico. **Scientia Plena**, v. 15, p. 1–8, 2019. DOI: 10.14808/sci.plena.2019.074812. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/4843>. Acesso em: 14 ago. 2023.

MOREIRA, JOSÉ R. S. *et al.* Energia e panorama energético. In: MOREIRA, JOSE R.S. (org.). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2 ed., 2021. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/32904>. Acesso em: 17 jul. 2023.

OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, A. **Avanços Científicos e Tecnológicos em Bioprocessos**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2018. DOI: 10.22533/at.ed.475180110. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/30088>. Acesso em: 23 ago. 2023.

PELCZAR, M. J.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. **Microbiologia**. São Paulo: Makron Books, 1997.

RAUTEMAA, R.; RAMAGE, G. Oral candidosis – clinical challenges of a biofilm disease. **Critical Reviews in Microbiology**, v. 37, p. 328-336, 2011. DOI: 10.3109/1040841X.2011.585606. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21777047/>. Acesso em: 18 ago. 2023.

SHARAF, O.; ORHAN, M. F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 810-853, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114000227>. Acesso em: 23 ago. 2023.

SILVA, K. P.; BAHIA, M. C. Sustentabilidade na gestão pública: ações socioambientais nas universidades federais da Região Amazônica. **Paper do NAEA 2019**, v. 28, p. 1541–1556, 2018. DOI: 10.18542/papersnaea.v28i3.8420. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/pnaea/article/view/8420>. Acesso em: 17 jul. 2023.

SILVA, R. F. **Degradação de Corante de Efluente Têxtil por Processo Oxidativo Avançado**. 2015. 106 p. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3ª ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SOUZA FILHO, A. G.; FAGAN, S. B. Funcionalização de nanotubos de Carbono. **Química Nova**, v. 30, n. 7, p. 1695-1703, 2007. DOI: 10.1590/S0100-40422007000700037. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/sQ5fH85dZLmBnZT6v5WPxbs/>. Acesso em: 28 ago. 2023.

TRAZZI, P.; OLIVEIRA, I. O processo de apropriação dos conceitos de fotossíntese e respiração celular por alunos em aulas de Biologia. **Revista Ensaio**, v. 18, p. 85–106, 2016. DOI: 10.1590/1983-21172016180105. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epcc/a/4CrjrHLzq8vkkvDB7Mhm5jy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2023.