

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS EM CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA

Matheus Henrique Alcântara de Lima Cardozo (UFSJ) E-mail: matheushcardozo@yahoo.com.br

Edson Romano Nucci (UFSJ) E-mail: edsonucci@gmail.com

Isabel Cristina Braga Rodrigues (UFSJ) E-mail: isabelcbraga@ufs.edu.br

Resumo: Células de energia microbiana (CEM) são uma tecnologia de interesse no cenário atual, já que permitem promover, simultaneamente, o biotratamento de resíduos e a biogeração de energia elétrica. A fim de otimizar as aplicações desses dispositivos, há o interesse em investigar as variáveis que interferem mais significativamente em seu desempenho, uma vez que esses são sistemas complexos. Nesse contexto, este trabalho objetivou empregar a lógica fuzzy aliada à técnica de planejamento experimental para avaliar estatisticamente como os parâmetros de operação das CEM impactam sua performance. Por meio dos resultados, concluiu-se que as variáveis de entrada área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo foram estatisticamente mais significativas para as saídas estudadas – densidade de potência e tensão elétrica – nas condições pesquisadas. Ademais, desenvolveu-se modelos matemáticos que relacionam as entradas e saídas estudadas, colaborando com a elaboração de representações mais simples dos sistemas das CEM e de seus mecanismos.

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

STUDY OF OPERATIONAL PARAMETERS INFLUENCE ON MICROBIAL FUEL CELLS

Abstract: Microbial fuel cells (MFC) are a technology of interest in the current scenario, as they allow the simultaneous promotion of biotreatment of waste and biogeneration of electricity. In order to optimize the applications of this technology, there is an interest in investigating the variables that most significantly interfere in its performance, since these devices are complex systems. In this context, this paper aimed to employ fuzzy logic combined with design of experiments technique to statistically evaluate how MFC's operational parameters impact their performance. As a result, it was concluded that the input variables anode area, external electrical resistance and device volume were statistically more significant for the studied outputs – power density and electrical voltage – in the searched conditions. Furthermore, mathematical models that relate the studied inputs and outputs were developed, collaborating with the elaboration of simpler MFC systems representations and their mechanisms.

Keywords: bioelectrochemistry, fuzzy logic, design of experiments.

1. Introdução

Nas últimas décadas, têm se destacado o desenvolvimento de alternativas que realizem o tratamento de efluentes e, paralelamente, recuperem parte da energia neles contida (GUDE, 2015). Nesse contexto, as células de energia microbiana (CEM) surgem como uma tecnologia de interesse, já que permitem promover, de modo simultâneo, o biotratamento de resíduos e a biogeração de energia elétrica (CHEN et al., 2015).

A estrutura básica de uma CEM é composta por dois compartimentos: o primeiro deles é anaeróbio e abriga um anodo, e o segundo é aeróbio e abriga um catodo; esses eletrodos são separados internamente por uma barreira – que impede a difusão de gás oxigênio (O₂) da câmara catódica para a anódica e permite a passagem de íons H⁺ da câmara anódica para a catódica –, mas são conectados externamente por um circuito elétrico (RAHIMNEJAD et al., 2015). O mecanismo geral de funcionamento desses

dispositivos se dá pela oxidação de substratos orgânicos por microrganismos que colonizam seu compartimento anódico e geram elétrons, que são transferidos pelo circuito elétrico externo até o cátodo, produzindo, assim, corrente elétrica (HIDALGO et al., 2014). A Figura 1 apresenta a estrutura geral de uma CEM.

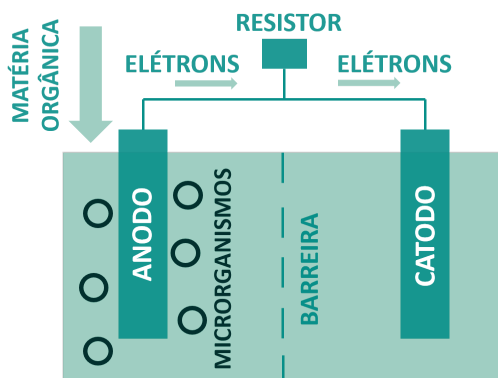


Figura 1 – Esquema geral de uma CEM. Fonte: adaptado de Cardozo & Nucci (2022).

Os substratos orgânicos que são oxidados nas CEM podem apresentar diversas origens, incluindo águas residuais domésticas, industriais e agrícolas e, por esse motivo, considera-se que uma célula de energia microbiana é capaz de realizar um tratamento anaeróbico de efluentes – assim, ao passo que trata um efluente, por retirar dele parte de sua carga orgânica, há geração de energia em uma CEM, realizando um aproveitamento orgânico para geração de energia. (NASEER et al., 2021).

A fim de otimizar o desempenho das CEM, há o interesse em investigar as principais variáveis que interferem em suas performances, já que esses dispositivos são sistemas complexos, com processos biológicos, químicos e físicos (OLIVEIRA et al., 2013). Uma das técnicas computacionais que pode ser aplicada ao estudo das CEM é a lógica fuzzy, que é uma das ferramentas atuais mais bem sucedidas para desenvolver o controle e a simulação de processos complexos, apresentando a capacidade de aproximar o raciocínio humano à forma de interpretação das máquinas (ZADEH, 1965; SUGANTHI et al., 2015). Além disso, é possível aliar as vantagens da lógica fuzzy à técnica estatística de planejamento de experimentos para observar os efeitos das variáveis envolvidas em um processo monitorado e determinar as melhores condições de operação, realizando, assim, 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).

Deste modo, este trabalho objetivou a aplicação da lógica fuzzy para simular o desempenho de células de energia microbiana em diferentes condições operacionais, com utilização dos resultados obtidos para subseqüente emprego da técnica de planejamento experimental com a finalidade de avaliar estatisticamente os parâmetros de operação que influenciam mais fortemente a performance desses dispositivos.

2. Métodos

Para a realizar a aplicação da lógica fuzzy neste estudo, foram levantados os principais parâmetros de operação e os resultados alcançados em pesquisas com CEM relatados na literatura. Para tanto, utilizou-se um banco bibliográfico construído entre março e novembro de 2020 e composto de 87 trabalhos científicos disponíveis na plataforma Google Acadêmico e encontrados sob a busca dos termos “célula de energia microbiana”, “célula combustível microbiana” e “microbial fuel cell”. O banco

bibliográfico foi analisado da seguinte forma: os parâmetros de entrada foram levantados nas seções de materiais e métodos e as variáveis de saída nos resumos e resultados. Do total de trabalhos do banco bibliográfico, 47 publicações não foram incluídas no levantamento, já que 10 dos trabalhos não tratavam especificamente sobre CEM, mas de suas contextualizações; 28 se tratavam de revisões bibliográficas, não apresentando dados experimentais que pudessem ser incorporadas à pesquisa; e 9 apresentaram metodologias que não se adequam ao objetivo deste estudo. Assim, 40 trabalhos foram incluídos no levantamento.

Os principais dados encontrados no levantamento e que foram adotados para o estudo (acompanhados de seus números de ocorrência e faixas de trabalho relatadas nos trabalhos científicos) foram: Densidade de Potência (19; 0,72 a 1771 mWm⁻²); Tensão Elétrica (8; 0,162 a 0,946 V); Área do anodo (22; 1,0 a 1760 cm²); Área do catodo (22; 1,5 a 2380 cm²); Resistência Elétrica Externa (27; 100 a 10000 Ω); Temperatura (20; 23 a 50 °C); Tempo de Residência (9; 0,46 a 270 dias); Volume do Dispositivo (32; 28 a 45000 mL) – destacando-se que as 2 primeiras variáveis são parâmetros de saída, e os demais (6 outros parâmetros) são dados de entrada.

Após, esses parâmetros e suas faixas de trabalho foram utilizados para constituir um primeiro conjunto de simulações aplicando a lógica fuzzy. Para isso, utilizou-se o software InFuzzy, no qual foram adicionadas e configuradas as 6 variáveis de entrada e as 2 variáveis de saída e definida a lista de termos linguísticos para cada uma delas de acordo com os dados do levantamento e os conhecimentos do programador. Nessa etapa, utilizou-se, para as variáveis área do anodo, área do catodo, tensão elétrica e volume do dispositivo, os termos “Baixo”, “Médio” e “Alto”; para os parâmetros resistência elétrica externa, os termos “Moderada” e “Alta”; para a densidade de potência, os termos “Muito Baixa”, “Baixa”, “Média Baixa”, “Média”, “Alta” e “Muito Alta”; e, para o tempo de residência, os termos “Baixo” e “Alto”.

Em seguida, 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 de regras, e cada saída foi conectada a apenas um dos blocos. 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. A Tabela 1 apresenta as configurações utilizadas nos blocos de regras referentes à densidade de potência e tensão elétrica nessa etapa o projeto.

Tabela 1 – Configurações empregadas nos blocos de regras do primeiro conjunto de simulações para relacionar as entradas e saídas estudadas

Área do Catodo	Área do Anodo	Resistência Elétrica	Temperatura	Tempo de Residência	Volume do Dispositivo	Densidade de Potência	Tensão Elétrica
Baixa	Baixa	Moderada	Moderada	Baixo	Baixo	Média Baixa	Baixa
Alta	Baixa	Moderada	Moderada	Alto	Baixo	Média Baixa	Baixa
Baixa	Alta	Moderada	Moderada	Alto	Alto	Alta	Média
Alta	Alta	Moderada	Moderada	Baixo	Alto	Muito Alta	Alta
Baixa	Baixa	Alta	Moderada	Alto	Alto	Baixa	Média
Alta	Baixa	Alta	Moderada	Baixo	Alto	Média Baixa	Média
Baixa	Alta	Alta	Moderada	Baixo	Baixo	Média Baixa	Média
Alta	Alta	Alta	Moderada	Alto	Baixo	Média Baixa	Média
Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Baixo	Alto	Média	Baixa
Alta	Baixa	Moderada	Alta	Alto	Alto	Média	Baixa
Baixa	Alta	Moderada	Alta	Alto	Baixo	Média Baixa	Baixa
Alta	Alta	Moderada	Alta	Baixo	Baixo	Alta	Baixa

Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alto	Baixo	Muito Baixa	Baixa
Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixo	Baixo	Baixa	Baixa
Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixo	Alto	Média	Alta
Alta	Alta	Alta	Alta	Alto	Alto	Média	Alta

Fonte: Próprio autor.

Posteriormente, foram realizadas as simulações computacionais no software InFuzzy com o objetivo de obter respostas computacionais para as saídas de densidade de potência e tensão elétrica e, subsequentemente, executar um planejamento fatorial fracionário do tipo 2^{6-2} , além de definir quais das 6 variáveis de entrada eram mais estatisticamente significativas. Para isso, foram empregadas planilhas eletrônicas do software Excel[®] desenvolvidas por Teófilo e Ferreira (2006) e utilizou-se de dois níveis (+1 e -1), com total de 16 experimentos, e o resultado foi analisado de acordo com as respostas de significância estatística fornecidas pelas tabelas eletrônicas.

Com base nos resultados obtidos no planejamento fatorial fracionário do tipo 2^{6-2} , realizou-se um segundo planejamento de experimentos, dessa vez do tipo composto central rotacional (DCCR), com o objetivo de refinar as respostas obtidas e ratificar a significância estatística das variáveis de entrada selecionadas no primeiro planejamento experimental. Para esse fim, empregou-se novamente o software InFuzzy para adicionar e configurar as 3 variáveis de entrada apontadas no planejamento experimental inicial – área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo – e as 2 variáveis de saída, com seus nomes, faixas e funções de trabalho, unidades e listas de termos linguísticos. Nessa etapa do projeto, para os parâmetros área do anodo, resistência elétrica externa, tensão elétrica e volume do dispositivo, utilizou-se os termos linguísticos “Baixo”, “Médio” e “Alto” e, para o parâmetro densidade de potência, utilizou-se os termos “Muito Baixa”, “Baixa”, “Média Baixa”, “Média”, “Média Alta”, “Alta” e “Muito Alta”. Posteriormente, executou-se uma nova etapa de definição de regras, criando outros 2 blocos de regras – e, novamente, todas as entradas foram conectadas a cada um dos blocos de regras, e cada saída foi conectada a apenas um dos blocos de regras.

A Tabela 2 exibe as configurações das entradas utilizadas nos blocos de regras e das respectivas saídas nessa nova fase do projeto.

Tabela 2 – Configurações empregadas nos blocos de regras do segundo conjunto de simulações para relacionar as entradas e saídas estudadas

Área do Anodo	Resistência Elétrica	Volume do Dispositivo	Densidade de Potência	Tensão Elétrica
Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa
Baixa	Alta	Baixa	Muito Baixa	Baixa
Alta	Alta	Baixa	Baixa	Média
Baixa	Baixa	Alta	Média	Baixa
Alta	Baixa	Alta	Muito Alta	Média
Baixa	Alta	Alta	Baixa	Média
Alta	Alta	Alta	Média	Alta
Baixa	Média	Média	Média Baixa	Baixa
Alta	Média	Média	Média Alta	Alta
Média	Baixa	Média	Média Alta	Baixa
Média	Alta	Média	Média Baixa	Alta
Média	Média	Baixa	Média Baixa	Baixa
Média	Média	Alta	Média Alta	Alta
Média	Média	Média	Média	Media

Fonte: Próprio autor.

Após, foram realizadas novas simulações computacionais para obter novas respostas simuladas, que foram empregadas no planejamento experimental do tipo DCCR. Para tal, novamente foram utilizadas as planilhas eletrônicas e, nesse caso, utilizou-se 8 experimentos no planejamento fatorial, 6 nos pontos axiais e triplicatas no ponto central – ou seja, 17 conjuntos de dados no total –, em cinco níveis (+ α , +1, 0, -1 e - α , em que + α = 1,681 e - α = -1,681). Os resultados foram analisados de acordo com as respostas de significância estatística fornecidas, além dos dados que compõe a análise de variância (ANOVA).

3. Resultados e discussão

A Tabela 3 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} , além dos valores de efeito, erro, teste t e p-valor, calculados a partir das planilhas eletrônicas, para cada uma das variáveis estudadas nesta etapa.

Tabela 3 – Matriz de níveis e resultados do primeiro conjunto de 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} , além dos valores de efeito, erro, teste t e p-valor das variáveis

Ensaio	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	Densidade de Potência (mWm ⁻²)	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	0,82
16	1	1	1	1	1	1	885,14	0,82
Efeito _{DP}	189,6	402,9	-402,9	-5,8	-189,6	373,4		
Erro _{DP}	±132,2	±132,2	±132,2	±132,2	±132,2	±132,2		
t(10) _{DP}	1,4	3,1	3,1	0,04	1,4	2,8		
p-val. _{DP}	0,2	0,01	0,01	1,0	0,2	0,02		
Efeito _{TE}	0,04	0,3	0,2	-0,1	-0,04	0,3		
Erro _{TE}	±0,05	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1		
t(10) _{TE}	0,4	2,7	1,9	1,1	0,4	2,7		
p-val. _{TE}	0,7	0,02	0,08	0,3	0,7	0,02		

Fonte: Próprio autor.

*Níveis das variáveis (+1 e -1) correspondentes aos limites de trabalho citados na seção 2. X₁: área do catodo; X₂: área do anodo; X₃: resistência elétrica externa; X₄: temperatura; X₅: tempo de residência; X₆: volume do dispositivo. DP: a densidade de potência; TE: tensão elétrica

**Para a média na densidade de potência, obteve-se 623,8 para o efeito, ± 66,1 para o erro, 9,4 para t(10) e 0,00 para p-valor. Já para a média na tensão elétrica, obteve-se 0,4 para o efeito, ± 0,05 para o erro, 7,7 para t(10) e 0,00 para p-valor.

Em estudos de planejamento experimental, 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, quando estiver em seu nível mais (+), a entrada impactará mais negativamente nas variáveis de saída (WANG et al., 2005). Assim, a partir dos dados da Tabela 3 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 (NITISORAVUT et al., 2017; DI LORENZO et al., 2010; WALTER et al., 2020).

Por outro lado, ainda de acordo dos dados da Tabela 3, 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 da literatura, nos quais verificou-se que valores de resistência elétrica externa, temperatura e tempo de residência elevados podem diminuir a potência gerada em células de energia microbiana (GONZÁLEZ DEL CAMPO et al., 2014; GADKARI et al., 2020; LONG et al., 2019).

Para a saída tensão elétrica, os dados da Tabela 3 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 observou que a tensão elétrica produzida por uma CEM pode ser aumentada por ampliar a área de superfície de seu catodo (OH et al., 2004), expandir o volume de seu anodo (ATNAFU e LETA, 2021), elevar sua resistência elétrica externa (GONZÁLEZ DEL CAMPO et al., 2014) e aumentar o volume do dispositivo (PRASAD & TRIPATHI, 2021). Em contra partida, os dados da Tabela 3 ainda 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 um grande aumento na temperatura operacional resulta na diminuição da tensão elétrica gerada na CEM (BEHERA et al., 2011) e que longos tempos de operação prejudicam a geração de tensão elétrica nesses dispositivos (LONG et al., 2019).

Em estudos de planejamento experimental, 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 α adotado, de modo que, se para uma variável $p \leq \alpha$, ela é significativa (SILVEIRA et al., 2017). Assim, analisando as informações apresentadas na Tabela 3 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 nessa análise, bem como suas interações.

Analogamente, considerando as informações apresentadas na mesma Tabela 3 para a tensão elétrica sob o nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), 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 para essa análise. 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. Devido a esses fatos, esses 3 fatores mais significantes – área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo – foram os selecionados para a execução do planejamento composto central, com o objetivo de obter informações estatísticas mais completas relacionadas a esses parâmetros e às saídas estudadas.

A Tabela 4 exibe os resultados das simulações computacionais obtidas para as saídas de densidade de potência e tensão elétrica considerando os fatores de entrada área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo aplicados ao planejamento DCCR realizado nas planilhas eletrônicas.

Tabela 4 – Matriz de níveis e resultados do segundo conjunto de simulações computacionais para as saídas de densidade de potência e tensão elétrica aplicados ao planejamento experimental do tipo DCCR

Ensaio	X ₁	X ₂	X ₃	Densidade de	
				Potência (mWm ⁻²)	Tensão Elétrica (mV)
1	-1	-1	-1	209,9	0,21
2	1	-1	-1	724,9	0,21
3	-1	1	-1	50,1	0,21
4	1	1	-1	209,9	0,46
5	-1	-1	1	724,7	0,21
6	1	-1	1	1637,1	0,46
7	-1	1	1	209,8	0,47
8	1	1	1	718,6	0,82
9	-1,682	0	0	459,9	0,21
10	1,682	0	0	1004,9	0,76
11	0	-1,682	0	1004,9	0,21
12	0	1,682	0	459,9	0,76
13	0	0	-1,682	459,9	0,21
14	0	0	1,682	1004,9	0,76
15	0	0	0	724,9	0,46
16	0	0	0	726,0	0,46
17	0	0	0	723,0	0,46

Fonte: Próprio autor.

*X₁: área do anodo (cm²), com 1 no nível -α, 380 no nível baixo, 940 no nível (0), 1500 no nível alto e 1880 no nível +α; X₂: resistência elétrica externa (Ω), com 100 no nível -α, 1955 no nível baixo, 4980 no nível (0), 8000 no nível alto e 10055 no nível +α; X₃: volume do dispositivo (mL), com 28 no nível -α, 9510 no nível baixo, 23530 no nível (0), 37550 no nível alto e 47085 no nível +α. -α: -1,682; nível baixo: -1; nível alto: +1; +α: (+1,682).

A Tabela 5 apresenta os valores de coeficiente, erro, teste t e p-valor, calculados a partir das planilhas eletrônicas, para cada uma das variáveis estudadas nas no planejamento DCCR.

Tabela 5 – Valores de coeficiente, erro, teste t e p-valor das variáveis empregadas no segundo conjunto de simulações computacionais e no planejamento experimental do tipo DCCR

Fator	Densidade de Potência (mWm ⁻²)				Tensão Elétrica (mV)			
	Coeficiente	Erro	t(2)	p-valor	Coeficiente	Erro	t(2)	p-valor
Média	735,7	± 0,87	841,3	1,4E-06	0,47	± 5E-04	810,0	1,5E-06
X ₁	220,6	± 0,41	537,1	3,5E-06	0,13	± 2E-04	480,3	4,3E-06
X ₂	-221,5	± 0,41	539,3	3,4E-06	0,13	± 2E-04	485,7	4,2E-06

X ₃	220,5	± 0,41	536,9	3,5E-06	0,13	± 2E-04	485,7	4,2E-06
X ₁₁	-35,5	± 0,45	78,5	1,6E-04	-0,01	± 3E-04	48,8	4,2E-04
X ₂₂	-35,5	± 0,45	78,5	1,6E-04	-0,01	± 3E-04	48,8	4,2E-04
X ₃₃	-35,5	± 0,45	78,5	1,6E-04	-0,01	± 3E-04	48,8	4,2E-04
X ₁₂	-94,8	± 0,54	176,7	3,2E-05	0,04	± 3E-04	123,7	6,5E-05
X ₁₃	93,3	± 0,54	173,9	3,3E-05	0,04	± 3E-04	123,7	6,5E-05
X ₂₃	-94,8	± 0,54	176,7	3,2E-05	0,05	± 3E-04	130,8	5,8E-05

Fonte: Próprio autor.

*X₁: área do anodo; X₂: resistência elétrica externa; X₃: volume do dispositivo; X₁₁: quadrado do fator área do anodo; X₂₂: quadrado do fator resistência elétrica externa; X₃₃: quadrado do fator volume do dispositivo; X₁₂: interação entre os fatores área do anodo e resistência elétrica externa; X₁₃: interação entre os fatores área do anodo e volume do dispositivo; X₂₃: interação entre os fatores resistência elétrica externa e volume do dispositivo.

De acordo com os dados da Tabela 5, todas as variáveis, bem como seus quadrados e interações, foram estatisticamente significativas para ambas as saídas estudadas nas condições pesquisadas sob um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), já que todos esses fatores apresentaram $p < 0,05$. 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: para densidade de potência (y_1), $y_1 = 735,7 + 220,5x_1 - 221,5x_2 + 220,5x_3 - 35,5x_{11} - 35,5x_{22} - 35,5x_{33} - 94,8x_{12} + 93,3x_{13} - 94,8x_{23}$; para a tensão elétrica (y_2), $y_2 = 0,5 + 0,1x_1 + 0,1x_2 + 0,1x_3 - 0,01x_{11} - 0,01x_{22} - 0,01x_{33} + 0,04x_{12} + 0,04x_{13} + 0,05x_{23}$. Nessas equações, os fatores x_i têm as seguintes correspondências: X₁: área do anodo; X₂: resistência elétrica externa; X₃: volume do dispositivo; X₁₁: quadrado do fator área do anodo; X₂₂: quadrado do fator resistência elétrica externa; X₃₃: quadrado do fator volume do dispositivo; X₁₂: interação entre os fatores área do anodo e resistência elétrica externa; X₁₃: interação entre os fatores área do anodo e volume do dispositivo; X₂₃: interação entre os fatores resistência elétrica externa e volume do dispositivo.

Considerando que uma CEM é um sistema complexo 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 por meio de seus principais processos operacionais para que avanços possam ocorrer nas aplicações dessa tecnologia (YAO et al., 2016), é possível perceber que o desenvolvimento de modelos matemáticos é uma relevante ferramenta nesse campo de estudo, já que seus métodos permitem a elaboração de representações mais simples dos sistemas das CEM e de seus mecanismos, bem com suas melhores compreensão e representação (HE & MA, 2016). Além disso, o desenvolvimento de modelos matemáticos é capaz de identificar fatores governantes na geração de eletricidade nas CEM, fornecendo orientações para estudos de aumento de escala desses dispositivos (JADHAV et al, 2021).

Os dados que compõe 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 6 e 7.

Tabela 6 – Dados da análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental do tipo DCCR da variável de saída densidade de potência

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Números de Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F	p
Regressão	2.238.959	9	248.773	9	4E-03
Resíduos	195.331	7	27.904		

Falta de Ajuste	195.326	5	39.065	16.960	6E-05
Erro Puro	5	2	2		
Total	2.238.959	16	248.773		
R ²			0,92		
Porcentagem Máxima de Variação Explicável			100%		

Fonte: Próprio autor.

*X₁: área do anodo; X₂: resistência elétrica externa; X₃: volume do dispositivo; X₁₁: quadrado do fator área do anodo; X₂₂: quadrado do fator resistência elétrica externa; X₃₃: quadrado do fator volume do dispositivo; X₁₂: interação entre os fatores área do anodo e resistência elétrica externa; X₁₃: interação entre os fatores área do anodo e volume do dispositivo; X₂₃: interação entre os fatores resistência elétrica externa e volume do dispositivo.

Tabela 6 – Dados da análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental do tipo DCCR da variável de saída densidade de potência

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Números de Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F	p
Regressão	0,75	9	0,08	9	5E-03
Resíduos	0,07	7	0,01		
Falta de Ajuste	0,07	5	0,01	13.773	7E-05
Erro Puro	2E-06	2	1E-06		
Total	0,82	16	0,08		
R ²			0,92		
Porcentagem Máxima de Variação Explicável			100%		

Fonte: Próprio autor.

*X₁: área do anodo; X₂: resistência elétrica externa; X₃: volume do dispositivo; X₁₁: quadrado do fator área do anodo; X₂₂: quadrado do fator resistência elétrica externa; X₃₃: quadrado do fator volume do dispositivo; X₁₂: interação entre os fatores área do anodo e resistência elétrica externa; X₁₃: interação entre os fatores área do anodo e volume do dispositivo; X₂₃: interação entre os fatores resistência elétrica externa e volume do dispositivo.

Tendo em mente que quanto mais próximo o valor de R² 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 R² obtidos nos cálculos das planilhas eletrônicas – 0,92 para ambos os casos –, verifica-se um indicativo que os modelos gerados apresentaram bons ajustes aos dados de trabalhos. Essa observação é reforçada pelo fato de que os p-valores dos F calculados obtidos terem sido inferiores a 0,05, o que indica que o modelo é estatisticamente significativo sob um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$).

4. Conclusão

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, foi possível identificar que, das variáveis de entrada estudadas, os parâmetros área do catodo, área do anodo e volume do dispositivo foram aquelas que apresentaram efeitos positivos na saída densidade de potência. Já para a saída tensão elétrica, área do catodo, área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo foram os parâmetros que apresentaram esse efeito. Ademais, foi possível identificar que, nas condições pesquisadas, para a

densidade de potência, as variáveis área do anodo, resistência elétrica externa e volume do dispositivo se apresentaram como mais significantes, e, para a variável-saída tensão elétrica, os parâmetros área do anodo e volume do dispositivo se apresentaram como mais relevantes.

Na etapa posterior da pesquisa, todas as variáveis estudadas – área do anodo, resistência elétrica e volume do dispositivo –, bem como seus quadrados e interações, foram estatisticamente significativas para ambas as saídas nas condições estabelecidas. Além disso, nessa mesma etapa, foi possível obter equações-modelo que apontaram a relação entre cada uma das variáveis de entrada e as saídas pesquisadas, contribuindo para a simplificação do estudo dos complexos sistemas das CEM. Nesse contexto, é importante destacar que as ferramentas de simulação computacional e planejamento experimental possibilitaram alcançar resultados relevantes nesse trabalho, poupando experimentos práticos e minimizando o consumo de reagentes e a geração de resíduos, sobretudo quando considera-se que as faixas de trabalho das variáveis dessa pesquisa foram 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 – o que reforça que os valores de R^2 obtidos foram expressivos.

Referências

- 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 Vol. 10, p. 1-16, 2021. Página em: <https://environmentalsystemsresearch.springeropen.com/articles/10.1186/s40068-021-00234-4>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- BEHERA, M.; MURTHY, S. & GHANGREKAR, M. *Effect of operating temperature on performance of microbial fuel cell*. Water Science & Technology Vol. 64, p. 917-922, 2011. Página em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22097080/>. Acesso em: 9 mar. 2023.
- CARDOZO, M. H. A. L.; NUCCI, E. R. *Células de Energia Microbiana: Uma Tecnologia para Biotratamento de Efluente Aliado à Biogeração de Energia Elétrica*. Sustentabilidade – Conceito Articulador de Saberes e Práticas, 2022.
- CHEN, G.; ZHANG, S.; LI, M. & WEI, Y. *Simultaneous pollutant removal and electricity generation in denitrifying microbial fuel cell with boric acid-borate buffer solution*. Water Science & Technology Vol. 71, p. 783-788, 2015. Página em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25768227/>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- DI LORENZO, M.; SCOTT, K.; CURTIS, T. & HEAD, I. *Effect of increasing anode surface area on the performance of a single chamber microbial fuel cell*. Chemical Engineering Journal Vol. 156, p. 50-58, 2010. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894709006743>. Acesso em: 8 mar. 2023.
- GADKARIA, S.; FONTMORIN, J.; YU, E. & SADHUKHAN, J. *Influence of temperature and other system parameters on microbial fuel cell performance: Numerical and experimental investigation*. Chemical Engineering Journal Vol. 338, p. 124176, 2020. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894720301674>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- GONZÁLEZ DEL CAMPO, A.; CANIZARES, P.; LOBATO, J.; RODRIGO, M. & MORALES, F. *Effects of External Resistance on Microbial Fuel Cell's Performance*. Environment, Energy and Climate Change II. The Handbook of Environmental Chemistry Vol. 34, p. 175-197, 2014.
- GUDE, V. G. *Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 45, p. 52-68, 2015. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115000659>. Acesso em: 9 mar. 2023.
- HE, Y. & MA, Z. *A data-driven Gaussian process regression model for two-chamber microbial fuel cells*.

Fuel Cells Vol. 16, p. 365-376, 2016. Página em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/face.201500109>. Acesso em: 11 mar. 2023.

HIDALGO, D.; TOMMASI, T.; CAUDA, V.; PORRO, S.; CHIODONI, A.; BEJTKA, K. & RUGGERI, B. *Streamlining of commercial Berl saddles: A new material to improve the performance of microbial fuel cells.* Energy Vol. 71, p. 615-623, 2014. Página em: <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v71y2014icp615-623.html>. Acesso em: 9 mar. 2023.

JADHAV, D.; CARMONA-MARTÍNEZ, A.; CHENDAKE, A.; PANDIT, S. & PANT, D. *Modeling and optimization strategies towards performance enhancement of microbial fuel cells.* Bioresource Technology Vol. 320, p. 124256, 2021. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420315303>. Acesso em: 13 mar. 2023.

LONG, X.; CAO, X.; SONG, H.; NISHIMURA, O. & LI, X. *Characterization of electricity generation and microbial community structure over long-term operation of a microbial fuel cell.* Bioresource Technology Vol. 285, p. 121395, 2019. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241930625X>. Acesso em: 13 mar. 2023.

MAZZER, C. & CAVALCANTI, O. *Introdução à gestão Ambiental de resíduos* Vol. 16, p. 66-77, 2004.

NASEER, M.; ZAIDI, A.; KHAN, H.; KUMAR, S.; OWAIS, M.; JAAFAR, J.; SUHAIMIN, N.; WAHAB, Y.; DUTTA, K.; ASIF, M. & HATTA, UZAIR, M. *Mapping the field of microbial fuel cell: A quantitative literature review (1970–2020).* Energy Reports Vol.7, p. 4126-4138, 2021. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721004479>. Acesso em: 8 mar. 2023.

NATH, A.; MISHRA, A. & PANDE, P. *A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment.* Materials Today: Proceedings Vol. 46, p. 6113-6117, 2021. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320323324>. Acesso em: 15 mar. 2023.

NITISORAVUT, R.; THANH, C. & REGMI, R. *Microbial fuel cells: Advances in electrode modifications for improvement of system performance.* International Journal of Green Energy Vol. 14, n. 8, p. 712-723, 2017. Página em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15435075.2017.1326049?journalCode=ljge20>. Acesso em: 09 mar. 2023.

OH, S.; MIN, B. & LOGAN, B. *Cathode Performance as a Factor in Electricity Generation in Microbial Fuel Cells.* Environmental Science & Technology Vol. 38, p. 4900-4904, 2004. Página em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15487802/>. Acesso em: 12 mar. 2023.

OLIVEIRA, V.; SIMÕES, M.; MELO, L. & PINTO, A.M.F.R. *Overview on the developments of microbial fuel cells.* Biochemical Engineering Journal Vol. 73, p. 53-64, 2013. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X13000235>. Acesso em: 7 mar. 2023.

PEREIRA, F.M.V. & PEREIRA-FILHO, E.R. *Aplicação de programa computacional livre em planejamento de experimentos: Um tutorial.* Quim. Nova Vol. 41, n. 9, p. 1061-1071, 2018. Página em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/tV8spcx7Qny86z8xGpDSbvH/abstract/?format=html&lang=en>. Acesso em: 14 mar. 2023.

PRASAD, J. & TRIPATHI, R.K. *Scale-up and control the voltage of sediment microbial fuel cell for charging a cell phone.* Biosensors and Bioelectronics Vol. 172, p. 112767, 2021. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956566320307545>. Acesso em: 10 mar. 2023.

RAHIMNEJAD, M.; ADHAMI, A.; DARVARI, S.; ZIREPOUR, A. & OH, S. *Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review.* Alexandria Engineering Journal Vol. 54, p. 745-756, 2015. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815000484>. Acesso em: 10 mar. 2023.

RAMÓN-FERNÁNDEZ, A.; SALAR-GARCÍA, M.J.; RUIZ-FERNÁNDEZ, D.; GREENMANA, J. & IEROPOULOS, I. *Modelling the energy harvesting from ceramic-based microbial fuel cells by using a fuzzy logic approach.* Applied Energy Vol. 251, p. 113321, 2019. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191930995X>. Acesso em: 6 mar. 2023.

SILVEIRA, M.V.; LOPES, T.J. & ROSA, G.R. *N-arilac,ão do imidazol via CuI: um tutorial para otimização de um sistema catalítico através do planejamento experimental.* Educación Química Vol. 28, n. 1, p. 44-50, 2017. Página em: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2017000100005. Acesso em: 12 mar. 2023.

SUGANTHI, L.; INIYAN, S. & SAMUEL, A.A. *Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 48, p. 585-607, 2015. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211500307X>. Acesso em: 11 mar. 2023.

TEÓFILO, R.F. & FERREIRA, M.M.C. *Quimiometria II: Planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial*. Química Nova Vol. 29, n. 2, p. 338-350, 2006. Página em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/JwRbS5DqdGmVMcb3M3xLrfJ/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

TRAPERO, J.R.; HORCAJADA, L.; LINARES, J.J. & LOBATO, J. *Is microbial fuel cell technology ready? An economic answer towards industrial commercialization*. Applied Energy Vol. 185, p. 698-707, 2017. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916315562>. Acesso em: 14 mar. 2023.

WALTER, X.A.; SANTORO, C.; GREENMAN, J. & IEROPOULOS, I. *Scaling up self-stratifying supercapacitive microbial fuel cell*. ScienceDirect Vol. 45, p. 25240-25248, 2020. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920322072>. Acesso em: 11 mar. 2023.

WANG, Y.; YANG, B.; REN, J.; DONG, M.; LIANG, D. & XU, A. *Optimization of medium composition for the production of clavulanic acid by Streptomyces clavuligerus*. Process Biochemistry, Vol. 40, p. 1161-1166, 2005. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032959204001608>. Acesso em: 10 mar. 2023.

YAO, S.; HE, Y.; SONG, B. & LI, X. *A two-dimensional, two-phase mass transport model for microbial fuel cells*. Electrochimica Acta Vol. 212, p. 201-211, 2016. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468616314967>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. Information and Control Vol. 8, n. 3, p. 338-353, 1965. Página em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>. Acesso em: 7 mar. 2023.