

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
CAMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MICROCANAIS BIOINSPIRADOS OTIMIZADOS PELO ALGORITMO *SLIME MOLD*
APLICADOS À DISTRIBUIÇÃO DE REAGENTES EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL
DO TIPO PEM

SANTYAGO FERREIRA ANDRADE

Rio Verde – GO

2026

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
CAMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MICROCANAIS BIOINSPIRADOS OTIMIZADOS PELO ALGORITMO *SLIME MOLD*
APLICADOS À DISTRIBUIÇÃO DE REAGENTES EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL
DO TIPO PEM

SANTYAGO FERREIRA ANDRADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão.

Rio Verde – GO

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano
- SIBi**

Ferreira Andrade, Santiago

A554 MICROCANAIS BIOINSPIRADOS OTIMIZADOS PELO
ALGORITMO SLIME MOLD APLICADOS À DISTRIBUIÇÃO DE
REAGENTES EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM /
Santiago Ferreira Andrade. Rio Verde 2026.

59f. il.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão.

Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220354 -
Bacharelado em Engenharia Química - Integral - Rio Verde (Campus Rio
Verde).

I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese (doutorado) | ☐ Artigo científico |
| ☐ Dissertação (mestrado) | ☐ Capítulo de livro |
| ☐ Monografia (especialização) | ☐ Livro |
| ☒ TCC (graduação) | ☐ Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Santiago Ferreira Andrade

Matrícula:

2023102203540100

Título do trabalho:

MICROCANAIS BIOINSPIRADOS OTIMIZADOS PELO ALGORITMO SLIME MOLD APLICADOS NA DISTRIBUIÇÃO DE REAGENTES EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 06 / 08 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
SANTIAGO FERREIRA ANDRADE
Data: 06/08/2024 13:58:42 -0300
Verifique em: <https://verificar.ifgo.br>

Rio Verde

Local

06 / 08 / 2026

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente
HUGO LEONARDO SOUZA LARA LENO
Data: 06/08/2024 13:58:42 -0300
Verifique em: <https://verificar.ifgo.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 50/2026 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao 01º dia do mês de julho de dois mil e vinte e seis, às 15:00 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Hugo Leonardo Souza Lara Leão, Prof. Rogério Favareto e Prof. João Areis Ferreira Barbosa Junior, para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "Microcanais bioinspirados otimizados pelo algoritmo Slime Mold para distribuição de reagentes em células a combustível PEM" de Santyago Ferreira Andrade, estudante do curso de Engenharia Química do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2023102203540100. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Hugo Leonardo Souza Lara Leão

Orientador(a)

(Assinado Eletronicamente)

Rogério Favareto

Membro

(Assinado Eletronicamente)

João Areis Ferreira Barbosa Junior

Membro

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Hugo Leonardo Souza Lara Leao, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 08/07/2026 16:57:24.
- **Rogério Favareto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 08/07/2026 17:58:51.
- **Joao Areis Ferreira Barbosa Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 08/07/2026 18:25:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 01/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 836837

Código de Autenticação: eadb514247



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão, pelo acompanhamento e pelas contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, aos colegas de curso e aos familiares que contribuíram direta ou indiretamente para a construção deste estudo.

RESUMO

O desempenho de células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC) depende da eficiência com que os reagentes são distribuídos pelos canais das placas bipolares, pois a má distribuição dos gases gera regiões de baixa renovação, perdas por transporte de massa e aumento da perda de carga. Este trabalho avaliou, por dinâmica dos fluidos computacional (CFD), uma geometria bioinspirada de microcanais baseada em ramificações pulmonares e otimizada por um algoritmo inspirado no comportamento do *Physarum polycephalum*, denominado Slime Mold, comparando-a com uma geometria convencional de canais paralelos. As geometrias foram geradas em Python, ajustadas em software CAD, exportadas em STL na escala de milímetros, discretizadas no OpenFOAM com *blockMesh* e *snappyHexMesh* e simuladas com o solver *simpleFoam*, considerando escoamento monofásico, incompressível e isotérmico de ar. Foram estudados seis casos, combinando as duas geometrias com três condições operacionais: vazão de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (condição realista), vazão de $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (vazão elevada) e diferença de pressão de 200 kPa para 100 kPa (análise de sensibilidade à pressão). Na condição realista, a geometria bioinspirada apresentou perda de carga de 1,198 kPa, contra 0,639 kPa da convencional, ambas em regime laminar ($\text{Re} \approx 1586$ e 1599). Na condição de vazão elevada, as perdas foram de 5,696 kPa e 3,078 kPa, respectivamente. Sob pressão elevada, a geometria convencional conduziu $158,70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, contra $135,43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ da bioinspirada. A geometria convencional apresentou, portanto, menor resistência hidráulica em todas as condições avaliadas, enquanto a bioinspirada demonstrou viabilidade metodológica de geração, discretização e simulação, mas ainda requer suavização das bifurcações, redimensionamento dos canais e equalização hidráulica dos caminhos de escoamento. Ressalta-se que a comparação é de natureza estritamente hidráulica, sem camada difusora de gás, sem água líquida e sem acoplamento eletroquímico, de modo que os resultados não representam o desempenho eletroquímico completo de uma PEMFC.

Palavras-chave: células a combustível; PEMFC; microcanais; bioinspiração; Slime Mold; CFD; grafos; otimização de canais.

ABSTRACT

The performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) depends on how efficiently the reactants are distributed along the channels of the bipolar plates, since poor gas distribution produces regions of low renewal, mass transport losses and increased pressure drop. This work evaluated, through computational fluid dynamics (CFD), a bioinspired microchannel geometry based on pulmonary branching and optimized by an algorithm inspired by the behavior of *Physarum polycephalum*, known as Slime Mold, comparing it with a conventional parallel-channel geometry. The geometries were generated in Python, adjusted in CAD software, exported as STL files at the millimeter scale, discretized in OpenFOAM with *blockMesh* and *snappyHexMesh*, and simulated with the *simpleFoam* solver, considering single-phase, incompressible and isothermal air flow. Six cases were studied, combining the two geometries with three operating conditions: a flow rate of $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (realistic condition), a flow rate of $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (high-flow condition) and a pressure difference from 200 kPa to 100 kPa (pressure sensitivity analysis). Under the realistic condition, the bioinspired geometry presented a pressure drop of 1.198 kPa against 0.639 kPa for the conventional geometry, both in laminar regime ($\text{Re} \approx 1586$ and 1599). Under the high-flow condition, the pressure drops were 5.696 kPa and 3.078 kPa, respectively. Under elevated pressure, the conventional geometry carried $158.70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ against $135.43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for the bioinspired one. The conventional geometry therefore presented lower hydraulic resistance under all evaluated conditions, while the bioinspired geometry demonstrated the methodological feasibility of generation, discretization and simulation, but still requires smoothing of the bifurcations, channel resizing and hydraulic equalization of the flow paths. It should be emphasized that the comparison is strictly hydraulic, without a gas diffusion layer, liquid water or electrochemical coupling, so the results do not represent the complete electrochemical performance of a PEMFC.

Keywords: fuel cells; PEMFC; microchannels; bioinspiration; Slime Mold; CFD; Graphs; channel optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma das etapas metodológicas do trabalho.....	20
Figura 2 - Grafo pulmonar bioinspirado inicial	21
Figura 3 - Grafo otimizado pelo algoritmo Slime Mold	23
Figura 4 - Convergência do algoritmo Slime Mold ao longo das iterações	23
Figura 5 - Geometria Slime Mold com coletor reverso bioinspirado	25
Figura 6 - Geometria convencional de canais paralelos com entrada e saída únicas	26
Figura 7 – Geometria convencional malha	27
Figura 8 - Geometria slime mold malha	28
Figura 9 – Desenho das condições de contorno	29
Figura 10 - Campo de pressão cinemática da geometria Slime Mold	37
Figura 11 - Campo de magnitude de velocidade da geometria Slime Mold	37
Figura 12 - Linhas de corrente da geometria Slime Mold	38
Figura 13 - Campo de pressão cinemática da geometria convencional	40
Figura 14 - Campo de magnitude de velocidade da geometria convencional	41
Figura 15 - Linhas de corrente da geometria convencional	41
Figura 16 - Campo de pressão da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (início da convergência)	45
Figura 17 - Campo de pressão da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (convergência intermediária)	45
Figura 18 - Campo de pressão da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (solução final)	46
Figura 19 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (início da convergência)	46
Figura 20 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (convergência intermediária)	47
Figura 21 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (convergência avançada)	47
Figura 22 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (solução final)	48
Figura 23 - Campo de pressão da geometria convencional na condição de pressão elevada ...	48

Figura 24 - Campo de magnitude de velocidade da geometria convencional na condição de pressão elevada	49
Figura 25 - Pressão da geometria bioinspirada na condição de vazão elevada	49
Figura 26 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada na condição de vazão elevada	50
Figura 27 – Pressão da geometria convencional na condição de vazão elevada	50
Figura 28 - Campo de magnitude de velocidade da geometria convencional na condição de vazão elevada	51
Figura 29 - Pressão da geometria convencional na condição realista	51
Figura 30 – Campo de magnitude de velocidade da geometria convencional na condição realista	52
Figura 31 – Pressão da geometria bioinspirada na condição realista	52
Figura 32 – Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada na condição realista.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de contorno adotadas nas simulações.....	29
Tabela 2 - Grandezas calculadas a partir das soluções convergidas.....	31
Tabela 3 - Casos estudados nas simulações CFD.....	31
Tabela 4 - Comparação quantitativa entre as geometrias.....	42
Tabela 5 - Resultados das simulações em condições operacionais de PEMFC.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla	Descrição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
GDL	Camada Difusora de Gás
PEM	Membrana de Troca de Prótons
PEMFC	Célula a combustível de membrana de troca de prótons
STL	Standard Tessellation Language
UI	Índice de uniformidade
CV	Coeficiente de variação

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Reação eletroquímica no ânodo.....	16
Equação 2 - Reação eletroquímica no cátodo	16
Equação 3 - Reação global da célula	16
Equação 4 - Diâmetro hidráulico	17
Equação 5 - Vazão em cada aresta (modelo <i>Slime Mold</i>)	18
Equação 6 - Atualização da condutividade	18
Equação 7 - Largura física dos canais.....	18
Equação 8 - Conservação de massa (continuidade)	19
Equação 9 - Conservação da quantidade de movimento	19
Equação 10 - Queda de pressão	30
Equação 11 - Erro relativo de vazão	30
Equação 12 - Coeficiente de variação	30
Equação 13 - Índice de uniformidade	30

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Células a combustível do tipo PEM.....	13
3.2 Placas bipolares, microcanais e campos de escoamento.....	14
3.3 Bioinspiração e redes ramificadas	14
3.4 Physarum polycephalum e algoritmo Slime Mold	15
3.5 Dinâmica dos Fluidos Computacional e OpenFOAM.....	16
4 METODOLOGIA.....	16
4.1 Caracterização geral do estudo	16
4.2 Geração do grafo pulmonar bioinspirado	17
4.3 Otimização Slime Mold.....	19
4.4 Conversão para STL e construção do coletor reverso	21
4.5 Geometria convencional de comparação	22
4.6 Geração de malha no OpenFOAM	23
4.7 Condições de contorno e solver	25
4.8 Métricas de perda de carga, vazão e uniformidade.....	27
4.9 Condições operacionais de pressão e vazão	28
4.10 Síntese dos casos estudados.....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1 Convergência do algoritmo Slime Mold.....	30
5.2 Simulações preliminares com velocidade prescrita	31

5.3 Correção de escala e nova condição de contorno por pressão	31
5.4 Resultados da geometria Slime Mold com escala corrigida e pressão imposta	32
5.5 Resultados da geometria convencional com escala corrigida e pressão imposta	36
5.6 Comparação quantitativa entre as geometrias	39
5.7 Análise das condições operacionais de pressão e vazão na célula a combustível ...	40
5.8 Discussão dos resultados	51
5.9 Limitações do estudo	52
6. CONCLUSÃO	53

1. INTRODUÇÃO

A demanda por sistemas energéticos de menor impacto ambiental tem ampliado o interesse por tecnologias capazes de converter energia química em energia elétrica com elevada eficiência e baixa emissão de poluentes. Nesse cenário, as células a combustível do tipo membrana de troca de prótons, ou PEMFC, destacam-se por operarem em temperaturas relativamente baixas, apresentarem partida rápida e possuírem potencial de aplicação em mobilidade, geração distribuída e sistemas estacionários de energia (O'HAYRE et al., 2016).

Apesar das vantagens das PEMFCs, seu desempenho não depende apenas dos materiais eletroquímicos empregados, mas também da forma como hidrogênio e oxigênio são distribuídos sobre a área ativa. A placa bipolar, além de conduzir corrente elétrica e auxiliar no gerenciamento térmico, contém os canais de escoamento responsáveis pela alimentação dos reagentes e pela remoção da água formada no cátodo. Assim, a geometria desses canais influencia diretamente a perda de pressão, a uniformidade de distribuição, a remoção de água e as perdas por transporte de massa (LI; SABIR, 2005).

Geometrias convencionais, como canais paralelos, serpentinas e campos interdigitados, são amplamente utilizadas em estudos e protótipos de PEMFC. Nos campos interdigitados, os canais de alimentação e os canais de exaustão não são conectados diretamente entre si: cada canal de entrada termina em uma extremidade fechada, de modo que o gás é forçado a atravessar a camada difusora para alcançar o canal de saída adjacente, o que intensifica o transporte convectivo sob os ressaltos, mas eleva a perda de carga. Cada configuração, no entanto, apresenta limitações. Canais paralelos tendem a reduzir a perda de carga, mas podem apresentar má distribuição entre canais quando os *manifolds* não são adequadamente dimensionados. Os *manifolds*, ou coletores, são os canais de maior seção transversal que recebem o gás na entrada da placa, distribuem-no entre os canais individuais e o reúnem novamente na saída; quando subdimensionados, concentram o escoamento em poucos canais e comprometem a uniformidade da distribuição. Serpentinas, por sua vez, favorecem a remoção de água e forçam o escoamento a percorrer a área ativa, mas podem elevar significativamente a perda de pressão.

A bioinspiração surge como alternativa para o desenvolvimento de novas geometrias de canais. Redes naturais, como nervuras foliares, vasos sanguíneos e ramificações pulmonares, realizam transporte de fluidos de maneira distribuída, hierárquica e adaptada à função biológica.

Essas estruturas podem fornecer princípios úteis para a criação de campos de escoamento mais eficientes, principalmente quando combinadas com técnicas computacionais de otimização (BEJAN; LORENTE, 2008; IRANZO et al., 2020).

No presente trabalho, a bioinspiração foi explorada a partir de duas ideias complementares. A primeira consiste na geração de uma rede ramificada semelhante a uma árvore pulmonar, adequada à distribuição de gases. A segunda utiliza um algoritmo inspirado no comportamento do *Physarum polycephalum*, organismo conhecido por formar redes adaptativas de transporte. Esse algoritmo, denominado neste trabalho como Slime Mold, reforça caminhos de maior fluxo e reduz a relevância de trajetórias menos utilizadas, permitindo transformar uma rede inicial em uma geometria de canais com larguras variáveis.

A proposta foi avaliada por meio de simulações de dinâmica dos fluidos computacional no OpenFOAM. Até a etapa atual, foram desenvolvidas geometrias bioinspiradas e convencionais, ambas com entrada e saída únicas, discretizadas por *blockMesh* e *snappyHexMesh* e simuladas com o solver *simpleFoam*. Além da perda de carga e da vazão, também foram incluídas visualizações no ParaView e métricas de uniformidade do campo de velocidade.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar, por meio de simulação fluidodinâmica computacional, o desempenho de uma geometria de microcanais bioinspirada em ramificações pulmonares e otimizada por algoritmo Slime Mold, aplicada à distribuição de reagentes em células a combustível do tipo PEM, comparando-a com uma geometria convencional de canais paralelos sob as mesmas condições de contorno.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver computacionalmente uma rede ramificada bioinspirada com entrada principal e 32 terminais de distribuição.
- Aplicar um algoritmo inspirado no *Physarum polycephalum* para otimizar condutividades, fluxos e larguras dos canais.
- Converter a rede otimizada em geometria tridimensional do tipo STL, adequada à geração de malha no OpenFOAM.

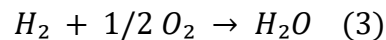
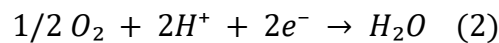
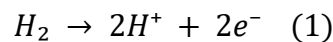
- Construir uma geometria convencional de canais paralelos com entrada e saída únicas para comparação.
- Gerar malhas computacionais por *blockMesh* e *snappyHexMesh*, avaliando indicadores de qualidade por *checkMesh*.
- Simular o escoamento incompressível e laminar com o solver *simpleFoam*.
- Comparar queda de pressão, vazão, estabilidade numérica e uniformidade de velocidade entre as geometrias estudadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Células a combustível do tipo PEM

As células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem diretamente a energia química de um combustível em energia elétrica, com produção simultânea de calor e, no caso do hidrogênio, água. Nas PEMFCs, o eletrólito é uma membrana polimérica condutora de prótons, e as reações principais ocorrem no ânodo e no cátodo. No ânodo, o hidrogênio é oxidado, liberando prótons e elétrons; no cátodo, o oxigênio é reduzido e reage com os prótons para formar água (O'HAYRE et al., 2016).

Embora este trabalho não simule diretamente os fenômenos eletroquímicos, as reações fundamentais justificam a importância do transporte adequado de hidrogênio e oxigênio até a região ativa. A Equação 1 descreve a semirreação de oxidação do hidrogênio no ânodo, a Equação 2 representa a semirreação de redução do oxigênio no cátodo e a Equação 3 corresponde à reação global da célula.



Em que H_2 é o hidrogênio molecular alimentado no ânodo; O_2 é o oxigênio molecular alimentado no cátodo; H^+ é o próton transportado através da membrana; e^- é o elétron conduzido pelo circuito externo; e H_2O é a água formada no cátodo. Todas as espécies são expressas em base molar.

O desempenho de uma PEMFC é afetado por perdas de ativação, perdas ôhmicas e perdas por transporte de massa. Entre essas parcelas, as perdas por transporte de massa estão fortemente

relacionadas ao fornecimento local de reagentes, à remoção de água e à capacidade dos canais em distribuir o fluxo ao longo da área ativa.

3.2 Placas bipolares, microcanais e campos de escoamento

As placas bipolares exercem múltiplas funções em uma PEMFC: distribuem os gases reagentes, removem produtos, contribuem para o gerenciamento térmico, oferecem suporte mecânico e conduzem corrente elétrica. O desenho dos canais contidos nessas placas modifica a distribuição de pressão, velocidade e concentração, influenciando diretamente a eficiência global do dispositivo (LI; SABIR, 2005; MARAPPAN et al., 2021).

Microcanais possuem dimensões reduzidas e elevada razão área-volume. Essa característica favorece fenômenos de transferência, mas também torna o escoamento sensível a pequenas variações geométricas, como mudanças de seção, bifurcações, rugosidade e curvas. Em escoamentos internos, o diâmetro hidráulico é frequentemente utilizado para comparar canais de diferentes seções transversais, conforme a Equação 4 (KANDLIKAR, 2005; SHAH; LONDON, 1978).

$$D_h = \frac{4A_c}{P_m} \quad (4)$$

Em que D_h é o diâmetro hidráulico da seção (m); A_c é a área da seção transversal do canal (m^2); e P_m é o perímetro molhado da seção (m).

3.3 Bioinspiração e redes ramificadas

A bioinspiração utiliza princípios observados em sistemas naturais para propor soluções de engenharia. Em redes de transporte, estruturas biológicas como pulmões, folhas e vasos sanguíneos apresentam ramificação hierárquica e distribuição eficiente de fluidos (WEIBEL, 1963). Tais estruturas não devem ser copiadas apenas por semelhança visual, mas analisadas em termos de função: distribuição, coleta, redundância, redução de gradientes e adaptação à demanda local (BEJAN; LORENTE, 2008; BEJAN; ZANE, 2012).

No caso de PEMFCs, revisões sobre campos biomiméticos indicam que geometrias inspiradas em folhas, pulmões e padrões fractais vêm sendo investigadas para melhorar distribuição de reagentes e gerenciamento de água. Entretanto, a literatura também aponta que a comparação

deve considerar simultaneamente perda de carga e uniformidade, pois uma geometria pode distribuir melhor o fluido ao custo de maior resistência ao escoamento (IRANZO et al., 2020).

3.4 *Physarum polycephalum* e algoritmo Slime Mold

O *Physarum polycephalum* é um organismo capaz de formar redes tubulares adaptativas durante a busca por alimento. O experimento de Nakagaki, Yamada e Tóth (2000) mostrou que esse organismo pode encontrar caminhos eficientes em labirintos, o que motivou modelos matemáticos de otimização de redes. Posteriormente, Tero, Kobayashi e Nakagaki (2007) propuseram uma formulação baseada na adaptação das condutividades de uma rede em função do fluxo. Modelos posteriores comprovaram formalmente que a dinâmica do *Physarum* converge para caminhos eficientes em redes (TERO et al., 2010; BONIFACI; MEHLHORN; VARMA, 2012).

No modelo adotado, a rede é tratada como um conjunto de tubos condutores ligando nós de pressão: a Equação 5 fornece a vazão em cada aresta a partir da condutividade da aresta e da diferença de potencial de pressão entre seus nós; a Equação 6 descreve a atualização iterativa da condutividade em função do fluxo, reforçando as arestas mais utilizadas e enfraquecendo as demais; e a Equação 7 converte o fluxo da rede convergida na largura física de cada canal.

$$Q_{ij} = \left(\frac{D_{ij}}{L_i}\right)(p_i - p_j) \quad (5)$$

$$D_{ij}^{k+1} = D_{ij}^k + \Delta t(|Q_{ij}|^\gamma - \mu D_{ij}^k) \quad (6)$$

$$w_{ij} = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min})[(|Q_{ij}| - Q_{\min})/(Q_{\max} - Q_{\min})]^\beta \quad (7)$$

Em que Q_{ij} é a vazão na aresta que liga os nós i e j ($m^3 \cdot s^{-1}$); D_{ij} é a condutividade da aresta (adimensional, no modelo normalizado); L_i é o comprimento da aresta (m); p_i e p_j são os potenciais de pressão nos nós i e j (Pa); k é o índice da iteração; Δt é o passo adimensional de atualização; γ é o expoente de reforço do fluxo (adimensional); μ é a taxa de decaimento da condutividade (adimensional); w_{ij} é a largura física do canal correspondente à aresta (mm); $w_{\min}$ e $w_{\max}$ são as larguras mínima e máxima admitidas para os canais (mm); $Q_{\min}$ e $Q_{\max}$ são os fluxos mínimo e máximo obtidos na rede convergida ($m^3 \cdot s^{-1}$); e β é o expoente que controla a progressão das larguras (adimensional).

No presente estudo, os fluxos calculados pelo algoritmo foram utilizados para definir as larguras físicas dos canais. Assim, o tronco principal e os ramos de maior fluxo receberam seções mais largas, enquanto ramos de menor contribuição permaneceram mais estreitos.

3.5 Dinâmica dos Fluidos Computacional e OpenFOAM

A Dinâmica dos Fluidos Computacional permite resolver numericamente as equações de conservação aplicadas ao escoamento, fornecendo campos de velocidade, pressão e outras grandezas de interesse. Em geometrias internas de microcanais, a CFD permite observar regiões de recirculação, estagnação e distribuição desigual que seriam difíceis de medir experimentalmente em uma etapa inicial de projeto (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016).

O OpenFOAM é uma plataforma aberta baseada no método dos volumes finitos, adequada para simulações em geometrias complexas e para personalização de condições de contorno. O solver simpleFoam, empregado neste trabalho, resolve escoamentos incompressíveis em regime permanente (WELLER et al., 1998; JASAK, 1996).

As equações de conservação resolvidas pelo solver são apresentadas a seguir: a Equação 8 corresponde à conservação de massa, ou equação da continuidade para escoamento incompressível, e a Equação 9 à conservação da quantidade de movimento em regime permanente.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \cdot (UU) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla U) \quad (9)$$

Em que U é o vetor velocidade do escoamento ($m \cdot s^{-1}$); ∇ é o operador nabla (m^{-1}); p é a pressão cinemática, isto é, a pressão dividida pela massa específica ($m^2 \cdot s^{-2}$); e ν é a viscosidade cinemática do fluido ($m^2 \cdot s^{-1}$).

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização geral do estudo

O trabalho foi conduzido por modelagem computacional, geração geométrica e simulação CFD. As geometrias foram construídas com o auxílio de programação em Python e de software CAD de desenho técnico, e a metodologia foi organizada em sete etapas principais: geração do grafo bioinspirado, otimização pelo algoritmo *Slime Mold*, conversão da rede em geometria tridimensional, construção da geometria convencional, geração de malha no *OpenFOAM*, simulação CFD e pós-processamento dos campos de velocidade e pressão.

A Figura 1 sintetiza, em forma de fluxograma, a sequência metodológica adotada, desde a geração do grafo bioinspirado até o pós-processamento dos campos de velocidade e pressão. As etapas são detalhadas nas seções seguintes.

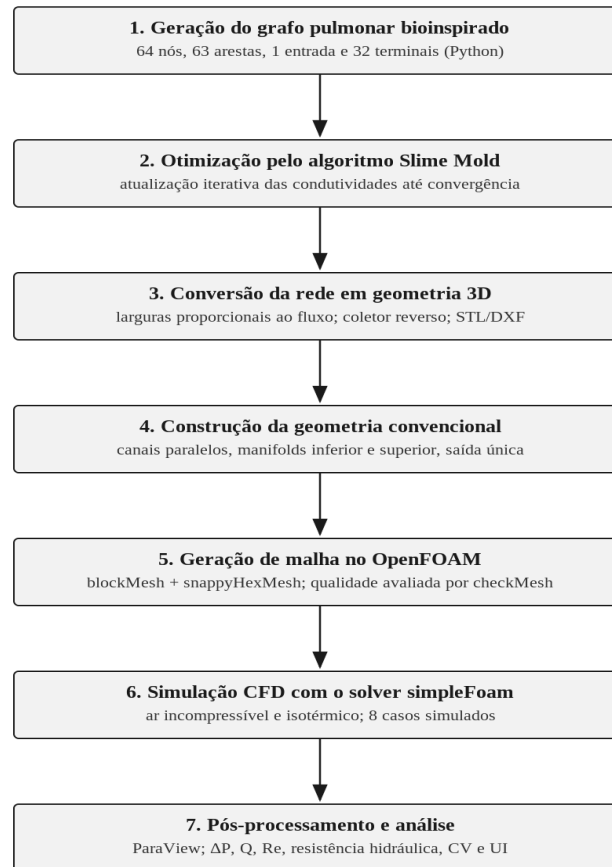


Figura 1 - Fluxograma das etapas metodológicas do trabalho.

Fonte: Autor (2026).

4.2 Geração do grafo pulmonar bioinspirado

A rede inicial foi gerada em Python como um grafo bidimensional inspirado em ramificações pulmonares. O grafo foi composto por 64 nós e 63 arestas, com uma entrada principal e 32 nós terminais. A estrutura foi criada por bifurcações sucessivas, com redução progressiva de comprimento e alteração dos ângulos de ramificação.

A adoção de 32 terminais decorre da escolha de cinco gerações sucessivas de bifurcação binária ($2^5 = 32$). Esse número foi definido por três motivos. Primeiro, reproduz o padrão hierárquico das árvores pulmonares, nas quais cada segmento se divide em dois ramos de menor calibre, preservando a lógica bioinspirada que motiva o trabalho. Segundo, fornece uma densidade de pontos de descarga suficiente para cobrir a área ativa considerada, garantindo que o reagente alcance toda a superfície sem deixar regiões isoladas. Terceiro, mantém o custo computacional viável: cada geração adicional dobraria o número de terminais e de canais a serem discretizados pelo *snappyHexMesh*, elevando rapidamente o número de células da malha sem alterar de forma essencial o comportamento hidráulico investigado. Como consequência direta dessa escolha, a árvore binária completa com 32 folhas possui 63 arestas e 64 nós, incluindo o nó de entrada e os nós intermediários de bifurcação.

A Figura 2 apresenta o grafo pulmonar bioinspirado gerado nessa etapa, antes da otimização, no qual todas as arestas possuem a mesma condutividade inicial e, portanto, espessura uniforme. Os eixos horizontal e vertical correspondem, respectivamente, às coordenadas x e y no plano da placa bipolar, expressas em milímetros. Essa rede inicial serviu como base para a otimização por Slime Mold.

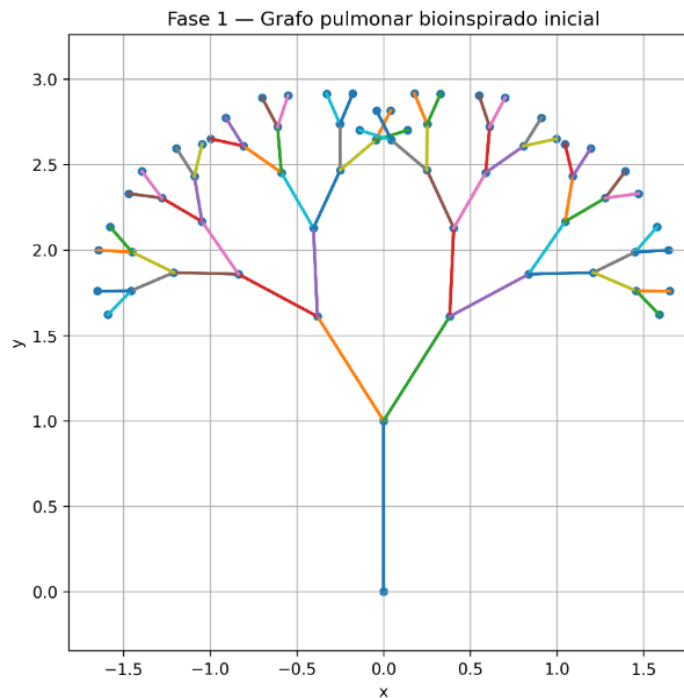


Figura 2 - Grafo pulmonar bioinspirado inicial.

Fonte: Autor (2026).

4.3 Otimização Slime Mold

A rede gerada na etapa anterior é apenas geométrica: todas as arestas possuem a mesma condutividade e, assim, não há distinção entre os caminhos que efetivamente conduzem maior vazão e os ramos de contribuição secundária. Se essa rede fosse convertida diretamente em canais de largura constante, o tronco de alimentação ficaria subdimensionado em relação à vazão total que precisa transportar, enquanto os ramos terminais ficariam superdimensionados, ocupando área ativa sem necessidade. A otimização pelo algoritmo Slime Mold foi realizada justamente para atribuir a cada aresta uma condutividade proporcional ao fluxo que ela conduz, permitindo dimensionar as larguras físicas de forma hierárquica: troncos mais largos e ramos periféricos progressivamente mais estreitos. Espera-se, com isso, reduzir a resistência hidráulica total da rede e distribuir o escoamento de maneira mais equilibrada entre os terminais, evitando gargalos locais.

A otimização foi realizada pela atualização iterativa das condutividades das arestas. Inicialmente, todas as arestas receberam condutividade $D_{ij} = 1,0$. Em cada iteração, resolveu-se o sistema de potenciais nos nós, calculou-se a vazão em cada aresta pela Equação 5 e atualizou-se a condutividade conforme a Equação 6. O processo foi repetido até que a variação máxima de D entre iterações consecutivas fosse inferior ao critério de parada adotado.

A Figura 3 apresenta o grafo após a convergência do algoritmo, com identificação do nó de entrada e dos 32 nós terminais. A espessura das arestas é proporcional ao fluxo calculado, evidenciando o tronco principal de alimentação e a redução progressiva das larguras em direção à periferia da rede. A Figura 4, por sua vez, apresenta a evolução da variação máxima da condutividade ao longo das iterações, grandeza utilizada como critério de parada do processo iterativo.

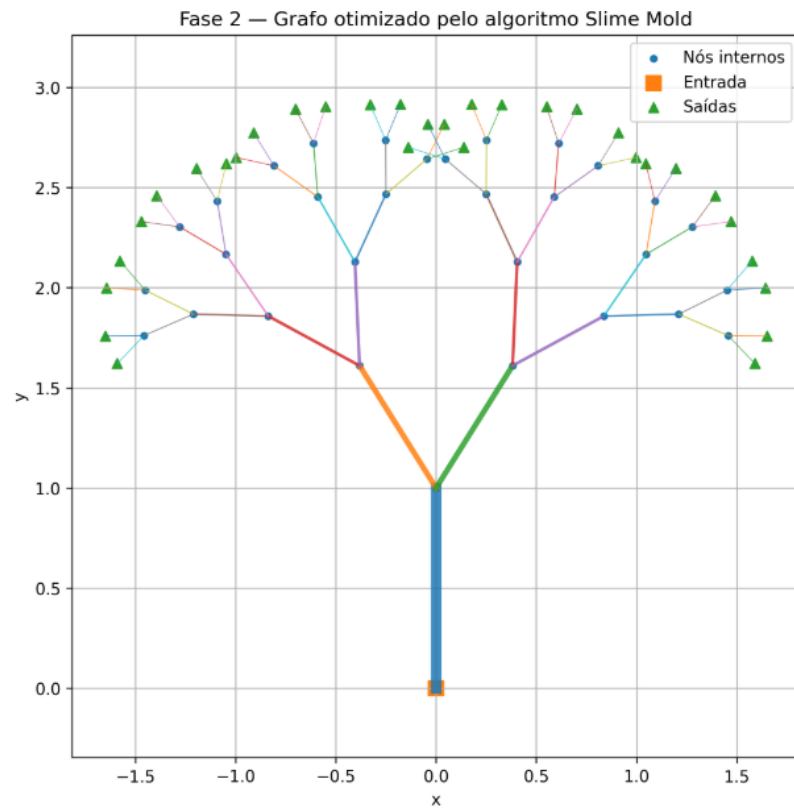


Figura 3 - Grafo otimizado pelo algoritmo Slime Mold, com identificação da entrada e dos terminais.

Fonte: Autor (2026).

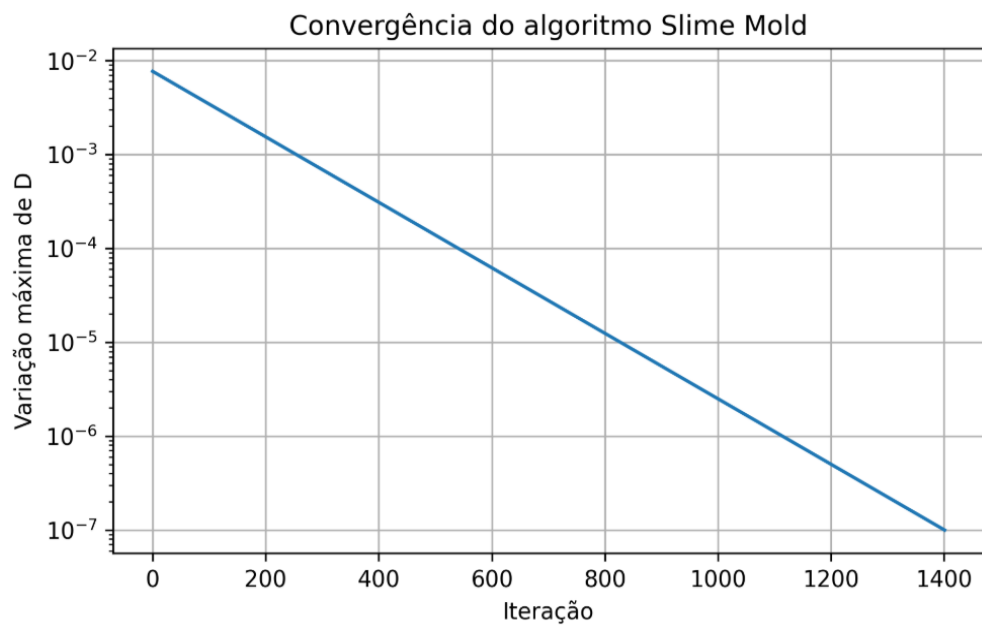


Figura 4 - Convergência do algoritmo Slime Mold ao longo das iterações.

Fonte: Autor (2026).

A Figura 4 foi apresentada com o objetivo de demonstrar que o processo iterativo atingiu um estado estacionário, e não uma solução arbitrariamente interrompida. A variação máxima da condutividade decai de forma sistemática ao longo das iterações, até atingir o critério de parada adotado, o que assegura que as larguras de canal derivadas dos fluxos correspondem a uma rede efetivamente convergida e reproduzível. Sem essa verificação, as larguras obtidas dependeriam do número de iterações executadas, e a geometria resultante não poderia ser considerada uma solução do modelo.

4.4 Conversão para STL e construção do coletor reverso

Após a otimização, as arestas do grafo foram convertidas em canais físicos por meio de operações geométricas em Python. Cada segmento recebeu largura proporcional ao fluxo calculado, conforme a Equação 7. Em configurações preliminares, foram observados problemas associados a múltiplas saídas e a conectores verticais que poderiam favorecer recirculações no coletor. Por isso, a geometria foi reformulada, de modo que os 32 nós terminais da rede passassem a ser conectados a uma árvore coletora reversa, que reúne progressivamente o escoamento até uma única saída superior. As geometrias resultantes foram tratadas e ajustadas em software CAD de desenho técnico e exportadas nos formatos STL e DXF para a etapa de geração de malha.

Cabe esclarecer que não houve redução do número de terminais nessa reformulação. Os 64 nós citados na seção 4.2 correspondem ao total de vértices do grafo, incluindo o nó de entrada e os nós intermediários de bifurcação, e não a pontos de descarga. Desses 64 nós, apenas 32 são terminais, isto é, extremidades livres da árvore de distribuição. A geometria final preserva integralmente esses 32 pontos de descarga, previstos nos objetivos específicos; o que a reformulação alterou foi apenas a forma como os terminais são reunidos até a saída, substituindo o manifold retangular por uma árvore coletora.

A decisão de utilizar um coletor reverso, em vez de um *manifold* retangular simples, foi tomada para evitar que os ramos terminais descarregassem perpendicularmente em uma parede plana, condição que poderia gerar jatos locais, zonas mortas e refluxo. Dessa forma, a proposta final preserva a conexão dos 32 terminais, mas direciona o fluido por uma rede de coleta mais suave e bioinspirada.

A Figura 5 apresenta a geometria tridimensional resultante desse procedimento. Nela é possível identificar a entrada única na parte inferior, a árvore de distribuição bioinspirada com

larguras de canal variáveis definidas pelo algoritmo, os 32 terminais e a árvore coletora reversa que reúne o escoamento até a saída única na parte superior. Essa é a geometria efetivamente utilizada nas simulações CFD apresentadas.

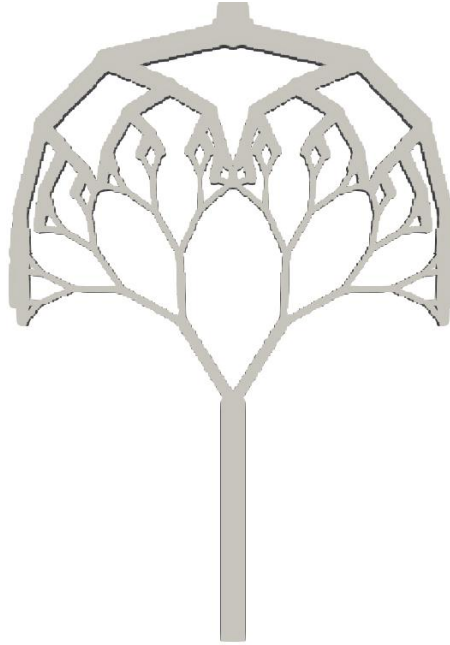


Figura 5 - Geometria Slime Mold com coletor reverso bioinspirado.

Fonte: Autor (2026).

4.5 Geometria convencional de comparação

A geometria convencional foi construída com canais paralelos verticais, entrada inferior, manifold inferior, manifold superior e saída única. Essa configuração representa uma solução clássica de distribuição, com menor complexidade geométrica em relação à rede bioinspirada. A geometria foi inicialmente gerada em Python e, em seguida, redesenhada e refinada em software CAD de desenho técnico, sendo exportada em STL, mantendo altura de canal, condição de entrada, fluido e solver comparáveis ao caso Slime Mold.

A Figura 6 apresenta a geometria convencional construída para comparação, na qual se observam a entrada inferior única, o *manifold* inferior de distribuição, o conjunto de canais paralelos verticais que percorrem a área ativa, o *manifold* superior de coleta e a saída única superior.

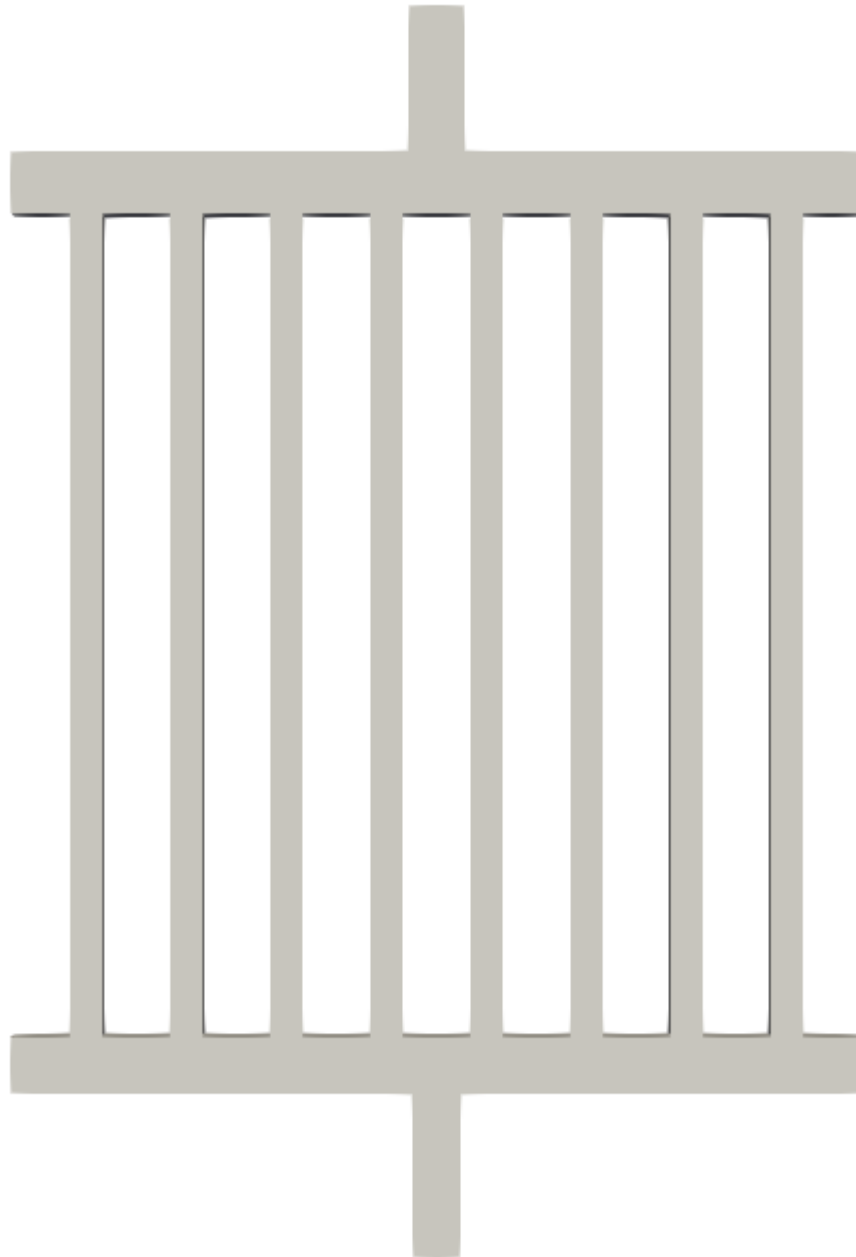


Figura 6 - Geometria convencional de canais paralelos com entrada e saída únicas.

Fonte: Autor (2026).

4.6 Geração de malha no OpenFOAM

As geometrias STL foram discretizadas no OpenFOAM por meio dos utilitários *blockMesh* e *snappyHexMesh*. O *blockMesh* foi utilizado para criar uma malha de fundo hexaédrica, e o

snappyHexMesh ajustou essa malha ao contorno dos canais. Para que entrada e saída fossem reconhecidas como patches reais, os tubos foram estendidos para cruzar os limites do domínio computacional. O ponto *locationInMesh* foi ajustado para manter a região interna dos canais como domínio fluido.

A qualidade das malhas foi avaliada pelo utilitário *checkMesh*. Embora algumas malhas tenham apresentado pequena quantidade de faces altamente distorcidas, a fração de faces problemáticas foi reduzida em relação ao total da malha, e os casos foram utilizados quando a conservação de massa e a estabilidade numérica se mostraram adequadas.

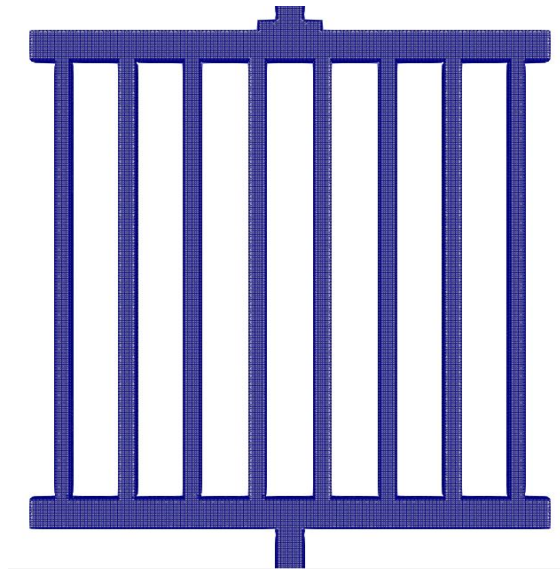


Figura 7 - Geometria convencional malha.

Fonte: Autor (2026).

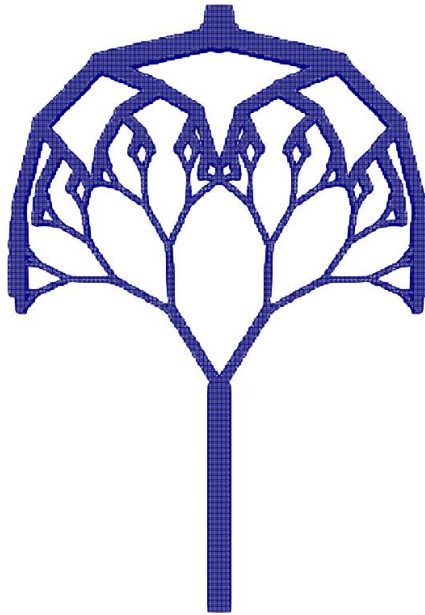


Figura 8 - Geometria slime mold malha.

Fonte: Autor (2026).

4.7 Condições de contorno e solver

As simulações foram realizadas no OpenFOAM utilizando o solver *simpleFoam*, adequado para escoamentos incompressíveis em regime permanente. O fluido de trabalho adotado foi o ar, tratado como incompressível e isotérmico, com viscosidade cinemática $\nu = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e massa específica $\rho = 1,18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. As geometrias foram modeladas na escala de milímetros, adotando-se *convertToMeters* = 0,001, de modo que as dimensões representassem microcanais reais.

Inicialmente, foi realizado um ensaio preliminar com diferença de pressão de 100 Pa entre a entrada e a saída, com o objetivo de verificar a resposta hidráulica inicial das geometrias e avaliar a estabilidade numérica do modelo. Nesse ensaio, o patch de entrada recebeu pressão prescrita equivalente a $84,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto o patch de saída foi definido como referência, com valor igual a zero. Esse valor corresponde ao campo de pressão utilizado pelo OpenFOAM na formulação incompressível, isto é, pressão dividida pela densidade, sendo posteriormente convertida para pressão física.

Após o ensaio preliminar, as condições de contorno foram redefinidas para representar situações mais próximas de condições operacionais de uma célula a combustível do tipo PEMFC.

No OpenFOAM, para escoamentos incompressíveis, o campo (p) não é inserido diretamente como pressão física em pascal, mas como pressão dividida pela densidade, com unidade $m^2 \cdot s^{-2}$. Dessa forma, os valores de pressão física apresentados nos resultados foram obtidos por meio da relação $P = \rho p$. Essa conversão permitiu expressar as perdas de carga e pressões de operação em Pa ou kPa, facilitando a interpretação física dos resultados.

Tabela 1 - Condições de contorno adotadas nas simulações

Região de contorno	Velocidade (U)	Energia de pressão no OpenFOAM	Interpretação física
Entrada	<i>pressureInletOutletVelocity</i>	<i>fixedValue</i> : $84,75 \frac{m^2}{s}$	Entrada com pressão física 100 Pa acima da saída
Saída	<i>pressureInletOutletVelocity</i>	<i>fixedValue</i> : $0 \frac{m^2}{s}$,	Saída de referência
Paredes dos canais	<i>noSlip</i>	<i>zeroGradient</i>	Paredes sólidas dos microcanais

Fonte: Autor (2026).

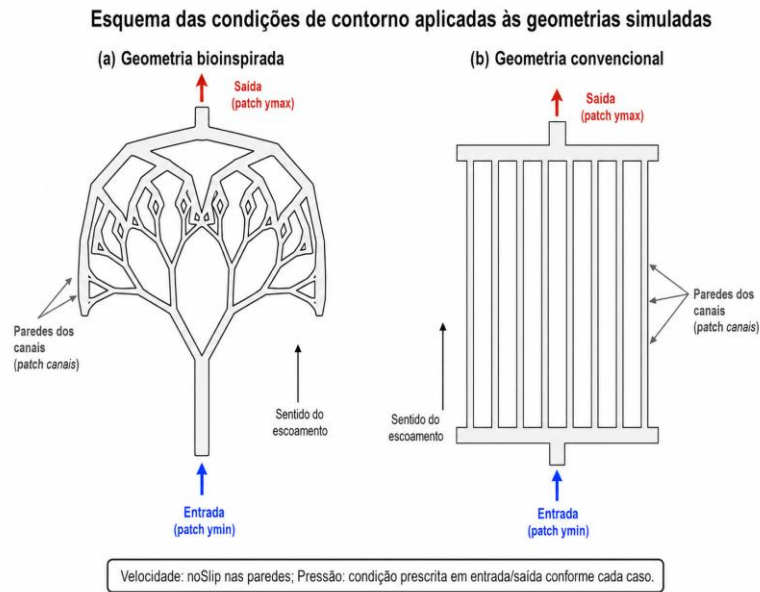


Figura 9 – Desenho das condições de contorno

Fonte: Autor (2026).

A Figura 9 apresenta o esquema das condições de contorno aplicadas às geometrias simuladas. A região inferior corresponde à entrada do fluido, a região superior corresponde à saída, e as superfícies laterais dos canais representam as paredes internas dos microcanais. O sentido principal do escoamento ocorre da entrada inferior para a saída superior, sendo as condições de entrada e saída modificadas de acordo com cada caso simulado.

4.8 Métricas de perda de carga, vazão e uniformidade

A queda de pressão foi calculada pela diferença entre a pressão média na entrada e a pressão média na saída, conforme a Equação 10. No OpenFOAM, na formulação incompressível, o campo p corresponde à pressão dividida pela massa específica, p/ρ , com unidade de $m^2 \cdot s^{-2}$, representando uma energia de pressão por unidade de massa. A pressão física foi obtida por $P = \rho p$, adotando-se $\rho = 1,18 \text{ kg} \cdot m^{-3}$, de modo que os resultados são apresentados preferencialmente em Pa ou kPa.

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (10)$$

Em que Δp é a queda de pressão (Pa); p_{in} é a pressão média no patch de entrada (Pa); e p_{out} é a pressão média no patch de saída (Pa).

A conservação de vazão foi avaliada por meio da diferença relativa entre a vazão de entrada e a vazão de saída, expressa pela Equação 11.

$$\varepsilon Q = \frac{|Q_{out} - Q_{in}|}{|Q_{out}|} \times 100 \quad (11)$$

Em que εQ é o erro relativo de vazão (%); Q_{in} é a vazão volumétrica no patch de entrada ($m^3 \cdot s^{-1}$); e Q_{out} é a vazão volumétrica no patch de saída ($m^3 \cdot s^{-1}$).

A uniformidade do campo de velocidade foi avaliada por duas estratégias complementares: uma análise global, considerando todos os pontos válidos do domínio, e uma análise por linhas horizontais em diferentes posições da área ativa. Foram utilizados o coeficiente de variação, definido pela Equação 12, e o índice de uniformidade, definido pela Equação 13. Quanto menor o CV e quanto mais próximo de 1 o UI, mais uniforme é a distribuição do escoamento.

$$CV = \frac{\sigma U \bar{U}}{\bar{U}} \quad (12)$$

$$UI = 1 - \left(\frac{1}{2n}\right) \sum \left(\frac{|U_i - \bar{U}|}{\bar{U}}\right) \quad (13)$$

Em que CV é o coeficiente de variação (adimensional); UI é o índice de uniformidade (adimensional); σU é o desvio padrão da magnitude de velocidade ($m \cdot s^{-1}$); $\bar{U}$ é a magnitude média de velocidade ($m \cdot s^{-1}$); U_i é a magnitude de velocidade na célula i ($m \cdot s^{-1}$); e n é o número de células consideradas na amostra.

4.9 Condições operacionais de pressão e vazão

Além das condições de contorno descritas anteriormente, foram definidos seis casos para representar situações próximas da operação de uma célula a combustível PEMFC, combinando as duas geometrias, bioinspirada Slime Mold e convencional de canais paralelos, com três condições operacionais. Todas as simulações empregaram o solver *simpleFoam*, com ar tratado como incompressível e isotérmico (viscosidade cinemática $\nu = 1,5 \times 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$; massa específica $\rho = 1,18 kg \cdot m^{-3}$) e paredes dos canais com condição de não deslizamento. Como o campo p do OpenFOAM corresponde à pressão dividida pela densidade (unidade $m^2 \cdot s^{-2}$), as pressões físicas foram impostas pela relação $p = P/\rho$; dessa forma, 100 kPa correspondem a $84.745,76 m^2 \cdot s^{-2}$ e 200 kPa a $169.491,53 m^2 \cdot s^{-2}$.

Nas duas primeiras condições, a vazão foi prescrita na entrada (patch ymin) por meio da condição *flowRateInletVelocity*, com vazão volumétrica de $2 L \cdot min^{-1}$ ($3,333 \times 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1}$) na condição realista e de $5 L \cdot min^{-1}$ ($8,333 \times 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1}$) na condição de vazão elevada. A saída (patch ymax) recebeu pressão fixa equivalente a 100 kPa (*fixedValue*) e velocidade do tipo *pressureInletOutletVelocity*. Nesses casos, a pressão de entrada é obtida como resposta da geometria à vazão imposta.

Na terceira condição, a pressão foi prescrita em ambas as fronteiras (*fixedValue*): a entrada recebeu valor equivalente a 200 kPa e a saída a 100 kPa, resultando em $\Delta P \approx 100$ kPa, com velocidade do tipo *pressureInletOutletVelocity* nas duas fronteiras. Nesse caso, a vazão é obtida como resposta da geometria à diferença de pressão aplicada.

A partir das soluções convergidas, foram calculadas, para cada caso, as grandezas apresentadas na Tabela 2, com as respectivas definições e unidades. A conservação de massa foi verificada pela diferença relativa entre as vazões de entrada e de saída, conforme a Equação 11.

Tabela 2 - Grandezas calculadas a partir das soluções convergidas.

Grandeza	Símbolo	Definição	Unidade
Perda de carga	ΔP	$P_{in} - P_{out}$	Pa (apresentada em kPa)

Grandeza	Símbolo	Definição	Unidade
Vazão volumétrica	Q	Fluxo através do patch	$m^3 \cdot s^{-1}$ (apresentada em $L \cdot min^{-1}$)
Velocidade média na entrada	U	$\frac{Q}{A_{in}}$	$m \cdot s^{-1}$
Área da seção de entrada	A in	Área do patch de entrada	m^2
Diâmetro hidráulico	D h	$\frac{4 A c}{P m}$	m
Número de Reynolds	Re	$\frac{U \cdot D h}{\nu}$	adimensional
Resistência hidráulica	R h	$\frac{\Delta P}{Q}$	$Pa \cdot s \cdot m^{-3}$
Condutância hidráulica	C h	$\frac{Q}{\Delta P}$	$m^3 \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$
Potência hidráulica	P h	$\Delta P \cdot Q$	W
Erro relativo de vazão	ε_Q	$\frac{(Q_{out} - Q_{in})}{ Q_{out} }$	%
Coeficiente de variação	CV	$\frac{\sigma_U}{\bar{U}}$	adimensional
Índice de uniformidade	UI	Equação 13	adimensional

Fonte: Autor (2026).

4.10 Síntese dos casos estudados

Para facilitar a leitura dos resultados, a Tabela 3 sintetiza todos os casos simulados neste trabalho, indicando a geometria avaliada, as condições de contorno impostas na entrada e na saída e a finalidade de cada simulação. Ao todo foram conduzidas oito simulações: dois ensaios preliminares, empregados para consolidar a metodologia de imposição de pressão e a extração das métricas hidráulicas, e seis casos operacionais, resultantes da combinação das duas geometrias com as três condições descritas na seção 4.9.

Tabela 3 - Casos estudados nas simulações CFD.

Caso	Geometria	Condição na entrada	Condição na saída	Finalidade
Preliminar A	Slime Mold	$p = 84,75 \, m^2 \cdot s^{-2}$ (100 Pa acima da saída)	$p = 0$ (referência)	Consolidação da metodologia de imposição de pressão
Preliminar B	Convencional	$p = 84,75 \, m^2 \cdot s^{-2}$ (100 Pa acima da saída)	$p = 0$ (referência)	Consolidação da metodologia de imposição de pressão

Caso	Geometria	Condição na entrada	Condição na saída	Finalidade
1	Slime Mold	$Q = 2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$	$P = 100 \text{ kPa}$	Condição realista de operação (caso principal)
2	Convencional	$Q = 2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$	$P = 100 \text{ kPa}$	Condição realista de operação (caso principal)
3	Slime Mold	$Q = 5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$	$P = 100 \text{ kPa}$	Ensaio severo de alimentação (vazão elevada)
4	Convencional	$Q = 5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$	$P = 100 \text{ kPa}$	Ensaio severo de alimentação (vazão elevada)
5	Slime Mold	$P = 200 \text{ kPa}$	$P = 100 \text{ kPa}$	Análise de sensibilidade à pressão elevada
6	Convencional	$P = 200 \text{ kPa}$	$P = 100 \text{ kPa}$	Análise de sensibilidade à pressão elevada

Fonte: Autor (2026).

Os ensaios preliminares são discutidos nas seções 5.4 a 5.6, e os seis casos operacionais, que constituem o resultado principal do trabalho, são apresentados na seção 5.7. Em todos os casos mantiveram-se o fluido, o mesmo solver, a mesma condição de não deslizamento nas paredes e a mesma estratégia de geração de malha, de modo que as diferenças observadas possam ser atribuídas predominantemente à geometria e à condição de contorno imposta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Convergência do algoritmo Slime Mold

A otimização Slime Mold apresentou convergência numérica na iteração 1401. A variação máxima da condutividade diminuiu de $7,6875 \times 10^{-3}$ na iteração inicial para aproximadamente $1,0049 \times 10^{-7}$ na iteração 1400. Esse comportamento indica que a rede atingiu um estado estável de condutividades, no qual os caminhos principais de transporte foram reforçados e as ramificações periféricas permaneceram mais estreitas.

Os valores finais de condutividade variaram entre $3,9075 \times 10^{-2}$ e 1,249997, enquanto os fluxos absolutos nas arestas variaram entre $3,125 \times 10^{-2}$ e 1,0. A distribuição desses valores foi

utilizada para definir a largura física dos canais, resultando em tronco principal mais largo e ramos secundários progressivamente menores.

5.2 Simulações preliminares com velocidade prescrita

Inicialmente, a geometria convencional e bioinspirada Slime Mold foram simuladas no OpenFOAM com o solver *simpleFoam*, utilizando velocidade prescrita na entrada e pressão nula na saída. A velocidade de entrada adotada foi $U = 0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a viscosidade cinemática do ar foi $\nu = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e as paredes internas dos canais foram definidas com condição de não deslizamento.

Nessa simulação preliminar, a geometria convencional apresentou 431.738 células, não-ortogonalidade máxima de 79,992 e assimetria máxima de 4,017, com 36 faces acima do limite de assimetria. A geometria Slime Mold apresentou 356.584 células, não-ortogonalidade máxima de 79,999 e assimetria máxima de 5,989, com 148 faces acima do limite de assimetria.

A geometria convencional apresentou convergência formal pelo critério SIMPLE em 607 iterações, com queda de energia de pressão de $1,9006 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ e vazões de entrada e saída de aproximadamente $-1,79788 \times 10^{-2}$ e $1,79788 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Para a geometria Slime Mold, a queda de energia de pressão foi de $3,0963 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, com vazões de $-1,79768 \times 10^{-2}$ e $1,79771 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Embora a simulação Slime Mold não tenha atingido convergência formal nessa primeira configuração, a conservação de massa foi adequada, com erro relativo de vazão da ordem de 0,0015%.

Comparando as quedas de energia de pressão, a geometria Slime Mold apresentou perda de carga cerca de 1,63 vez maior que a geometria convencional. Esse resultado indicou que, na configuração preliminar com velocidade prescrita, a maior complexidade geométrica da rede bioinspirada aumentou a resistência ao escoamento.

5.3 Correção de escala e nova condição de contorno por pressão

Após a verificação dos resultados preliminares, identificou-se a necessidade de corrigir a escala geométrica da simulação. Como as geometrias foram originalmente concebidas em milímetros, os novos casos foram reconstruídos utilizando *convertToMeters* 0.001 no *blockMeshDict* e fator de escala *scale* 0.001 para a leitura das superfícies STL no *snappyHexMesh*.

Dessa forma, as dimensões passaram a ser interpretadas corretamente, preservando a escala milimétrica da geometria.

Além disso, realizou-se uma nova etapa de simulação com pressão imposta na entrada. Nessa configuração, a entrada inferior recebeu pressão fixa, enquanto a saída superior foi mantida com pressão nula. Adotou-se uma diferença de pressão física de aproximadamente $\Delta P = 100 \text{ Pa}$. Considerando a densidade do ar $\rho = 1,18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, a energia de pressão prescrita na entrada foi calculada. Assim, foram utilizados $p_{\text{in}} = 84,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ e $p_{\text{out}} = 0$.

Essa nova configuração tornou a análise mais quantitativa, pois a vazão passou a ser uma resposta da geometria à diferença de pressão aplicada. A partir da vazão resultante, foram calculadas a resistência hidráulica, a condutância hidráulica, o número de Reynolds e os índices de uniformidade do campo de velocidade.

Em toda a análise, o campo de pressão do OpenFOAM corresponde à pressão dividida pela densidade.

5.4 Resultados da geometria Slime Mold com escala corrigida e pressão imposta

As seções 5.4 a 5.6 apresentam um ensaio preliminar conduzido com diferença de pressão fixa de 100 Pa, utilizado para consolidar a metodologia de imposição de pressão e a extração de métricas hidráulicas. As condições representativas da operação de uma célula a combustível PEMFC, com vazões e pressões realistas, são analisadas na seção 5.7, que constitui o resultado principal deste trabalho.

A geometria Slime Mold, na simulação com escala corrigida e pressão imposta, atingiu convergência formal pelo critério SIMPLE em 1795 iterações. A energia de pressão média na entrada foi $84,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, e a pressão na saída foi nula. Considerando $\rho = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, a diferença de pressão física aplicada foi $\Delta P = 1,18 \times 84,75 = 100,005 \text{ Pa}$.

A vazão volumétrica foi $Q_{\text{in}} = -6,7501422 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na entrada e $Q_{\text{out}} = 6,7501421 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na saída. O erro relativo entre entrada e saída foi praticamente nulo, da ordem de $10^{-6} \%$, indicando conservação de massa adequada.

A resistência hidráulica, calculada por R_h , resultou em $1,4815 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$; a condutância hidráulica, foi $6,750 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; e a potência hidráulica, foi $6,750 \times 10^{-4} \text{ W}$.

A área da entrada foi $1,8030371 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, resultando em velocidade média de entrada de aproximadamente $3,744 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Considerando profundidade de canal de $1,0 \times 10^{-3} \text{ m}$, o diâmetro hidráulico de entrada foi $D_h \approx 1,2876 \times 10^{-3} \text{ m}$ e o número de Reynolds na entrada $Re \approx 321$, confirmando regime laminar.

A análise global do campo interno (356.584 células) apresentou energia de pressão média de $29,0106 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (mínima de 0,40778 e máxima de $93,112 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) equivalente a pressão física média de 34,233 Pa (mínima de 0,481 e máxima de 109,872 Pa). Para o campo de velocidade, obteve-se $U_{\text{mín}} = 2,2812 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_{\text{máx}} = 7,6023 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_{\text{médio}} = 0,8697 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e desvio padrão $\sigma U = 1,1693 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, resultando em coeficiente de variação $CV = 1,3446$ e índice de uniformidade $UI = 0,5296$.

Esses resultados indicam que a geometria Slime Mold apresentou convergência numérica, conservação de massa e regime laminar, mas ainda com distribuição de velocidade pouco uniforme, com regiões locais de aceleração associadas às bifurcações e ao coletor reverso.

A análise qualitativa dos campos confirma o comportamento descrito pelos índices globais. No campo de pressão (Figura 10), a maior parte da queda de pressão ocorre no tronco principal de alimentação: o tronco apresenta os maiores valores de pressão, que decaem progressivamente à medida que o escoamento se ramifica em direção aos terminais e ao coletor superior, onde a pressão se aproxima de zero. O campo de magnitude de velocidade (Figura 11) é predominantemente baixo em quase toda a rede, com valores elevados restritos a poucos canais de maior condutividade, evidenciando o caráter pouco uniforme do escoamento. As linhas de corrente (Figura 12) tornam esse efeito mais claro: o fluido concentra-se em caminhos preferenciais, sobretudo no tronco e em alguns ramos, enquanto diversas ramificações periféricas recebem fluxo reduzido, configurando regiões de baixa renovação que penalizam a uniformidade global.

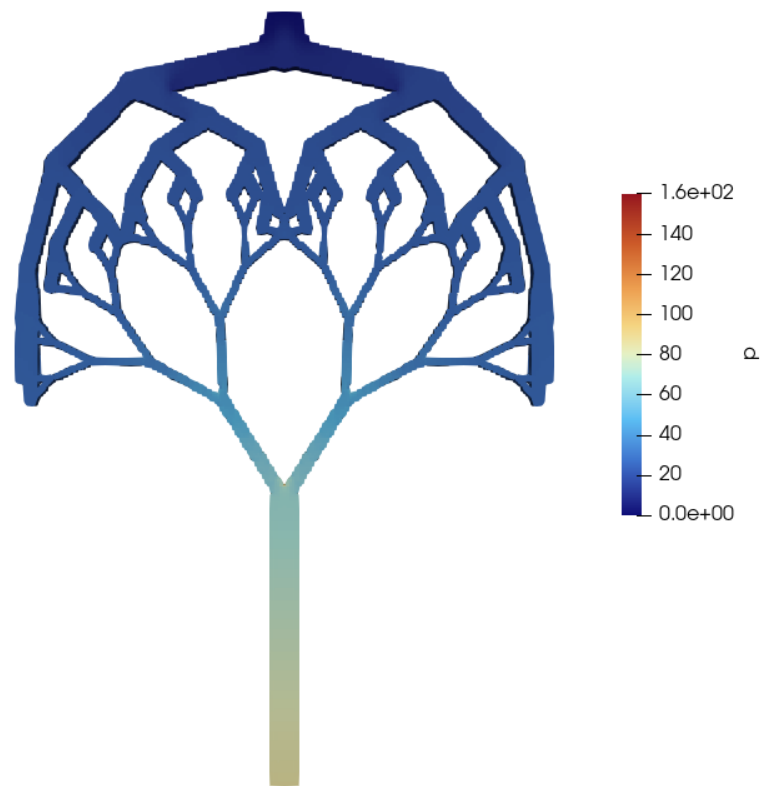


Figura 10 - Campo de pressão da geometria Slime Mold ($\Delta P = 100$ Pa).

Fonte: Autor (2026).

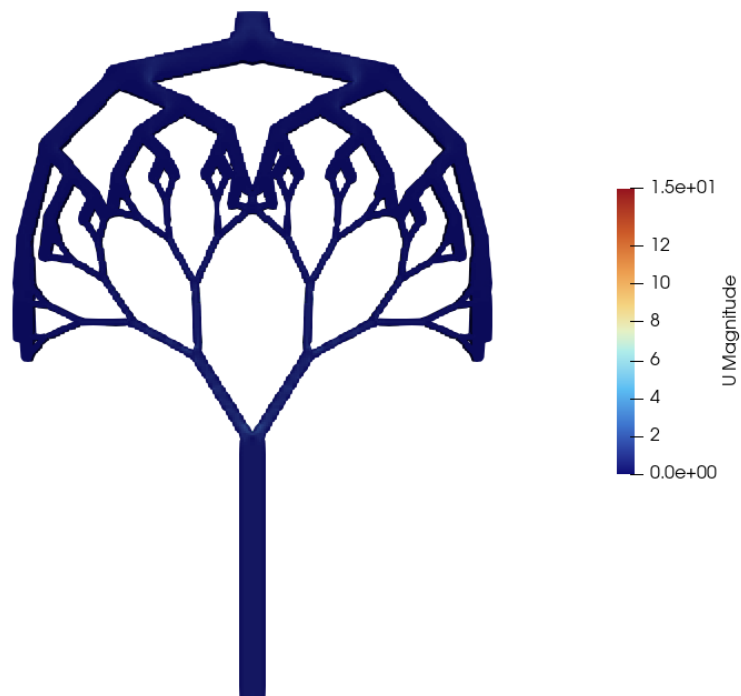


Figura 11 - Campo de magnitude de velocidade da geometria Slime Mold ($\Delta P = 100$ Pa).

Fonte: Autor (2026).

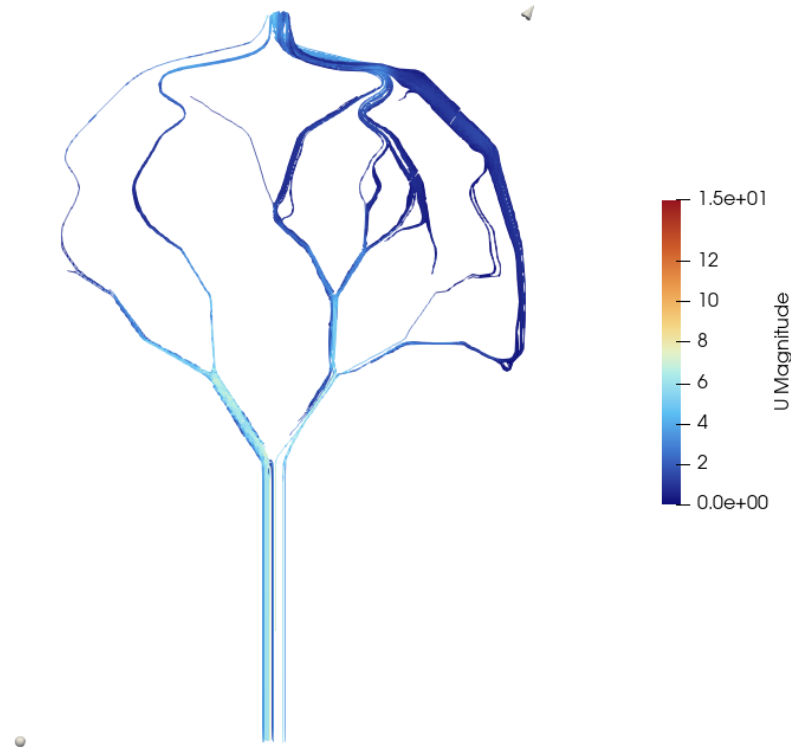


Figura 12 - Linhas de corrente da geometria Slime Mold ($\Delta P = 100$ Pa).

Fonte: Autor (2026).

Esse comportamento decorre da própria lógica de dimensionamento adotada. O algoritmo Slime Mold reforça as arestas que conduzem maior fluxo e enfraquece as de menor fluxo, o que produz uma distribuição de larguras fortemente hierárquica. Como a resistência hidráulica de um canal decresce acentuadamente com o aumento de sua seção transversal, diferenças moderadas de largura resultam em diferenças expressivas de condutância, e o escoamento se concentra nos ramos mais largos.

Soma-se a isso o fato de os caminhos entre a entrada e a saída não possuírem o mesmo comprimento nem o mesmo número de bifurcações. Os terminais servidos por trajetórias mais curtas enfrentam menor resistência acumulada e drenam parcela maior da vazão total, enquanto os ramos periféricos, mais longos e estreitos, recebem fluxo reduzido. Deve-se considerar ainda que o algoritmo foi formulado originalmente para minimizar o custo de transporte entre uma origem e um destino, e não para equalizar a vazão entre múltiplos terminais simultaneamente. Sem uma restrição explícita de igualdade de fluxo entre terminais ou de compensação dos comprimentos de

percurso, a rede converge naturalmente para caminhos preferenciais, o que explica o baixo índice de uniformidade obtido ($UI = 0,5296$) e indica a direção das melhorias necessárias na geometria.

5.5 Resultados da geometria convencional com escala corrigida e pressão imposta

A geometria convencional também foi simulada com escala corrigida e pressão imposta de aproximadamente 100 Pa, conduzida até o tempo final de 2000 iterações. Embora não tenha sido emitida mensagem formal de convergência pelo critério *SIMPLE*, os resíduos finais de velocidade ficaram na ordem de 10^{-7} , o resíduo inicial de pressão no tempo final na ordem de 10^{-4} e o erro global de continuidade na ordem de 10^{-8} ; além disso, as vazões de entrada e saída foram equivalentes, indicando estabilização adequada dos campos para extração dos dados quantitativos.

A pressão reduzida (p/ρ) média na entrada foi $84,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ e a pressão na saída foi nula, correspondendo a $\Delta P = 100,005 \text{ Pa}$. A vazão foi $Q_{\text{in}} = -1,1990857 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $Q_{\text{out}} = 1,1990857 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com erro relativo de 0%, indicando conservação de massa.

A resistência hidráulica foi $R_h = 8,3401 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$; a condutância hidráulica $Ch = 1,1990 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ e a potência hidráulica $P_h = 1,1991 \times 10^{-3} \text{ W}$.

A área da entrada foi $1,7797474 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, resultando em velocidade média de entrada de $6,7374 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. O diâmetro hidráulico de entrada foi $D_h = 1,2805 \times 10^{-3} \text{ m}$ e o número de Reynolds $Re \approx 575$, também compatível com regime laminar.

A análise global do campo interno (431.738 células) apresentou pressão reduzida (p/ρ) média de $64,2106 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (mínima de -19,099 e máxima de $157,76 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$), equivalente a pressão física média de 75,768 Pa (mínima de -22,537 e máxima de 186,157 Pa). Para o campo de velocidade, obteve-se $U_{\text{mín}} = 2,2768 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_{\text{máx}} = 13,9130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_{\text{médio}} = 0,9659 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e desvio padrão $\sigma_U = 1,1647 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, resultando em $CV = 1,2059$ e $UI = 0,6082$.

Esses valores indicam que a geometria convencional apresentou maior vazão, menor resistência hidráulica e melhor uniformidade global do campo de velocidade em comparação com a geometria Slime Mold.

Qualitativamente, a geometria convencional apresenta um padrão mais ordenado. O campo de pressão (Figura 10) mostra um gradiente vertical bem definido, com pressão elevada no manifold inferior de entrada que decresce de forma regular ao longo dos canais paralelos até o manifold superior de saída. O campo de magnitude de velocidade (Figura 13) é relativamente baixo e homogêneo entre os canais. As linhas de corrente (Figura 15) indicam distribuição mais

equilibrada entre os canais paralelos, com as maiores velocidades concentradas nas regiões de entrada e saída (*manifolds*) e alguma recirculação localizada junto ao bocal de entrada. Esse padrão é coerente com a maior uniformidade global e a menor resistência hidráulica observadas para a geometria convencional.

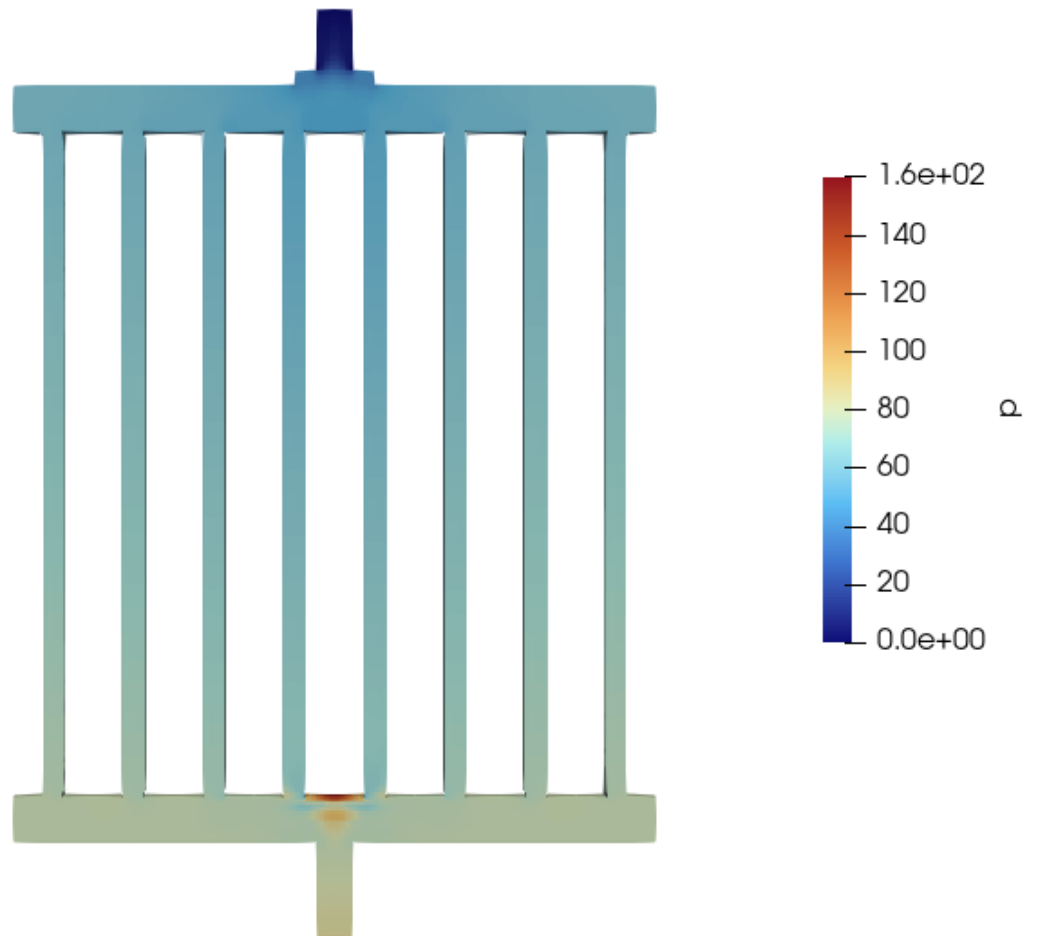


Figura 13 - Campo de pressão da geometria convencional ($\Delta P = 100$ Pa).

Fonte: Autor (2026).

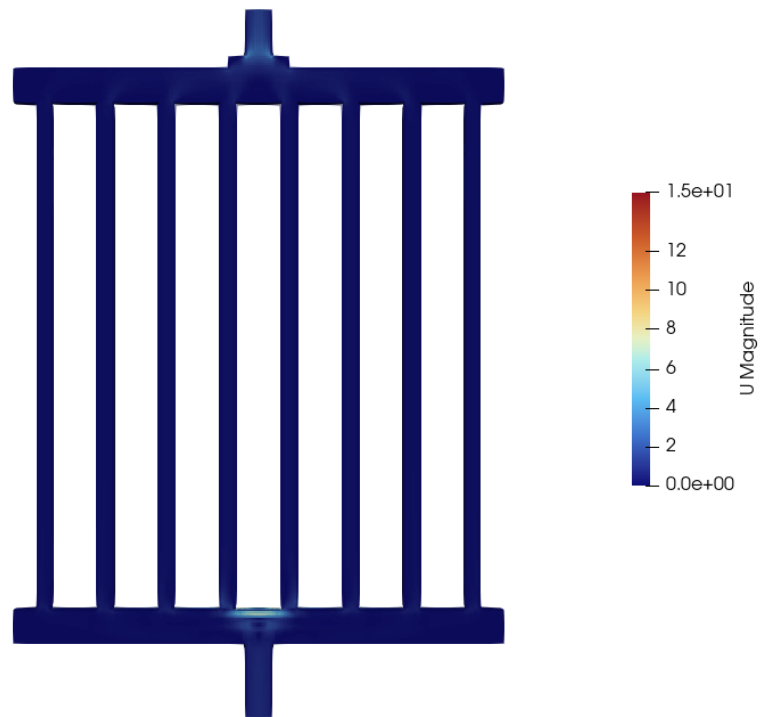


Figura 14 - Campo de magnitude de velocidade da geometria convencional ($\Delta P = 100$ Pa).

Fonte: Autor (2026).

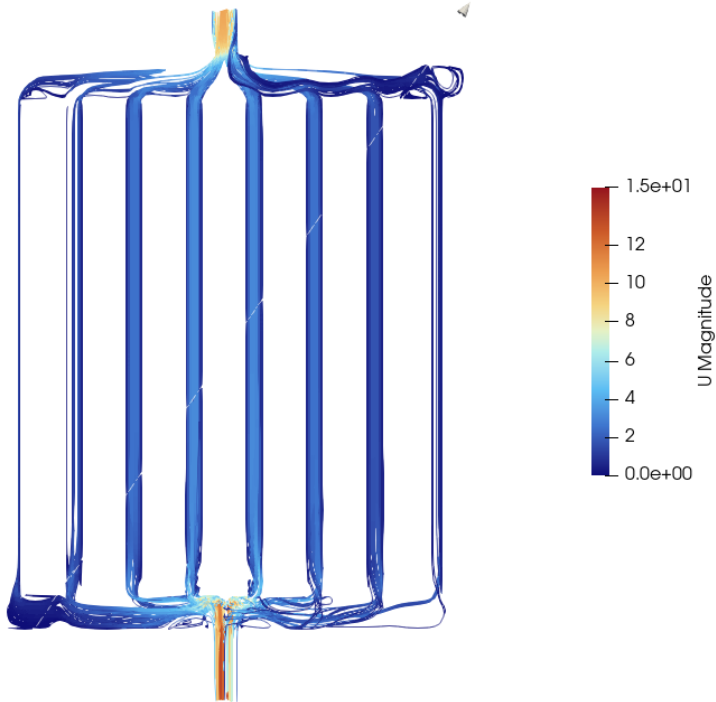


Figura 15 - Linhas de corrente da geometria convencional ($\Delta P = 100$ Pa).

Fonte: Autor (2026).

5.6 Comparação quantitativa entre as geometrias

A Tabela 4 resume os principais resultados obtidos para as duas geometrias sob a mesma diferença de pressão aplicada.

Tabela 4 - Comparação quantitativa entre as geometrias.

Parâmetro	Convencional	Slime Mold
ΔP aplicado [Pa]	100,005	100,005
Q out [$\frac{m^3}{s}$]	$1,1991 \times 10^{-5}$	$6,7501 \times 10^{-6}$
R h [$\frac{Pa \cdot s}{m^3}$]	$8,3401 \times 10^6$	$1,4815 \times 10^7$
C h [$\frac{m^3}{Pa \cdot s}$]	$1,1990 \times 10^{-7}$	$6,7500 \times 10^{-8}$
Potência hidráulica [W]	$1,1991 \times 10^{-3}$	$6,7500 \times 10^{-4}$
Re na entrada	575	321
U_médio global [$\frac{m}{s}$]	0,9659	0,8697
U_máx global [$\frac{m}{s}$]	13,9130	7,6023
CV global	1,2059	1,3446
UI global	0,6082	0,5296
Conservação de massa	0%	$\approx 10^{-6} \%$
Convergência	estabilizada até 2000 iterações	convergência formal em 1795 iterações

Fonte: Autor (2026).

Sob a mesma diferença de pressão aplicada, a geometria convencional apresentou vazão aproximadamente 1,78 vez maior que a geometria Slime Mold: cerca de 77,6% superior. A resistência hidráulica da geometria Slime Mold foi aproximadamente 1,78 vez maior que a da convencional, indicando que, na configuração analisada, a geometria bioinspirada impôs maior resistência ao escoamento, provavelmente devido às bifurcações sucessivas, às trajetórias mais tortuosas, às variações de largura e ao coletor reverso.

Em relação à uniformidade global, a geometria convencional também apresentou melhor desempenho, com menor coeficiente de variação (CV = 1,2059 contra 1,3446) e maior índice de uniformidade (UI = 0,6082 contra 0,5296).

Na prática, essa diferença de resistência hidráulica se traduz em maior demanda de energia de bombeamento, ou potência parasita, para alimentar a geometria bioinspirada com a mesma vazão de reagentes. Em uma PEMFC, a potência consumida pelo compressor ou soprador é descontada da potência elétrica gerada pela célula; assim, uma perda de carga cerca de 1,8 vez maior implica, para a mesma vazão, aproximadamente 1,8 vez mais potência hidráulica no lado alimentado. Como os valores absolutos obtidos na condição realista são baixos (1,198 kPa contra 0,639 kPa em $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), esse acréscimo é pequeno frente às pressões típicas de operação de uma célula isolada, mas torna-se relevante em empilhamentos com dezenas ou centenas de células, nos quais a perda de carga se acumula ao longo do conjunto.

O menor índice de uniformidade da geometria bioinspirada tem consequência potencialmente mais crítica do que a perda de carga. Regiões da área ativa alimentadas por ramos de baixa vazão tenderiam a apresentar menor concentração local de reagente e maior propensão ao acúmulo de água líquida, o que se manifestaria como perdas por transporte de massa, distribuição não homogênea de densidade de corrente e, em operação prolongada, degradação localizada da membrana e do catalisador. Do ponto de vista prático, portanto, a limitação mais importante identificada não é o custo de bombeamento, mas a desigualdade de alimentação entre os terminais.

Cabe ponderar, entretanto, que maior perda de carga não é necessariamente indesejável em uma PEMFC: campos de escoamento com maior resistência, como serpentinhas e interdigitados, favorecem a convecção sob os ressaltos e a remoção de água líquida. Uma avaliação prática definitiva exigiria, assim, o acoplamento eletroquímico e a inclusão de escoamento bifásico, conforme discutido na seção 5.9.

5.7 Análise das condições operacionais de pressão e vazão na célula a combustível

As condições de contorno foram redefinidas para representar situações mais próximas da operação de uma célula a combustível PEMFC. A condição principal adotou vazão volumétrica de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ e pressão de saída de 100 kPa, representando uma alimentação moderada e fisicamente mais adequada ao regime laminar do modelo. Além disso, foram avaliadas uma condição de vazão elevada, com $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, e uma condição extrema de pressão, com entrada em 200 kPa e saída em 100 kPa. Em todos os casos, os resultados foram convertidos para pressão física por $P = p_p$ ($p = 1,18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), e foram avaliadas as geometrias bioinspirada Slime Mold e convencional de canais paralelos.

Tabela 5 - Resultados das simulações em condições operacionais de PEMFC (saída mantida em 100 kPa).

Condição	Geometria	P in [kPa]	ΔP [kPa]	Q out [$L \cdot$ min^{-1}]	Re in	R_h [$Pa \cdot s \cdot$ m^{-3}]
Realista	Slime Mold	101,20	1,198	2,000	1585,58	$3,5949 \times 10^7$
Realista	Convencional	100,64	0,639	2,000	1598,87	$1,9177 \times 10^7$
Vazão elevada	Slime Mold	105,70	5,696	5,000	3963,95	$6,8353 \times 10^7$
Vazão elevada	Convencional	103,08	3,078	5,000	3997,17	$3,6930 \times 10^7$
Pressão elevada	Slime Mold	200,00	100,00	135,43	107365,64	$4,4304 \times 10^7$
Pressão elevada	Convencional	200,00	100,00	158,70	126867,47	$3,7808 \times 10^7$

Fonte: Autor (2026).

As Figuras 16 a 32 apresentam os campos de pressão e de magnitude de velocidade obtidos nas seis simulações operacionais, organizadas por condição: pressão elevada (Figuras 16 a 24), vazão elevada (Figuras 25 a 28) e condição realista (Figuras 29 a 32). A análise quantitativa de cada condição é apresentada na sequência.

As Figuras 16 a 18 apresentam a evolução do campo de pressão da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada, em três estágios do processo iterativo: início da convergência (Figura 16), convergência intermediária (Figura 17) e solução final (Figura 18). A sequência mostra que o gradiente de pressão, inicialmente concentrado nas proximidades da entrada, distribui-se progressivamente ao longo da árvore de distribuição até estabilizar, com os maiores valores no tronco de alimentação e decaimento em direção ao coletor superior.

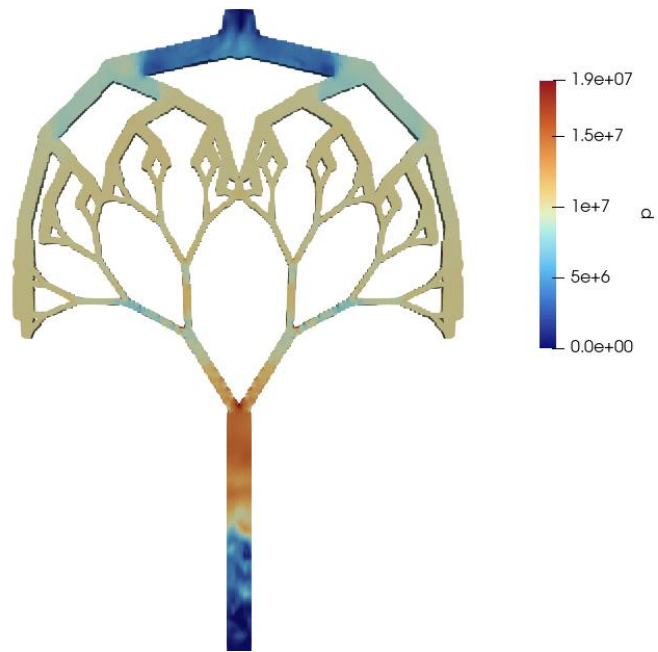


Figura 16 - Campo de pressão da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (início da convergência).

Fonte: Autor (2026).

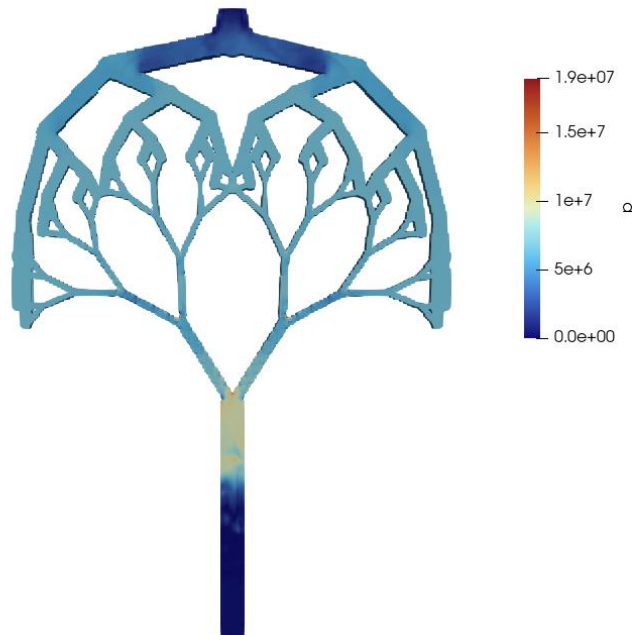


Figura 17 - Campo de pressão da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (convergência intermediária).

Fonte: Autor (2026).

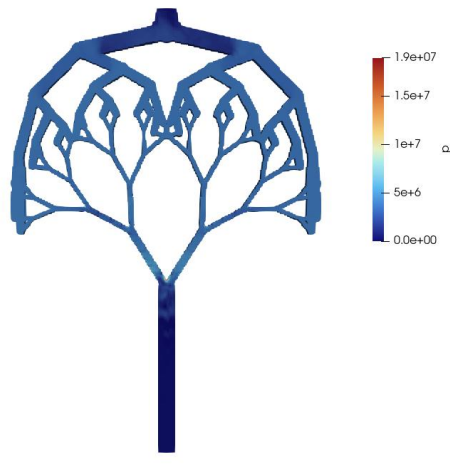


Figura 18 - Campo de pressão da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (solução final).

Fonte: Autor (2026).

As Figuras 19 a 22 apresentam a evolução correspondente do campo de magnitude de velocidade da mesma geometria e condição, do início da convergência (Figura 19) à solução final (Figura 22), passando pelos estágios intermediário (Figura 20) e avançado (Figura 21). Observa-se a formação progressiva dos caminhos preferenciais de escoamento, com as maiores velocidades concentradas no tronco e nos ramos de maior largura. Ressalta-se que as velocidades atingidas nesta condição são incompatíveis com as hipóteses de escoamento incompressível e laminar adotadas, conforme discutido adiante, de modo que essas figuras devem ser interpretadas como ilustração do comportamento numérico, e não como representação física do escoamento.

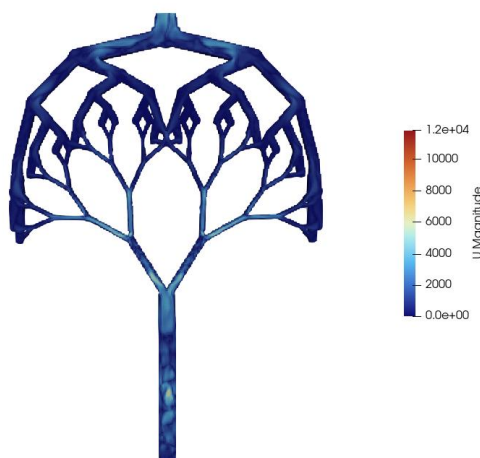


Figura 19 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (início da convergência).

Fonte: Autor (2026).

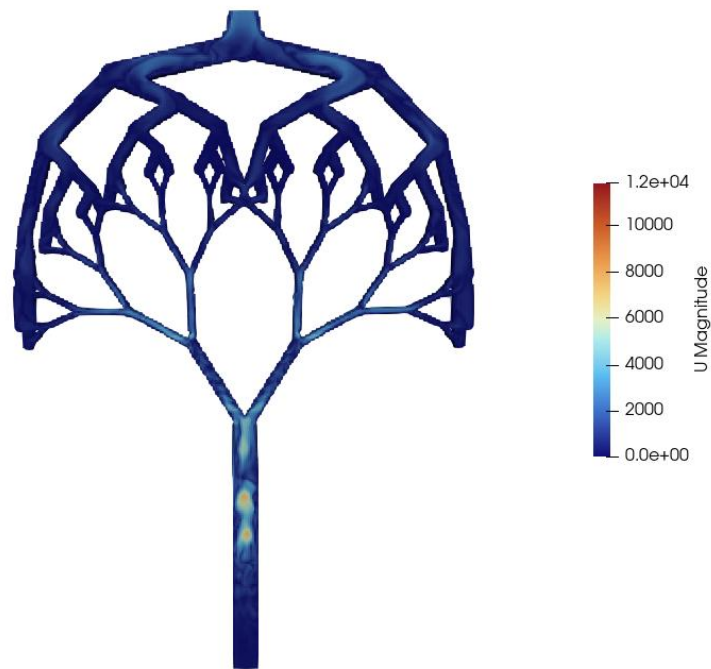


Figura 20 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (convergência intermediária).

Fonte: Autor (2026).

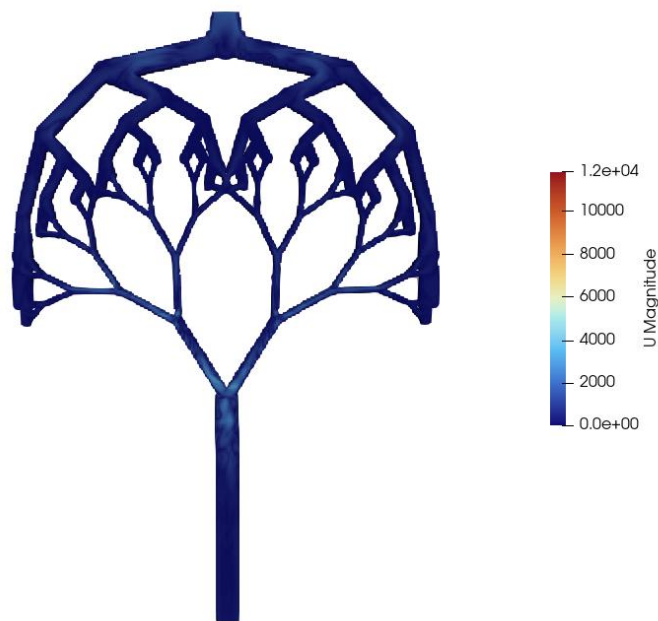


Figura 21 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (convergência avançada).

Fonte: Autor (2026).

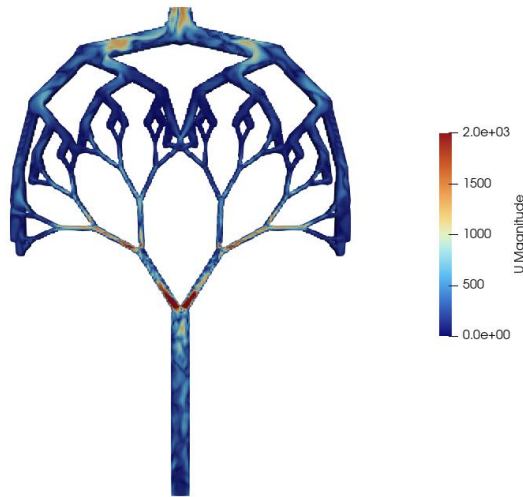


Figura 22 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada Slime Mold na condição de pressão elevada (solução final).

Fonte: Autor (2026).

As Figuras 23 e 24 apresentam, respectivamente, os campos de pressão e de magnitude de velocidade da geometria convencional na condição de pressão elevada. O campo de pressão exibe gradiente vertical regular entre os *manifolds* de entrada e de saída, e o campo de velocidade mostra distribuição mais homogênea entre os canais paralelos do que a observada na geometria bioinspirada sob a mesma condição.

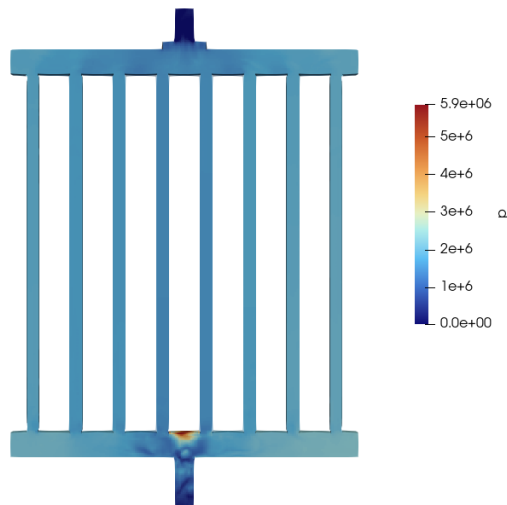


Figura 23 - Campo de pressão da geometria convencional na condição de pressão elevada.

Fonte: Autor (2026).

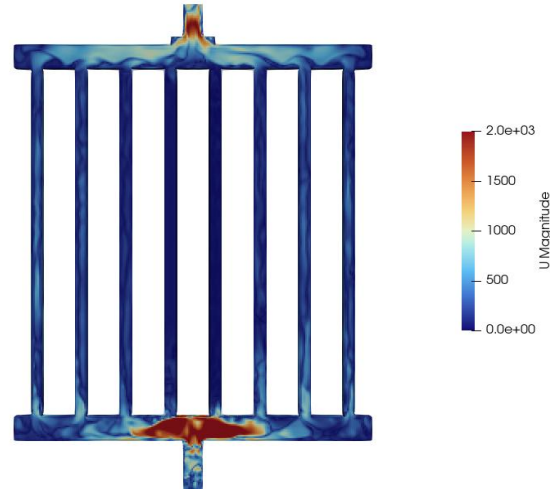


Figura 24 - Campo de magnitude de velocidade da geometria convencional na condição de pressão elevada.

Fonte: Autor (2026).

As Figuras 25 e 26 apresentam os campos de pressão e de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada na condição de vazão elevada, com $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, impostos na entrada. Em comparação com a condição realista, evidenciam o aumento generalizado dos níveis de pressão e de velocidade, mantendo, porém, o mesmo padrão de concentração do escoamento nos ramos de maior condutividade.

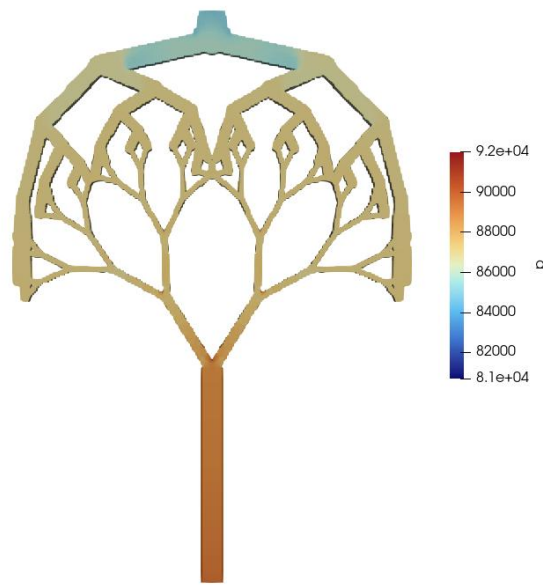


Figura 25 - Pressão da geometria bioinspirada na condição de vazão elevada.

Fonte: Autor (2026).

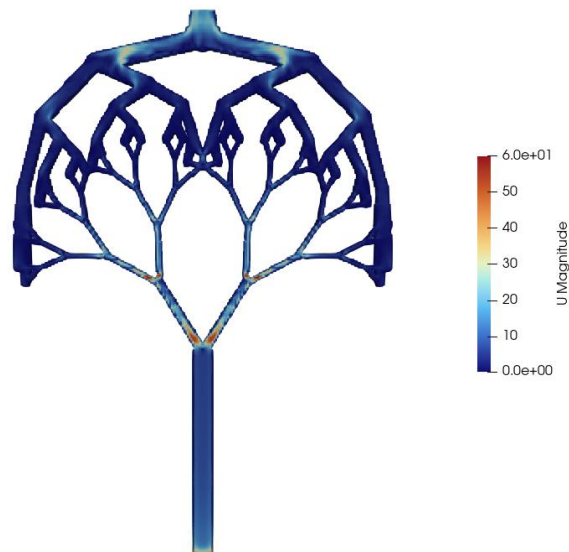


Figura 26 - Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada na condição de vazão elevada.

Fonte: Autor (2026).

As Figuras 27 e 28 apresentam os campos correspondentes da geometria convencional na condição de vazão elevada. Para a mesma vazão imposta, os níveis de pressão são inferiores aos da geometria bioinspirada, coerentemente com a menor perda de carga registrada na Tabela 5 (3,078 kPa contra 5,696 kPa).

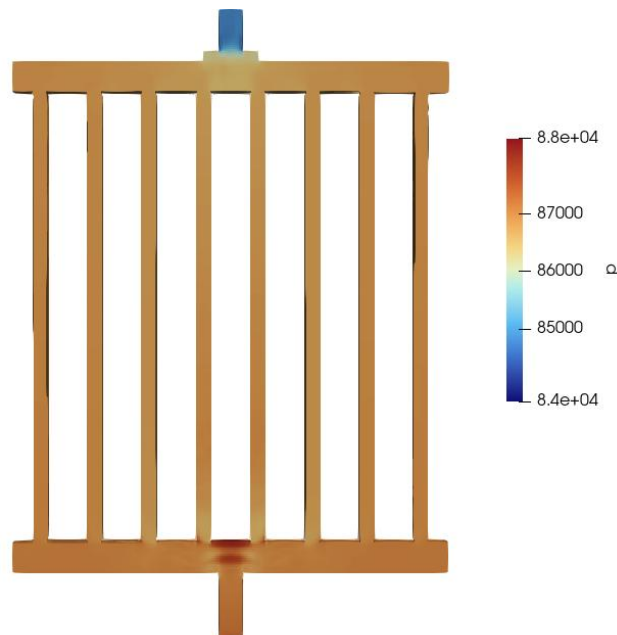


Figura 27 – Pressão da geometria convencional na condição de vazão elevada.

Fonte: Autor (2026).

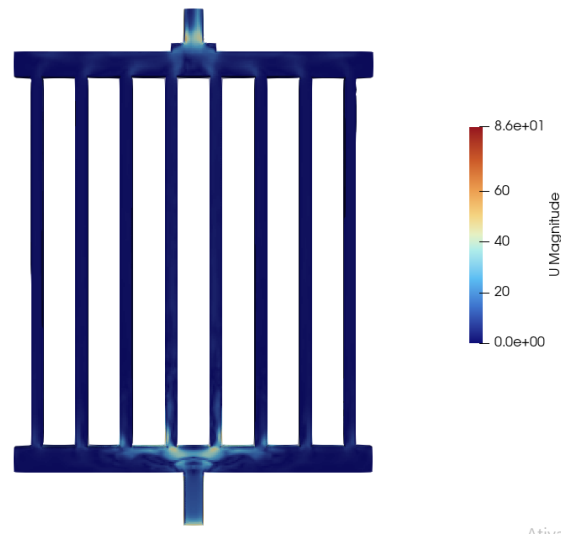


Figura 28 - Campo de magnitude de velocidade da geometria convencional na condição de vazão elevada.

Fonte: Autor (2026).

As Figuras 29 e 30 apresentam os campos de pressão e de magnitude de velocidade da geometria convencional na condição realista, com vazão de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, que constitui o caso principal deste trabalho. O campo de pressão apresenta variação suave entre a entrada e a saída, compatível com a perda de carga de 0,639 kPa, e o campo de velocidade mostra distribuição relativamente equilibrada entre os canais paralelos.

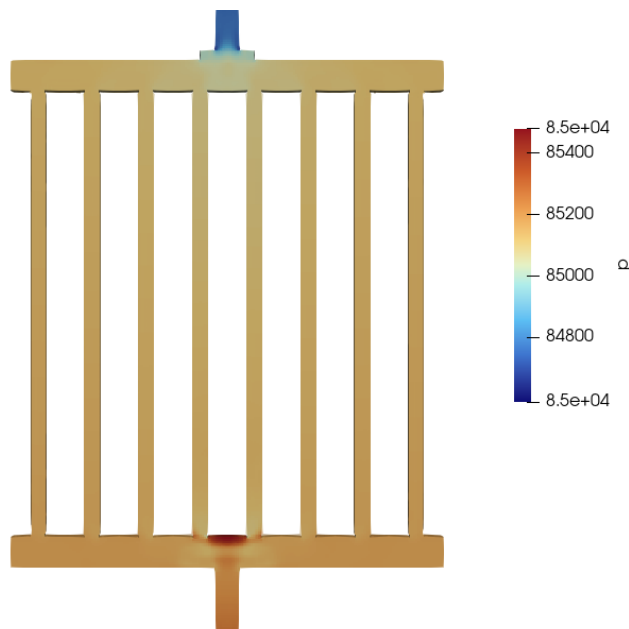


Figura 29 – Pressão da geometria convencional na condição realista.

Fonte: Autor (2026).

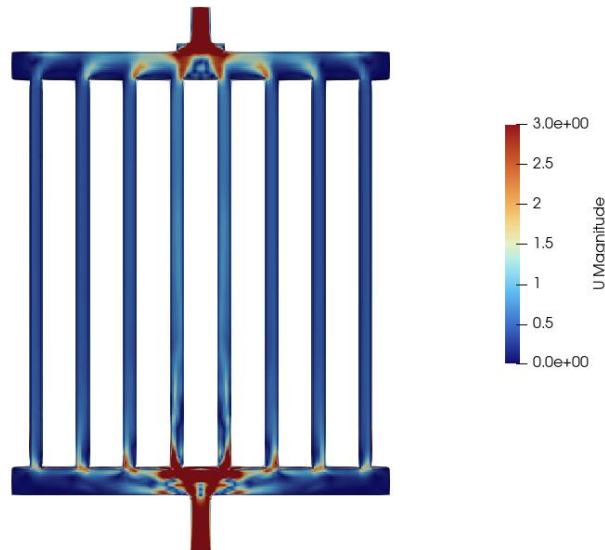


Figura 30 – Campo de magnitude de velocidade da geometria convencional na condição realista.

Fonte: Autor (2026).

As Figuras 31 e 32 apresentam os campos correspondentes da geometria bioinspirada Slime Mold na condição realista. Para a mesma vazão de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, os níveis de pressão são superiores aos da geometria convencional, refletindo a perda de carga de 1,198 kPa, e o campo de velocidade evidencia a concentração do escoamento em caminhos preferenciais, com ramos periféricos de baixa renovação. Esse comportamento é coerente com o menor índice de uniformidade discutido na seção 5.

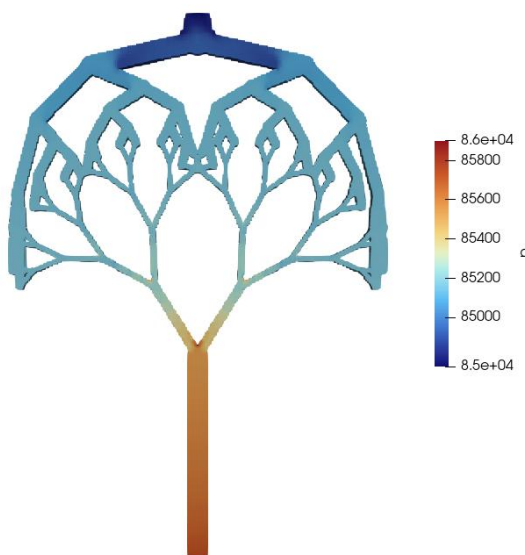


Figura 31 – Pressão da geometria bioinspirada na condição realista.

Fonte: Autor (2026).

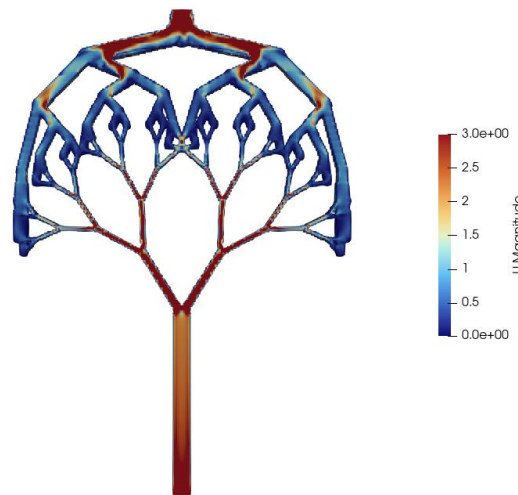


Figura 32 – Campo de magnitude de velocidade da geometria bioinspirada na condição realista.

Fonte: Autor (2026).

Condição realista ($2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$): nesta condição, considerada realista, foi imposta vazão de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ e a saída foi mantida em 100 kPa, o que permite avaliar diretamente qual geometria exige maior pressão de entrada para transportar a mesma vazão. A geometria bioinspirada Slime Mold apresentou pressão de entrada de 101,198 kPa (perda de carga de 1,198 kPa), enquanto a geometria convencional apresentou 100,639 kPa (perda de carga de 0,639 kPa). Portanto, para a mesma vazão, a geometria bioinspirada exigiu perda de carga cerca de 1,87 vez maior (aproximadamente 87,5% superior), indicando maior resistência ao escoamento. Ambas operaram em regime laminar ($\text{Re} \approx 1586$ e 1599 ; $\text{Re} < 2300$) e conservaram massa de forma adequada (erro de vazão praticamente nulo e da ordem de $10^{-5} \%$). A geometria bioinspirada convergiu formalmente em 1575 iterações; a convencional não emitiu mensagem formal de convergência, mas apresentou campos estabilizados e fechamento de massa adequado. Esta é a condição principal e mais defensável fisicamente, sendo a base da comparação hidráulica do trabalho.

Condição de vazão elevada ($5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$): sob $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ e saída em 100 kPa, em ensaio severo de alimentação, a geometria bioinspirada Slime Mold apresentou pressão de entrada de 105,696 kPa (perda de carga de 5,696 kPa) e a convencional 103,078 kPa (perda de carga de 3,078 kPa). A perda de carga da geometria bioinspirada foi cerca de 1,85 vez maior (aproximadamente 85,1% superior), confirmando a tendência observada em $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Entretanto, os números de Reynolds aumentaram para cerca de 3964 e 3997, próximos da faixa de transição, de modo que

esta condição deve ser interpretada como ensaio de vazão elevada, e não como caso principal de validação laminar. O fechamento de massa permaneceu adequado (erros da ordem de 10^{-5} %).

Condição de pressão elevada (200 kPa $\rightarrow$ 100 kPa): nesta condição, foi imposta pressão de entrada de 200 kPa e de saída de 100 kPa ($\Delta P \approx 100$ kPa), e a vazão foi obtida como resposta da geometria. A geometria bioinspirada Slime Mold conduziu $135,43 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ e a convencional $158,70 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, vazão cerca de 17,2% maior para a convencional, coerente com sua menor resistência hidráulica ($3,7808 \times 10^7$ contra $4,4304 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$). Contudo, as velocidades médias de entrada estimadas foram muito elevadas (da ordem de 1250 a $1490 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) e os números de Reynolds ultrapassaram 10^5 , valores incompatíveis com as hipóteses de escoamento incompressível e laminar. Por isso, esta condição deve ser compreendida apenas como análise de sensibilidade à pressão elevada, e não como representação direta da operação física do sistema. O balanço de massa, ainda assim, manteve-se preservado (erros da ordem de 10^{-4} %).

Comparação geral: considerando os seis casos, a geometria convencional apresentou melhor desempenho hidráulico em todas as condições: menor perda de carga em $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ e em $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ e maior vazão sob a mesma diferença de pressão elevada. A geometria bioinspirada Slime Mold mostrou-se numericamente consistente, com conservação de massa adequada e distribuição ramificada do escoamento, mas a maior complexidade geométrica resultou em maior resistência hidráulica. O resultado fisicamente mais defensável é o da condição de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, em regime laminar ($Re < 2300$). Assim, a bioinspiração, na configuração analisada, não foi suficiente para superar a geometria convencional do ponto de vista de perda de carga; o estudo, porém, foi útil por quantificar essa limitação e por indicar caminhos de melhoria, como reduzir a tortuosidade, suavizar as bifurcações, ampliar as regiões de passagem e diminuir as perdas localizadas.

5.8 Discussão dos resultados

Os resultados indicam que a geometria bioinspirada Slime Mold foi numericamente viável, apresentou convergência formal na simulação com escala corrigida e pressão imposta, conservou massa adequadamente e operou em regime laminar. Entretanto, na configuração analisada, ela não superou a geometria convencional em vazão, resistência hidráulica ou uniformidade global.

A geometria convencional apresentou desempenho hidráulico superior, permitindo maior vazão sob a mesma pressão aplicada e oferecendo menor resistência ao escoamento, além de melhor uniformidade global segundo os índices CV e UI. Isso sugere que, embora a estratégia

bioinspirada seja promissora do ponto de vista conceitual, a geometria bioinspirada ainda possui limitações geométricas que prejudicam o desempenho.

A maior resistência da geometria Slime Mold pode estar associada à complexidade do caminho de escoamento, ao aumento do comprimento efetivo das trajetórias, à presença de bifurcações sucessivas e ao coletor reverso, elementos que podem gerar perdas localizadas, acelerações em gargalos e regiões de distribuição menos uniforme.

Portanto, a principal conclusão desta etapa é que a geometria bioinspirada foi validada numericamente como alternativa viável de projeto, mas sua configuração atual ainda demanda otimização. Futuras modificações devem buscar reduzir a tortuosidade, suavizar bifurcações, diminuir gargalos, melhorar o coletor superior e redistribuir larguras de canal para favorecer maior vazão e melhor uniformidade.

Cabe ressaltar que, no contexto de uma PEMFC, maior resistência hidráulica não implica necessariamente pior desempenho: campos de escoamento com maior perda de carga, como serpentinas e interdigitados, podem favorecer a convecção sob os ressaltos e a remoção de água (LI; SABIR, 2005; IRANZO et al., 2020). Dessa forma, a comparação apresentada deve ser interpretada como uma avaliação hidráulica entre as geometrias, e não como medida direta de desempenho eletroquímico, cuja determinação exigiria a inclusão da camada difusora de gás e de uma métrica de distribuição de reagentes no plano da área ativa.

5.9 Limitações do estudo

Este estudo apresenta limitações que delimitam o alcance de suas conclusões. A análise é estritamente hidráulica: o escoamento foi tratado como ar monofásico e isotérmico, sem camada difusora de gás (GDL), sem água líquida e sem acoplamento eletroquímico ou térmico. A uniformidade foi avaliada sobre o volume interno do fluido, e não no plano da interface canal/GDL, que seria o mais representativo da distribuição de reagentes.

Do ponto de vista numérico, recomenda-se complementar a análise com um estudo de independência de malha e com a validação do solver contra solução analítica para um canal reto (escoamento laminar plenamente desenvolvido), de modo a quantificar a incerteza de discretização associada às diferenças observadas entre as geometrias.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia completa de geração, otimização, conversão geométrica, geração de malha, simulação CFD e pós-processamento de microcanais bioinspirados aplicados a PEMFC. O algoritmo Slime Mold convergiu na iteração 1401 e permitiu transformar uma rede pulmonar inicial em uma geometria com canais de larguras variáveis, coerentes com a distribuição de fluxo calculada.

A geometria Slime Mold incorporou uma árvore coletora reversa para conectar os 32 terminais originais a uma saída única, reduzindo problemas observados em configurações anteriores com múltiplas saídas ou *manifolds* retangulares com conectores abruptos. A geometria convencional, por sua vez, foi utilizada como referência comparativa por apresentar canais paralelos com entrada e saída únicas.

Os resultados indicaram que, na condição operacional principal (vazão de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, em regime laminar), a geometria convencional apresentou desempenho hidráulico superior, exigindo menor perda de carga (0,639 kPa contra 1,198 kPa) para transportar a mesma vazão; a mesma tendência foi observada na condição de vazão elevada ($5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) e na análise de sensibilidade à pressão elevada. A geometria bioinspirada Slime Mold manteve consistência numérica, convergência e excelente conservação de massa, mas impôs maior resistência hidráulica. Esses resultados consolidam a metodologia de geração, simulação e comparação quantitativa de microcanais bioinspirados; ressalta-se que a comparação é de natureza hidráulica e que avaliar o desempenho como campo de escoamento de uma PEMFC exigiria a inclusão da camada difusora de gás, do escoamento bifásico (água) e do acoplamento eletroquímico.

As limitações apontadas na seção 5.9 delimitam um conjunto de desdobramentos diretos deste trabalho, organizados a seguir em duas frentes: a avaliação dos modelos físicos empregados e a verificação e validação numérica dos resultados.

Quanto aos modelos, recomenda-se avaliar a adequação da hipótese laminar nas condições de maior solicitação. Na condição de vazão elevada, os números de Reynolds obtidos, próximos de 3964 para a geometria bioinspirada e de 3997 para a convencional, situam-se acima do limite convencional de transição, de modo que a simulação laminar pode subestimar a dissipação e, consequentemente, a perda de carga. Sugere-se repetir esses casos com modelos de turbulência de duas equações, como o k- ϵ padrão e o k- ω SST, e com um modelo de transição, comparando as perdas de carga previstas com as obtidas na formulação laminar. Essa comparação permitiria

quantificar o erro de modelagem associado à hipótese atual e definir a partir de qual vazão o tratamento turbulento se torna necessário.

Ainda quanto aos modelos, a condição de pressão elevada produziu velocidades da ordem de 1250 a 1490 metros por segundo, o que corresponde a números de Mach superiores a 0,3 e invalida a hipótese de escoamento incompressível adotada. Para tratar adequadamente essa faixa, seria necessário empregar um solver compressível, como o rhoSimpleFoam, com equação de estado e balanço de energia, ou então reformular a condição de contorno para diferenças de pressão compatíveis com a operação real de uma PEMFC.

Quanto à verificação numérica, recomenda-se conduzir um estudo formal de independência de malha, com pelo menos três níveis sistemáticos de refinamento para cada geometria, calculando o índice de convergência de malha por extrapolação de Richardson. Esse procedimento permitiria estabelecer a incerteza de discretização associada à perda de carga e verificar se a diferença observada entre as geometrias, de aproximadamente 87% na condição realista, é significativamente maior que essa incerteza.

Recomenda-se também validar o solver contra solução analítica conhecida antes de comparar as geometrias. Um caso adequado é o escoamento laminar plenamente desenvolvido em canal retangular, para o qual existem soluções tabeladas do perfil de velocidade e do produto entre o fator de atrito e o número de Reynolds. A reprodução desses valores com a mesma estratégia de malha e os mesmos esquemas de discretização utilizados neste trabalho ofereceria evidência direta de que as diferenças registradas decorrem da geometria, e não da configuração numérica. Complementarmente, sugere-se verificar o comprimento de entrada hidrodinâmico adotado nas extensões de entrada e saída, assegurando que o perfil esteja desenvolvido nas seções onde as métricas são extraídas.

Por fim criar e incluir a camada difusora de gás, do escoamento bifásico (água) e do acoplamento eletroquímico, em simulação para validar o real desempenho e ganho dessa geometria.

Para fins de transparência, foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa como apoio à revisão gramatical, ortográfica e à organização textual do manuscrito. A concepção da metodologia, a execução das simulações, o tratamento dos dados, a interpretação dos resultados e as conclusões são de responsabilidade do autor.

REFERÊNCIAS

- BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with constructal theory**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- BEJAN, A.; ZANE, J. P. **Design in nature: how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization**. New York: Doubleday, 2012.
- BONIFACI, V.; MEHLHORN, K.; VARMA, G. Physarum can compute shortest paths. **Journal of Theoretical Biology**, v. 309, p. 121-133, 2012.
- IRANZO, A.; ARREDONDO, C. H.; KANNAN, A. M.; ROSA, F. Biomimetic flow fields for proton exchange membrane fuel cells: a review of design trends. **Energy**, v. 190, art. 116435, 2020.
- JASAK, H. **Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows**. 1996. Tese (Doutorado) – Imperial College London, London, 1996.
- KANDLIKAR, S. G. High flux heat removal with microchannels: a roadmap of challenges and opportunities. **Heat Transfer Engineering**, v. 26, n. 8, p. 5-14, 2005.
- LI, X.; SABIR, I. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: flow-field designs. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 30, n. 4, p. 359-371, 2005.
- MARAPPAN, M. et al. Performance studies of proton exchange membrane fuel cells with different flow field designs: review. **The Chemical Record**, v. 21, n. 4, p. 663-714, 2021.
- MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM and Matlab**. Cham: Springer, 2016.
- NAKAGAKI, T.; YAMADA, H.; TÓTH, Á. Intelligence: maze-solving by an amoeboid organism. **Nature**, v. 407, n. 6803, p. 470, 2000.
- O'HAYRE, R.; CHA, S. W.; COLELLA, W.; PRINZ, F. B. **Fuel cell fundamentals**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- SHAH, R. K.; LONDON, A. L. **Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data**. New York: Academic Press, 1978.
- TERO, A.; KOBAYASHI, R.; NAKAGAKI, T. A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold. **Journal of Theoretical Biology**, v. 244, n. 4, p. 553-564, 2007.
- TERO, A. et al. Rules for biologically inspired adaptive network design. **Science**, v. 327, n. 5964, p. 439-442, 2010.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2007.

WEIBEL, E. R. **Morphometry of the human lung**. Berlin: Springer, 1963.

WELLER, H. G.; TABOR, G.; JASAK, H.; FUREBY, C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. **Computers in Physics**, v. 12, n. 6, p. 620-631, 1998.

