

ANÁLISE NUMÉRICA E SENSORIAMENTO INTELIGENTE USANDO TÉCNICAS DE CFD

Eric Robalinho (UERGS / Porto Alegre) Email: ericrobalinho@yahoo.com.br
Indhirha Deckmann (UERGS / Porto Alegre) Email: indhirha.deckmann@gmail.com

Resumo: A realização de simulações numéricas representa uma grande vantagem competitiva em projetos de engenharia de prazos limitados. Este artigo apresenta uma introdução ao uso de ferramentas de Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*), em diversos modelos numéricos, em especial aqueles relacionados a trabalhos na área de energia do hidrogênio, células a combustível tipo Membrana Trocadora de Prótons (*Proton Exchange Membrane - PEM*), e produção e uso de hidrogênio como vetor energético. O artigo mostra o uso de volumes, seções planas, superfícies e linhas como entidades geométricas definidas para a visualização de grandezas físicas como velocidade, pressão, densidade de corrente, temperatura, fração molar, saturação de água, ou o cálculo integral sobre tais objetos geométricos. Os especialistas nas áreas em estudo têm como fundamento a validação dos modelos via dados experimentais, e depois a definição das regiões que serão sensoriadas. Conclui-se que para capturar importantes aspectos dos fenômenos estudados é necessário o sensoriamento numérico, que torna possível a quantificação dos valores medidos e permite *insights* valiosos sobre os problemas propostos.

Palavras-chave: Análise Numérica, CFD, Célula a combustível PEM, Sensoriamento.

NUMERICAL ANALYSIS AND INTELLIGENT SENSING USING CFD TECHNIQUES

Abstract: Numerical simulations represent a major competitive advantage in time-limited engineering projects. This paper presents an introduction to the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) tools in several numerical models, especially those related to work in the area of hydrogen energy, Proton Exchange Membrane Fuel Cells - PEMFC, and production and use of hydrogen as energetic vector. The article shows the use of volumes, cross sections, surfaces and lines as geometric entities defined for the visualization of physical quantities such as velocity, pressure, current density, temperature, molar fraction, water saturation, or integral calculus on such geometric objects. The specialists in the study areas are based on the validation of the models via experimental data, and then the definition of the regions to be scanned. It is concluded that to capture important aspects of the studied phenomena, it is necessary the numerical sensing, which makes possible the quantification of the measured values and allows valuable insights on the proposed problems.

Keywords: *Numerical Analysis, CFD, PEM Fuel Cell, Sensing.*

1. Introdução

O hidrogênio desponta hoje como um vetor energético promissor, emergindo numa sociedade que já se prepara para a transição dos combustíveis fósseis para a economia do hidrogênio. Estas mudanças passam por algumas tecnologias-chave que permitirão a produção, o armazenamento e o uso do hidrogênio (FUEL CELL HANDBOOK, 2004). Uma dessas tecnologias é a célula a combustível. Esta tecnologia é uma das mais promissoras alternativas para aplicações como fonte de energia elétrica em sistemas estacionários, móveis e portáteis, em especial aquelas que são alimentadas por hidrogênio/ar. Trata-se de um mercado multibilionário, com interesses das grandes corporações do petróleo (chamadas hoje de empresas de energia), e das grandes empresas montadoras de carros. Essa disposição para vencer barreiras tecnológicas faz nascerem muitos campos para pesquisas e desenvolvimentos, e, num futuro não distante, muitos acreditam estaremos vivendo na era do hidrogênio (ROBALINHO, 2009).

As células a combustível se tornaram nas últimas décadas economicamente competitivas com os tradicionais sistemas de produção de energia. Seu princípio de

funcionamento foi descoberto há aproximadamente 180 anos por Sir William Grove. Em 1839, Grove produziu eletricidade por um processo reverso da eletrólise, e em 1842 já desenvolvera um empilhamento (*stack*) de 50 células, chamado de “bateria voltaica gasosa”. A primeira aplicação comercial moderna se deu com o programa aeroespacial americano na década de 60, e nos dias atuais esta tecnologia integra sistemas automotivos, equipamentos de emergência (*backup*) de energia em hospitais e equipamentos portáteis, como computadores e equipamentos de comunicação.

Alguns aspectos positivos do uso de células a combustível são: maior eficiência na produção de eletricidade, geração de energia em áreas remotas, emissão reduzida ou nula de poluentes, menor poluição sonora, modulares, possibilidade de cogeração. Com relação ao fornecimento ininterrupto de energia elétrica, sem oscilações de potencial, a solução utilizando sistemas de células os combustíveis associados à rede elétrica convencional permite índices de confiabilidade bastante elevados, exigência de setores mais automatizados como bancos, hospitais e telecomunicações (SILVA & ROBALINHO, 2007).

Uma célula a combustível PEM (*Proton Exchange Membrane*) é um dispositivo eletroquímico que converte energia química diretamente em energia elétrica e calor por meio de reações desencadeadas em duas camadas catalíticas. Estas camadas estão separadas por uma membrana polimérica que isola eletronicamente os eletrodos, mas permite a condução de íons por meio de redes de moléculas de água. Nos sistemas com células PEM, o gás hidrogênio é alimentado no lado do ânodo, onde reage com a camada catalítica anódica e se separa em elétrons e íons (prótons). Os íons passam através da membrana polimérica para o outro eletrodo (cátodo). Então, no cátodo, estes íons se encontram com o oxigênio e na presença da camada catalítica catódica, formam água. Os elétrons fluem forçosamente pelo circuito externo, produzindo energia elétrica. Caso a alimentação do combustível seja mantida, observa-se a operação contínua do dispositivo. Um esquema explicativo é mostrado na Figura 1.

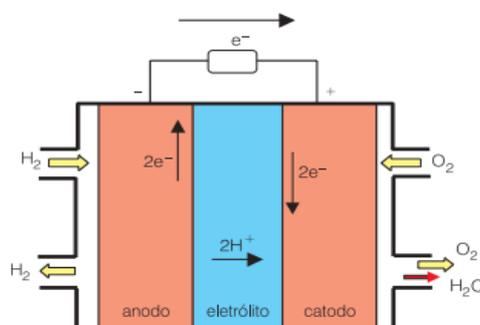


Figura 1 - Célula a combustível a membrana polimérica. (ALVES, 2012)

A expectativa moderna em relação ao uso de energia é que sejam utilizadas tecnologias que descentralizem a matriz energética, gerando energia de forma mais limpa e ainda, que se feche o ciclo das fontes renováveis. Uma resposta para este anseio passa pela tecnologia de células a combustível, que desponta num cenário onde as evoluções socioeconômicas e tecnológicas convergem para a demanda por energia. Para o leigo, as células a combustível estão relacionadas com eletroquímica e basicamente produzem eletricidade de maneira eficiente e ecologicamente limpa, sem emissão de resíduos. Porém, o conceito de células a combustível é bem mais amplo, necessitando de um estudo detalhado de seus processos e partes que compõem o dispositivo que faz aquela transformação energética (WENDT *et al.*, 2000; ANTONIASSI, 2017).

As células a combustível são baterias de funcionamento contínuo, que produzem corrente contínua pela reação de combustão (eletroquímica) a frio. O combustível é, em geral, um gás, sendo o mais geralmente utilizado, o gás hidrogênio. Dessa maneira, o hidrogênio é oxidado a prótons num eletrodo de difusão gasosa, liberando elétrons. No eletrodo oposto, que também é um eletrodo de difusão gasosa no caso de células a membrana polimérica (PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), prótons, elétrons e oxigênio adsorvido reagem formando água. A reação global é a da formação da água a partir de hidrogênio e oxigênio, com liberação de calor. A necessidade de empilhamento em série de várias unidades de células, torna-se óbvia, pois se precisa obter potências práticas, da ordem de 150 a 200 V (WENDT *et al.*, 2000; LINARDI, 2010). O uso das células a combustível se dá próximo dos equipamentos consumidores, o que é considerado uma tecnologia de geração distribuída.

Normalmente estas células são de potências reduzidas, ou seja, menos de uma dezena de MW. Além da eficiência energética, outras vantagens do uso de células a combustível são: baixo ruído (zero), não utiliza partes móveis (não gerando manutenção), tem habilidade de trabalhar em cogeração (pois produz calor), têm flexibilidade de combustível (além do hidrogênio, pode-se usar metanol, etanol e outros). As desvantagens ficam por conta dos altos custos de metais nobres, como por exemplo, a platina, utilizada nos eletrocatalisadores, o uso de gases ultrapuros, cujo custo é alto, e as dificuldades para realizar o transporte e o armazenamento dos combustíveis (como por exemplo, o hidrogênio).

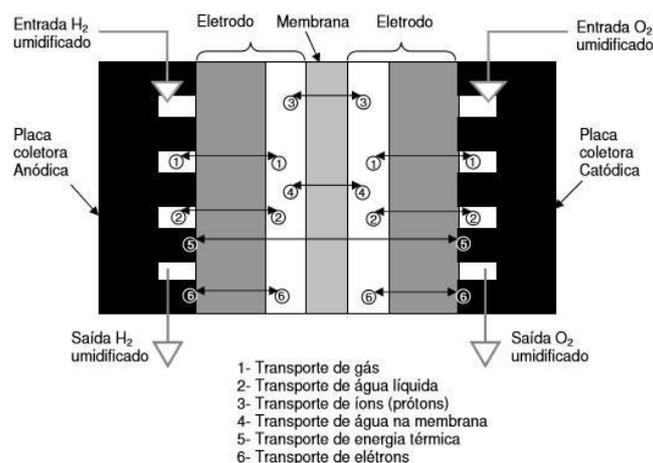


Figura 2 - Processos de transporte em uma célula a combustível tipo PEM. (ROBALINHO, 2009)

Numa célula a combustível a membrana polimérica (PEMFC), pode-se destacar diversos processos ou fenômenos físico-químicos, que permitem o funcionamento da mesma. A Figura 2 mostra esses fenômenos, que são estudados de maneira aprofundada quando se quer determinar o comportamento da célula (ROBALINHO, 2009). Estes processos de transporte dão origem aos modelos matemáticos e computacionais implementados por pesquisadores da área, com o objetivo de ampliar a compreensão do comportamento das células e de seus componentes.

O processo de combustão a frio tem alta eficiência, pois nele ocorre a conversão direta de energia química para a energia elétrica, com pouca perda. Nos processos de queima de combustíveis fósseis há muita perda, pois há necessidade de conversão em energia térmica e energia cinética, para finalmente se obter a energia elétrica. Em geral, utiliza-se mais de uma célula para aplicações práticas, pois assim correntes e tensões compatíveis com o uso que se deseja. Esses conjuntos de células são chamados de pilhas a combustível (ou empilhamento ou *stack*). Existem diversos tipos de células a combustível, dependendo do uso que se quer,

das restrições do sistema elétrico disponível, do tipo de eletrólito e outras características. A seguir pode-se observar no Quadro 1 um resumo dos tipos de células mais comuns.

Quadro 1 - Tipos de células a combustível e respectivas características.

Tipo (*)	Eletrólito	Faixa de temp. (°C)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
PEMFC	Polímero (H ₃ O ⁺)	20-120	Alta densidade de potência	Custo da membrana e catalisador	Veículos automotores
			Operação flexível	Contaminação do catalisador com CO	Espaçonave
PAFC	H ₃ PO ₃ (H ₃ O ⁺)	160-220	Maior desenvolvimento tecnológico	Controle da porosidade do eletrodo	Unidades estacionárias
			Tolerância a CO	Corrosão do cátodo	Unidades estacionárias
MCFC	Carbonatos fundidos (CO ₃ ²⁻)	550-660	Tolerância a CO	Interface trifásica de difícil controle	Cogeração de eletricidade / calor
			Tolerância a CO/CO ₂		Unidades estacionárias
SOFC	ZrO ₂ (zircônia) (O ²⁻)	850-1000	Alta eficiência (cinética favorável)	Problemas de materiais	Unidades estacionárias
			A reforma do combustível pode ser feita na célula	Expansão térmica	Cogeração de eletricidade/calor

* PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell; MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell; SOFC – Solid Oxid Fuel Cell.

Fonte: ELETROCELL, 2018.

Dentre os tipos de células a combustível apresentados, a atenção maior é dada em relação à célula polimérica (PEMFC), pois a aplicação em veículos automotores é de grande importância econômica e ambiental. A substituição das frotas atuais por veículos movidos a hidrogênio, ou etanol direto, seria uma revolução da indústria, causando importante impacto nas atividades relacionadas a essas indústrias e à poluição atmosférica por gases tóxicos, em especial CO e CO₂.

Em relação à operação, a célula a membrana polimérica possui ótimo rendimento a baixas temperaturas (aproximadamente 100°C), facilidade de montagem em módulos (modularidade), custo baixo de investimento (para unidades de pequena potência). O gás hidrogênio é o principal combustível usado neste tipo de célula, e o oxigênio atmosférico é o oxidante. Uma célula deste tipo, operando com os gases hidrogênio e oxigênio tem como subprodutos apenas água e calor, sendo, portanto, livre de poluentes e resíduos. As equações (1), (2) e (3) representam as reações que ocorrem nos eletrodos da célula a membrana polimérica (ANTONIASSI, 2017; ELECTROCELL, 2018; ROBALINHO, 2009).

Os componentes da célula a membrana polimérica são objeto de muito estudo ainda, sendo que o principal deles, a membrana polimérica (que dá nome à célula), é chamada de Nafion, um produto que o mundo inteiro compra da DuPont, fabricante exclusiva. Naturalmente, há outros tipos de eletrólito sólido no mercado, mas o Nafion é o mais utilizado por suas características de qualidade e eficiência. A Figura 3 mostra os principais

componentes deste tipo de célula (ROBALINHO, 2009; BARBIR, 2005).

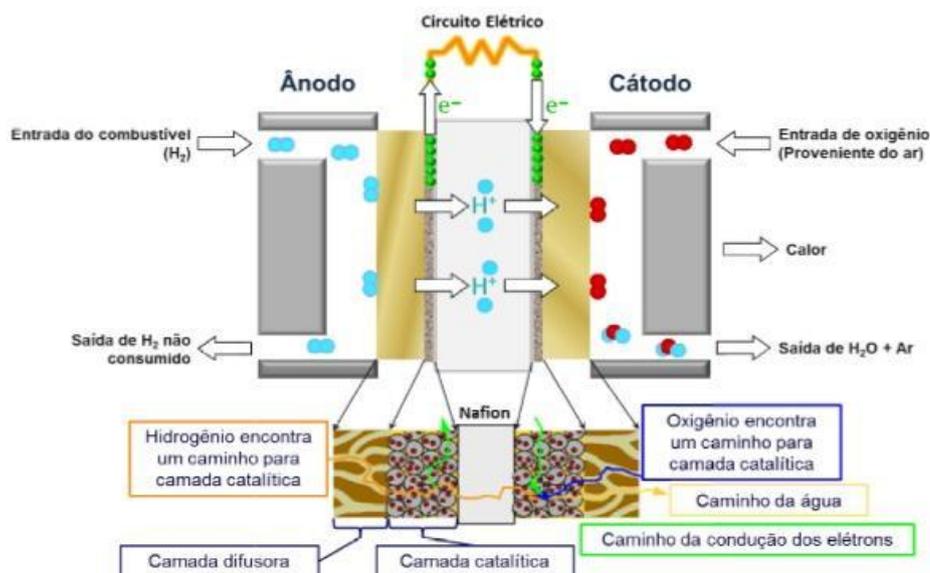


Figura 3 – Componentes da célula tipo PEM. (ANTONIASSI, 2017)

As áreas de pesquisa e desenvolvimento ativas atualmente para células a combustível PEM podem ser divididas em: eletrocatalise, membrana, vedação, placas bipolares, otimização de empilhamentos (*stack*), gerenciamento de água e calor, ferramentas de diagnóstico, armazenamento e transporte de combustível (hidrogênio), durabilidade e otimização de condições de operação. A modelagem computacional realizada por meio de simulações numéricas tem se mostrado uma importante ferramenta de análise e projeto de células a combustível e de seus componentes. Além da diversidade de processos (observados na Figura 2), a simultaneidade e a dificuldade de sensoriamento experimental trazem desafios para essa área de pesquisa, conhecida por modelagem CFD.

Nas últimas décadas nota-se no mundo todo o nascimento de dezenas de laboratórios e o consórcio de empresas para finalidade de desenvolvimento de protótipos, componentes e ainda para a formação de mão de obra especializada em células a combustível e infraestrutura do hidrogênio. No Brasil existem os laboratórios vinculados às Universidades e as iniciativas de empresas da área de energia, como a Petrobrás. O laboratório do Centro de Célula a Combustível e Hidrogênio – CCCH do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, vinculado à Universidade de São Paulo – USP/SP está hoje à frente de inúmeras pesquisas na área de hidrogênio. Na última década foram desenvolvidos desde protótipos de células unitárias (ANDRADE, 2008; ROBALINHO, 2009; PAULINO, 2014), novos eletrocatalisadores, aplicações inovadoras com uso de modelagem CFD, células SOFC, reforma a vapor, normas de componentes, produção de hidrogênio via eletrolisadores, pesquisas de durabilidade (ANDREA, 2017) e otimização de condições de operação de

células, até *stacks* de média potência para testes e injeção na rede (CUNHA, 2009).

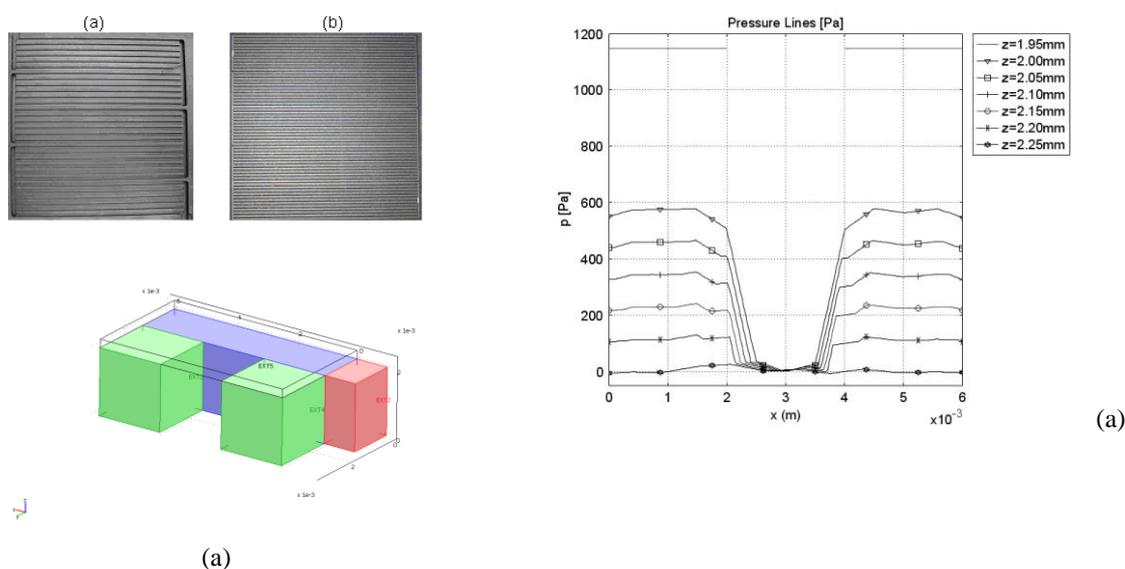
Um importante aspecto das células a combustível é a medida de seu desempenho, ou seja, uma leitura do potencial versus densidade de corrente. Contudo, com ferramentas adequadas, os pesquisadores conseguem fazer leituras das velocidades, pressões, frações molares e outras, que ajudam significativamente a compreensão do comportamento das células (BARBIR, 2005; LINARDI, 2010). Dependendo do objetivo do trabalho, há um objeto geométrico definido num modelo CFD, que fornecerá os dados necessários ao entendimento do fenômeno que está sendo estudado. Tal sensoriamento torna possível a realização de *insights* dos processos ou sistemas realizados pelos engenheiros e cientistas que estão envolvidos com o projeto (BURDEN & FAIRES, 1989; CARNES & DJILALI, 2005).

O objetivo deste artigo é apresentar alguns projetos na área de células a combustível e hidrogênio, ressaltando a utilização da modelagem CFD como importante ferramenta de análise. Os dados experimentais e numéricos completos estão disponíveis em suas respectivas publicações acadêmicas. Desta maneira, são expostos quatro conjuntos de exemplos, (a) até (d), dentro do tópico 2 - Aplicações em células a combustível PEM. No tópico 3 - Sensoriamento via modelagem CFD é feita uma breve discussão sobre modelagem CFD e é apresentada uma tabela resumida de trabalhos recentes que utilizaram modelagem CFD como ferramenta de análise e sensoriamento na área de hidrogênio.

2. Aplicações em células a combustível PEM

a) Estudo dos canais de distribuição de gases

O projeto dos canais de distribuição de gases representa um desafio no processo de desenvolvimento das placas de grafite. Numa célula a combustível tipo PEM, o desenho dos canais de distribuição de gases é testado inicialmente num software CFD, com o objetivo de otimização das zonas de baixo fluxo de gases. Outro aspecto importante é a grande dificuldade de manufatura das placas de grafite, que se tornam mais caras à medida que se utiliza desenhos mais refinados. Na Figura 4 observam-se as placas reais e os domínios geométricos (à esquerda); e testes da modelagem CFD mostrando distribuições de pressões e a quantificação dos valores de pressões por meio do respectivo gráfico (à direita).



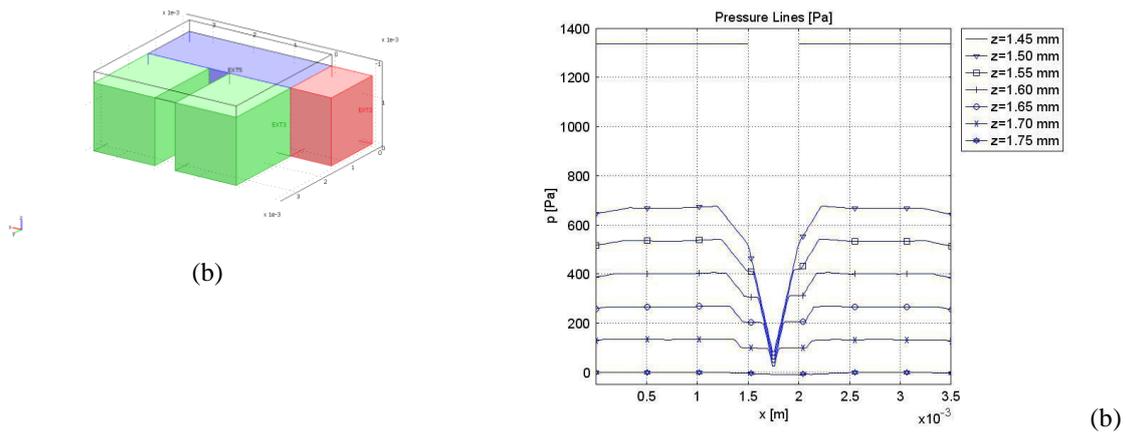


Figura 4 - Placas reais e domínios geométricos (à esquerda); linhas de leitura de dados “scan lines” (à direita). (ANDRADE *et al.*, 2009, CUNHA, 2009; ROBALINHO, 2009; ANDRADE, 2008)

b) Desenvolvimento de uma célula a combustível PEM de 144 cm² de área

Este trabalho associou esforços de laboratório e computacionais para obter o melhor resultado em termos de condições de operação e densidades de corrente. Na Figura 5 podem ser observados alguns exemplos dos passos do desenvolvimento de uma célula unitária tipo PEM com 144 cm² de área. As placas do protótipo e o domínio de cálculo são mostrados na Figura 5. Os resultados das simulações representam leituras em campos de distribuição no plano e linhas, com o uso de cálculo de integração (Figura 6). Podem-se observar os campos de distribuição da modelagem CFD para velocidades, pressões e frações molares. A comparação entre os resultados experimentais e a análise numérica mostrou-se ótima neste caso, contribuindo para que o desempenho final da célula ficasse com valor de 480 mA cm⁻² para o potencial de operação de 0.6 V.

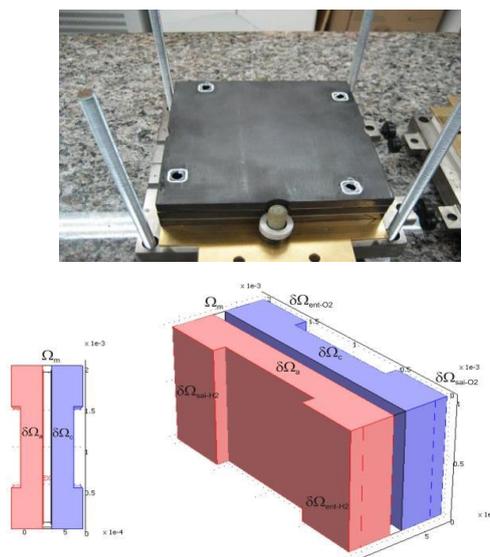


Figura 5 - Placas de grafite do protótipo e domínio de cálculo. (ROBALINHO, 2009)

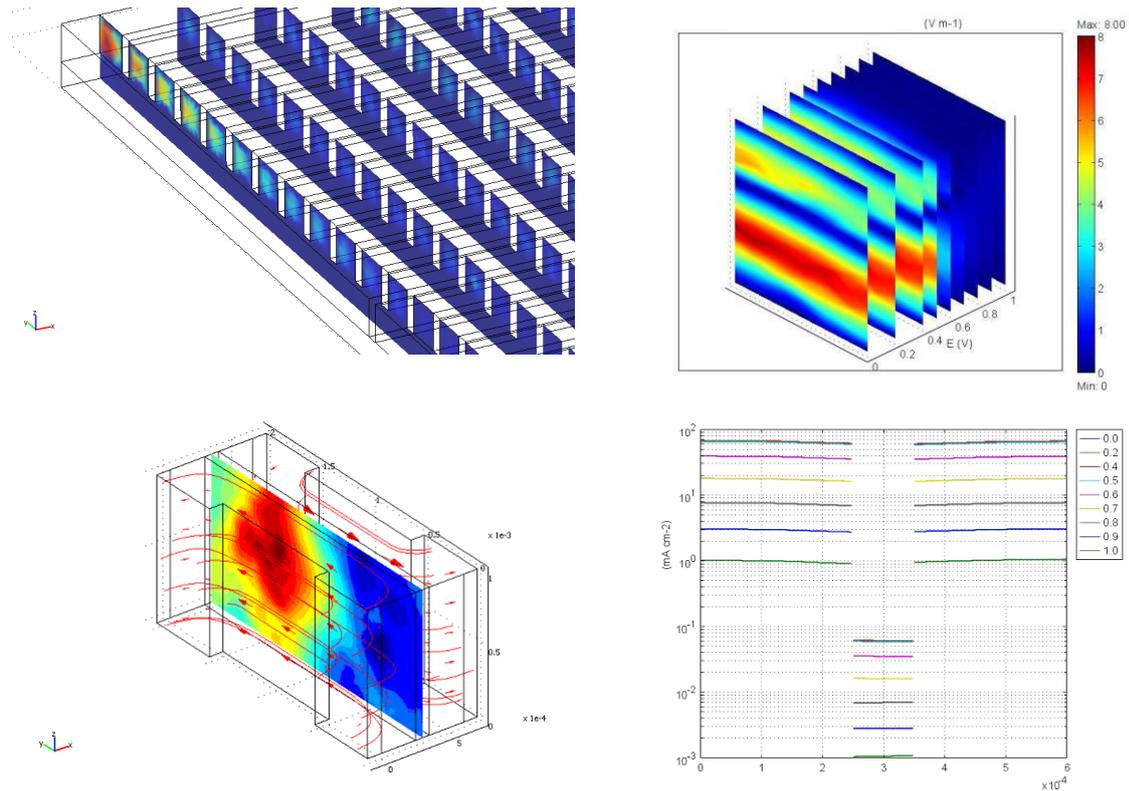
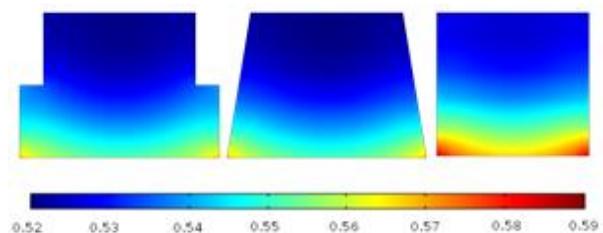
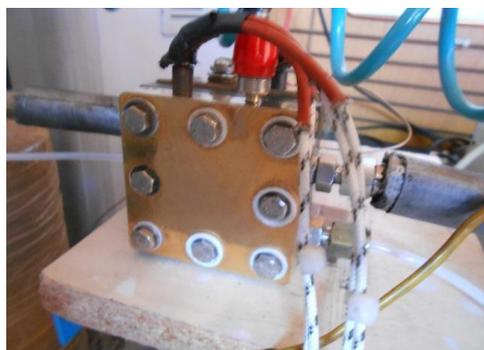


Figura 6 - Resultados da modelagem CFD: seções planas (à esquerda); e cálculo integral sobre planos e linhas (à direita). (ROBALINHO, 2009)

c) Desempenho de células com diferentes geometrias de canais

Estes trabalhos têm o objetivo principal de investigar as diferenças entre diferentes configurações geométricas dos canais de distribuição de gases: serpentina e interdigital. E ainda, três diferentes configurações de canais: retangular com degrau, trapezoidal e retangular. Um protótipo de célula a combustível PEM com 5 cm² de área geométrica foi construído e operado no laboratório. A modelagem CFD foi implementada com o objetivo de direcionar os experimentos. A Figura 7 mostra a célula utilizada no laboratório, com seu respectivo domínio geométrico (à esquerda). Os resultados obtidos das simulações CFD podem ser visualizados em termos de campos de distribuição e gráficos construídos a partir do sensoriamento de linhas de leitura (à direita, respectivamente).



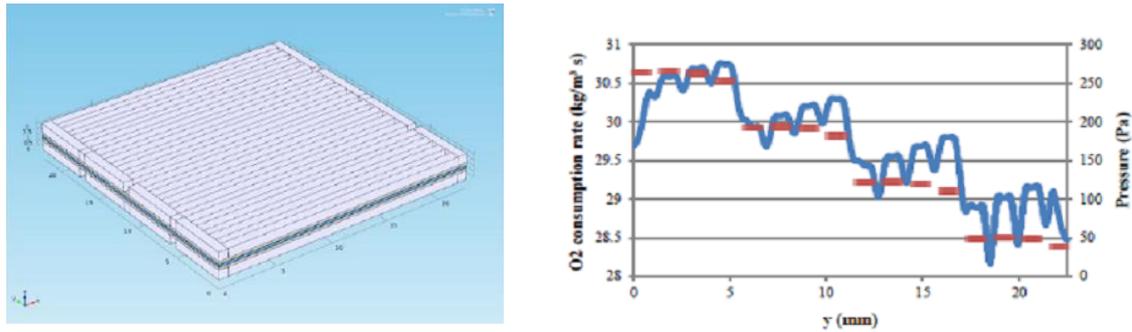


Figura 7 – Protótipo e domínio geométrico (à esquerda); secções planas e linhas de leitura “scan lines” (à direita). (PAULINO *et al.*, 2017; PAULINO, 2014)

d) Estudo de condensação de água no cátodo

Este quarto conjunto de experimentos mostra a utilização da modelagem CFD como técnica poderosa para o estudo do comportamento de células sob condições de operação particulares, ou seja, operando a baixas temperaturas. Nestas condições, o controle eficiente da célula é dificultado porque os problemas de encharcamento (*flooding*) comprometem o rendimento. Este projeto utiliza a ferramenta numérica para prever as situações de grande condensação de água, aumentando a compreensão do funcionamento da célula e auxiliando sua operação em bancada. A Figura 8 mostra o protótipo utilizado e seu domínio de cálculo (à esquerda); e alguns resultados da modelagem CFD (à direita).

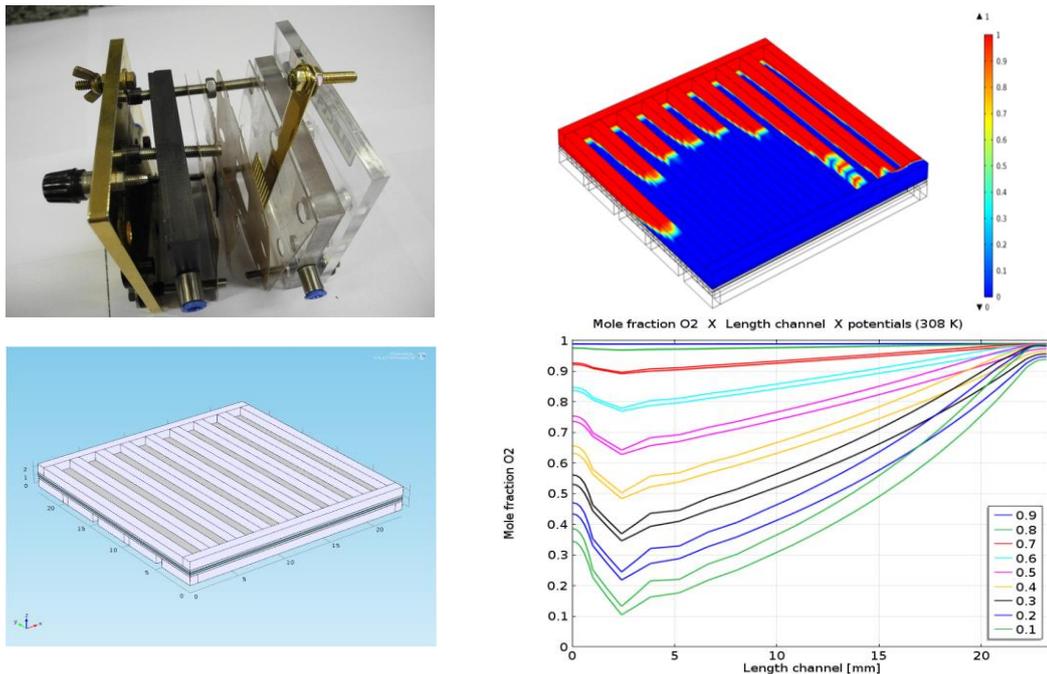


Figura 8 – Protótipo e domínio geométrico (à esquerda); secções planas, linhas e superfícies de leitura de dados (à direita). (SANDRO, 2014)

3. Sensoriamento via modelagem CFD

Nota-se um crescimento do uso de estudos numéricos de processos térmicos, físicos, químicos e outros, por engenheiros e cientistas de diferentes países. De acordo com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), aproximadamente 85% da capacidade computacional dos grandes computadores em todo o mundo é utilizada para resolver problemas de CFD

(PASHCHENKO, 2017). Um importante relatório desta mesma instituição (VISION 2030) indica que a capacidade de computação estimada para a solução de problemas de fluidodinâmica computacional crescerá aproximadamente 10-12% por ano nas próximas duas décadas (SLOTNICK, 2014).

A maior vantagem da modelagem numérica (modelagem CFD) é a possibilidade de obtenção de informações visuais que podem ser quantificadas, sobre a natureza dos processos investigados sem a necessidade de equipamentos experimentais, usualmente caros (PASHCHENKO, 2017). O projeto que utiliza ferramentas numéricas poderá abreviar seu tempo de execução, além de diminuir despesas com a parte experimental.

Com o objetivo de ampliar a compreensão da modelagem CFD realizou-se um levantamento de trabalhos recentes na área de hidrogênio, destacando-se a ferramenta numérica utilizada na pesquisa, os objetos geométricos utilizados para a coleta de dados, e a área de aplicação (dentro do tema energia do hidrogênio). Pode-se notar na Tabela 1 que os diversos softwares realizaram o sensoriamento por meio de objetos conhecidos: linhas, seções planas, superfícies ou volumes, escolha feita de acordo com os conhecimentos prévios do especialista que desenvolve o trabalho de pesquisa. As aplicações observadas são: eletrolisadores, testes de durabilidade e de componentes das células, normas de segurança (DOE – *United States Department of Energy*), combustão de hidrogênio, gerenciamento de água e calor, placas de distribuição de gases, eletrólito, GDL – *Gas Diffusion Layer*, otimização e testes de funcionamento de *stacks* de potências acima de 1 kW e testes em veículos elétricos movidos a hidrogênio (FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle*).

Tabela 1 - Aplicações recentes com modelagem CFD.

Artigo	Software	Objeto geométrico	Área de aplicação
Drakselová <i>et al.</i> , 2018	Ansys Fluent, Matlab	Secções planas	Stack PEM de alta temperatura
Lim <i>et al.</i> , 2017	Ansys Fluent	Secções planas	Placas Bipolares PEM
Keenan <i>et al.</i> , 2017	H2FC Cyber-laboratory, OpenFoam, Ansys Fluent	Secção plana	Validação de plataforma (<i>open access</i>)
Baraldi <i>et al.</i> , 2017	Ansys CFX	Secções planas e volumes	Protocolo de Segurança (SUSANA)
Marchi <i>et al.</i> , 2017	SciPy Python	Secções planas	Segurança do hidrogênio (DOE)
Ozden <i>et al.</i> , 2017	TRNSYS	Volumes	Efeitos de degradação PEM
Lotric <i>et al.</i> , 2017	Comsol	Secções planas, superfícies e volumes	PEM de alta temperatura (HT PEMFC) ereforma
Liu <i>et al.</i> , 2017	Ansys Fluent	Secções planas, superfícies e volumes	Stack 5-kW PEM
Haghighayegh <i>et al.</i> , 2017	Comsol	Secções planas e volumes	PEMFC
Pashchenko, 2017	Ansys Fluent	Secções planas e volumes	Combustão de Hidrogênio

Zhang <i>et al.</i> , 2018	Ansys CFX	Linhas, secções planas, superfícies e volumes	Veículos a hidrogênio (FCEV)
García-Salaberrí <i>et al.</i> , 2017	Ansys Fluent	Linhas, secções planas, superfícies e volumes	Gerenciamento de água PEM
Huang <i>et al.</i> , 2018	Comsol	Secções planas, superfícies e volumes	Produção de hidrogênio

Fonte: AUTORES, 2019.

4. Conclusões

Considerando-se os exemplos mostrados no presente artigo, o uso de técnicas numéricas no sensoriamento de células a combustível PEM representou uma vantagem da engenharia de projetos, reduzindo os custos e acelerando a fabricação de protótipos. Observou-se que os objetos geométricos definidos para a coleta de dados foram: linhas, secções planas, superfícies e volumes. Para a análise de determinados parâmetros realizaram-se cálculos de integração, além do sensoriamento da informação disponível nas simulações. Confirmou-se a vantagem do uso das técnicas numéricas em trabalhos de desenvolvimento de componentes de células a combustível PEM, em particular para otimização de materiais e compreensão de seu funcionamento em diferentes condições de operação.

O uso de softwares computacionais permitiu a implementação de diferentes problemas e complexas multifísicas, além de testar diferentes condições de operação sem necessidade de observação do análogo experimental. Finalmente, o conhecimento das técnicas de sensoriamento numérico, em especial da determinação dos objetos geométricos de leitura, dependeu de um bom treinamento do especialista envolvido no projeto.

Referências

- ALVES, JANAINA. *O que é célula a combustível?* <http://www.usp.br/portaliobiosistemas/?p=4316>, 28/10/2012. Acessado em 07/11/2018.
- ANDRADE, A. B. *Desenvolvimento de conjuntos eletrodo-membrana-eletrodo para células a combustível a membrana trocadora de prótons (PEMFC) por impressão à tela*. Dissertação de Mestrado, IPEN/SP, 2008.
- ANDRADE, A.B.*et al.* *Fabrication of High Precision PEMFC Membrane Electrode Assemblies by Sieve Printing Method*. Journal of Fuel Cell Science and Technology (Online), v. 6, p. 021305-1-021305-3, 2009.
- ANDREA, VINÍCIUS. *Estudo comparativo de desempenho e durabilidade de células a combustível do tipo PEM*. Tese de Doutorado. IPEN / USP, São Paulo, SP, 2017.
- ANTONIASSI, R. M. *Preparação de nanopartículas de platina com diferentes morfologias nos materiais Pt/C PtSnO₂/C para aplicação como ânodo em células a combustível de etanol direto*. Tese de Doutorado. IPEN / USP. São Paulo, SP, 2017.
- BARALDI, D. *et al.* *Development of a model evaluation protocol for CFD analysis of hydrogen safety issues the SUSANA project*. International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017) 7633-7643.
- BARBIR, FRANO. *PEM Fuel Cells – Theory and Practice*. Elsevier Academic Press, Burlington, MA, 2005.
- BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. *Numerical Analysis*. 4. ed., PWS-Kent Pub Co., 1989.
- CARNES, B.; DJILALI, N. *Systematic parameter estimation for PEM fuel cell models*. J. Power Sources, v. 144, p. 83-93, 2005.
- CUNHA, E. F. *Evaluation and application of PEMFC fuel cell's technologies developed at IPEN applied to a 500 We Fuel Cell Stack*. PhD Thesis, IPEN/CNEN, São Paulo, SP, 2009.

- DRAKSELOVA, Monika et al.** *Three-dimensional macro homogeneous mathematical model of an industrial-scale high-temperature PEM fuel cell stack.* *Electrochimica Acta* 273 (2018) 432-446.
- ELECTROCELL.** Site da empresa, *Como funciona a célula a combustível?* http://www.electrocell.com.br/oqueeacc_pt.htm. Acessado em 07/11/2018.
- FUEL CELL HANDBOOK**, 7.ed., EG&G Technical Services, Inc., U.S.Department of Energy – DOE, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, Morgantown, West Virginia, USA, November 2004.
- GARCÍA-SALABERRI P.A. et al.** *Hydration and dehydration cycles in polymer electrolyte fuel cells operated with wet anode and dry cathode feed: A neutron imaging and modeling study.* *Journal of Power Sources* 359 (2017) 634-655.
- HAGHAYEGH, Marjan; EIKANI, Mohammad H.; ROWSHANZAMIR, Soosan.** *Modeling and simulation of a proton exchange membrane fuel cell using computational fluid dynamics.* *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 21944-21954.
- HUANG, P.H.; KUO, J.K.; TSAI, S.J.; TSAI, Y.C.** *Evaporation analysis of different fuels in evaporator coil of stem reformer for stationary PEM fuel cell systems.* *Applied Thermal Engineering* 128 (2018) 564-577.
- KEENAN, J.J.; MAKAROV, D.V.; MOLKOV, V.V.** *Modelling and simulation of high-pressure hydrogen jets using notional nozzle theory and open source code OpenFOAM.* *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 7447-7456.
- LIM, B.H. et al.** *Numerical analysis of modified parallel flow field designs for fuel cells.* *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 9210-9218.
- LINARDI, MARCELO.** *Introdução à ciência e Tecnologia de Células a Combustível.* 1. ed., São Paulo, SP: Artliber, 2010.
- LIU, Hung-Hsiao et al.** *Modeling and design of air-side manifolds and measurement on an industrial 5-kW hydrogen fuel cell stack.* *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 19216-19226.
- LOTRIC, A.** *Conceptual design of an integrated thermally self-sustained methanol steam reformer eHigh-temperature PEM fuel cell stack manportable power generator.* *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 16700-16713.
- MARCHI, C. San et al.** *Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program, part 3: Advances in research and development to enhance the scientific basis for hydrogen regulations, codes and standards.* *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 7263-7274.
- OZDEN, Ender; TARI, Ilker.** *PEM fuel cell degradation effects on the performance of a stand-alone solar energy system.* *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 13217-13225.
- PASHCHENKO, Dmitry.** *Comparative analysis of hydrogen/air combustion CFD-modeling for 3D and 2D computational domain of micro-cylindrical combustor.* *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 29545-29556.
- PAULINO, A. L. R. et al.** *CFD Analysis of PEMFC Flow Channel Cross Sections.* *Fuel Cells*, v.17, 27-36, 2017.
- PAULINO, A. L. R.** *Estudo da Geometria de Canais de Fluxo em Células a Combustível tipo PEMFC utilizando Fluidodinâmica Computacional.* Dissertação de Mestrado, IPEN/SP, 2014.
- ROBALINHO, E.** *Development of a computational model applied to a unitary 144 cm² proton exchange membrane fuel cell.* PhD Thesis, Nuclear and Energy Research Institute IPEN/CNEN, São Paulo, SP, 2009.
- SILVA, A.C.; ROBALINHO, E.** *Desenvolvimento Tecnológico e Oportunidades de Aplicação de células a combustível no segmento de backup de energia.* Mestrado em Gestão Estratégica de Tecnologia – MBA / GETEC, IPT-SP, 2007.
- SKODA, SANDRO.** *Hidrodinâmica do escoamento nos canais catódicos de uma célula a combustível de membrana polimérica condutora de prótons.* Tese de Doutorado, IPEN/SP, 2014.
- SLOTNICK J. et al.** *Cfd VISION 2030 Study: a path to revolutionary computational aerosciences*, 2014.
- WENDT, H.; GOTZ, M.; LINARDI, M.** *Fuel cell technology.* *Química Nova*. v. 23, p.538-546, 2000.
- ZHANG, Qingqing et al.** *3D transient CFD modelling of a scroll-type hydrogen pump used in FCVs.* *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (2018) 19231-19241.