

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA TROCADORA DE PRÓTONS

Sandra Harumi Fukurozaki; Emília Satoshi Miyamaru Seo*

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CCTM
Centro Universitário Senac – CAS*

shfukuro@ipen.br; esmiyseo@ipen.br

** Av. Prof. Lineu Prestes, 2.242, Cidade Universitária (USP)
CEP 05508-000 - São Paulo – SP – Brasil –*

SUMÁRIO

Introdução

Objetivo

Metodologia

Resultados e discussão

Considerações finais

Referências

Introdução

As células a combustível (CaC) têm sido identificadas como a resposta para a premente necessidade mundial de energia limpa e eficiente. Esta tecnologia de geração de eletricidade, também reconhecida como um componente fundamental para a futura “Economia do Hidrogênio” poderá reduzir substancialmente emissões de gases do efeito estufa, associados ao atual sistema de transporte e produção de energia.

Neste sentido, as CaC configuram-se em uma candidata ideal para uso em aplicações móveis e estacionárias, incluindo pequenas residências, plantas de energia e cogeração de média e larga escala, respectivamente. No setor móvel, as células, particularmente as de baixa temperatura de operação (80 a 90 °C), podem ser usadas em veículos particulares e coletivos, trens, aviões, barcos, além de sistemas portáteis de diversos usos.

De acordo com PENHT (2001), as células a combustível de membrana trocadora de prótons (PEMFC), são particularmente importantes no uso de aplicações móveis e estacionárias de pequena e média escala, respectivamente. Ademais, o interesse pelas PEMFC tem aumentado rapidamente, especialmente devido ao comprometimento das indústrias automotivas em desenvolver carros movidos com esta tecnologia.

Entretanto, há ainda algumas barreiras a serem vencidas para que esta tecnologia se torne acessível, envolvendo questões econômicas relacionadas ao alto custo dos materiais da membrana e principalmente dos catalisadores do grupo de metais da platina. Somam-se

ainda aspectos sócio-ambientais relacionados aos impactos promovidos pela extração, uso e destinação destes metais.

Dentro deste enfoque, a ferramenta analítica de gerenciamento ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que analisa os aspectos e impactos potenciais associados a um produto, pode contribuir significativamente para o uso racional dos recursos investidos e, entre outras aplicações, auxiliar nas tomadas de decisão, na seleção de indicadores ambientais relevantes para avaliação da performance ambiental de projetos ou reprojatos de produtos, processos e planejamento estratégico (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY AND SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION - USEPA, 2004). Não obstante, as informações desenvolvidas em um estudo de ACV, também podem auxiliar na identificação de oportunidades para aprimorar os aspectos ambientais em várias etapas do seu ciclo de vida (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 14040, 1997).

O primeiro passo neste sentido foi realizado recentemente por KARAKOUSSIS *et. al.* (2000), que analisou os materiais e fluxo de energia de um sistema de produção de células PEMFC, usando a ACV. Subseqüentemente, considerando os méritos ambientais relativos ao uso da tecnologia de CaC, a futura demanda do mercado e o desenvolvimento das políticas regulatórias cada vez mais rígidas, outros pesquisadores dedicaram-se a avaliar a importância ambiental dos impactos associados a outros estágios do ciclo de vida desta tecnologia.

Contudo, além das CaC configurarem-se em uma emergente tecnologia e a ACV ser uma ferramenta de gestão ambiental, complexa e de difícil execução, ressalta-se a ausência de publicações nacionais relacionadas ao tema em debate.

Objetivo

Diante deste contexto e em que pese às questões relacionadas à imensa pressão sobre os recursos naturais, somados a necessidade de desenvolvimento de processos mais eficientes e limpos, o presente trabalho objetiva analisar as oportunidades de melhoria ambiental no processo de fabricação da unidade eletrodo/membrana (*Membrane Electrode Assembly – MEA*). Os dados apresentados restringiram-se somente aos aspectos relacionados aos catalisadores de platina. Neste sentido, pretende-se colaborar para o avanço do conhecimento no uso da ferramenta de gestão ambiental – ACV e das questões ambientais relacionadas ao uso de metais nobres na PEMFC.

Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, o método adotado consistiu na revisão da literatura internacional, que permitiu a identificação do atual status de desenvolvimento das células a combustível, especificamente as PEMFC, bem como, as principais barreiras a serem vencidas para que esta tecnologia se torne acessível.

Resultados e discussão

O trabalho elaborado por KARAKOUSSIS *et. al* (2000) foi um dos primeiros estudos a avaliar os aspectos ambientais do sistema de manufatura de CaC e apontar, além da necessidade de uma investigação mais aprofundada do sistema produtivo, a estreita relação entre os custos do sistema e os aspectos ambientais.

No caso da PEMFC, o estudo está direcionado para a fabricação de dois módulos da tecnologia da *Ballard*, sendo um móvel produzido em parceria com *Daimler Chrysler* e *Ford*, e o outro oriundo de uma planta de cogeração estacionária desenvolvido em parceria com a *Alston* e outras empresas. A figura 1 apresenta o ciclo de vida de um sistema de célula a combustível.

No ciclo de vida da PEMFC, o foco do estudo concentrou-se nas fases 3.1, 3.2 e 3.3. Quando possível, os dados de materiais relevantes e entradas de energia dos processos nos estágios 1 e 2 foram coletados e incluídos no inventário. Por exemplo, fatores de emissões para as entradas de energia nas etapas 2 e 3 podem ser baseadas no ciclo de vida do combustível, e neste sentido, entre outros aspectos, para as emissões associadas à produção de módulo e outros dispositivos.

Questões ambientais das fases 5 e 6 não foram abordadas, pois, estas foram bem investigadas em trabalhos anteriores (HART & HORMANDINGER, 1997; HART & BAUEN, 1998). Devido à atual

incerteza dentro da indústria no que se refere ao provável gerenciamento da disposição final do sistema, a etapa 7 é apresentada apenas com uma direção qualitativa.

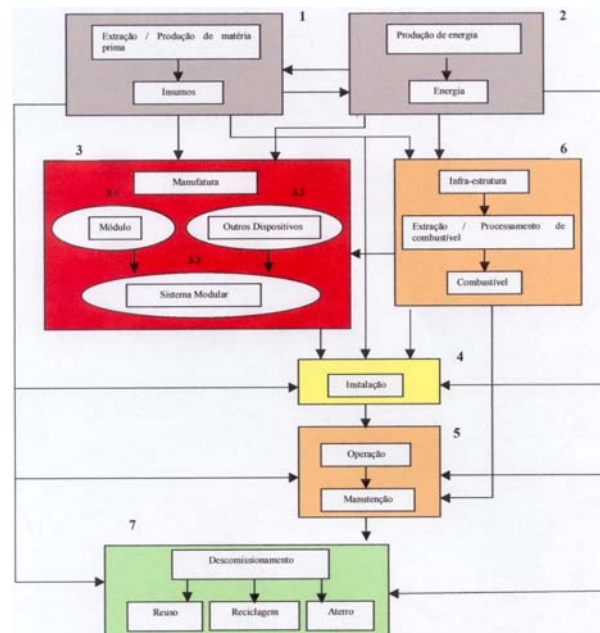


Figura 1 – Diagrama conceitual do ciclo de vida de um sistema CaC em 7 estágios.

Fonte: KARAKOUSSIS *et.al.* (2000). MODIFICADO por FUKUROZAKI (2006)

Durante os últimos cinco anos o número de companhias produzindo componentes ou sistemas de PEMFC têm crescido rapidamente, contudo, somente algumas estão conduzindo o campo da pesquisa e, em relação ao estado da arte há poucos líderes com perspectiva comercial.

No rol dessas empresas, a *Ballard Power Systems* tem sido reconhecida como a condutora do conhecimento em relação ao desenvolvimento de módulos e testes de protótipos em escala real no mundo, incluindo a produção para geração estacionária e automotiva, o que sugere a disponibilidade de algumas informações em termos de componentes e possíveis métodos de produção. Neste sentido, dois sistemas foram escolhidos, uma aplicação móvel e outra estacionária, ambos baseados no módulo da *Ballard*. Para a aplicação móvel selecionou-se um módulo de geração usado atualmente no carro da *Daimler Chrysler Nascar 4*, com uma potência nominal de 70 kW, enquanto que na aplicação estacionária optou-se por um sistema combinado de energia e calor de 250 kW desenvolvido em parceria com a *Alston*.

O módulo, projetado tanto para a aplicação móvel quanto para a estacionária, caracteriza-se por um grupo de células unitárias, em série e em quantidade suficiente para produzir a voltagem exigida em cada sistema. Ressalta-se que os dois módulos aplicados em diferentes setores de geração, utilizam a mesma tecnologia e, portanto exibem características similares em termos de consumo de energia, materiais e emissões ambientais, o que torna desnecessário a descrição detalhada de um sistema do outro.

Os elementos do MEA compõem o coração do sistema de células a combustível e o nível de detalhamento usado na análise da sua fabricação contemplou a descrição das entradas e as saídas de todos os passos individuais de cada processo. Apresenta-se a seguir um resumo do processo produtivo e o diagrama de fluxo da produção (figura 2).

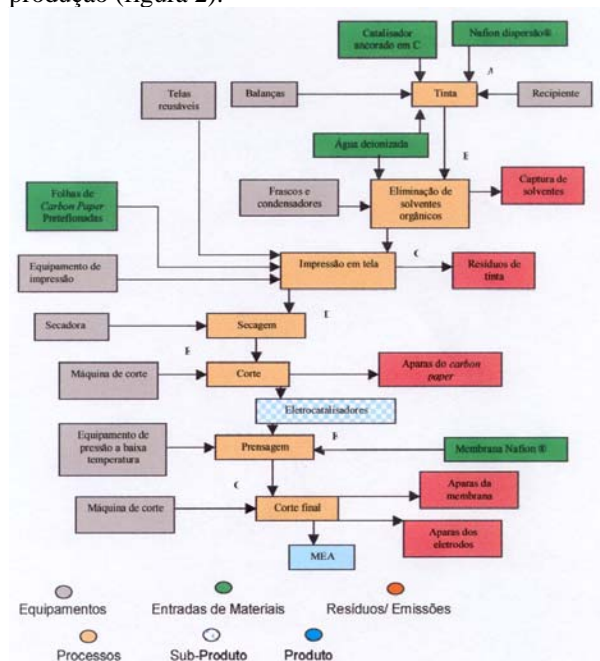


Figura 2 – Diagrama do fluxo de produção do MEA.
Fonte: KARAKOUSSIS *et.al.* (2000). MODIFICADO por FUKUROZAKI (2006)

A quantidade dos principais materiais do MEA e os requerimentos de energia elétrica para a manufatura de cada um destes são apresentadas na tabela 1, na qual é possível identificar que a platina apresenta o valor mais significativo de requisição de energia para a produção em função da quantidade.

Tabela 1 – Quantidade dos principais materiais e os requerimentos em termos de energia.

Materiais	Pt	Ru	Carbono	Carbon Paper
Quantidade requerida (kg/kW)	0,83	0,21	1,25	62,36
Energia Produção (MJ/kW)	164.268,35	41348,37	501,71	87.310,00

Materiais	Nafion Dispersão	Isopropanol	Água deionizada
Quantidade requerida (kg/kW)	0,65	9,52	6,14
Energia Produção (MJ/kW)	9,16	497,84	0,12

FONTE: KARAKOUSSIS *et.al.* (2000). MODIFICADO por FUKUROZAKI (2006)

Para os processos nos quais estes materiais são utilizados na fabricação do MEA da PEMFC, as exigências de eletricidade são ilustradas na tabela 2, onde observa-se que o maior consumo de energia está relacionado à etapa de eliminação de solventes orgânicos da tinta catalítica.

Tabela 2 – Entrada de energia para cada processo de produção do MEA.

Processo *	A	B	C	D	E	F	G
Energia (MJ/kW)	0,02	1,13	0,05	0,03	0,03	0,15	0,03

FONTE: KARAKOUSSIS *et.al.* (2000). MODIFICADO por FUKUROZAKI (2006).

Os efeitos resultantes no meio ambiente e no desenvolvimento da PEMFC, relativos ao consumo de energia na produção dos materiais e fabricação do MEA, estão diretamente relacionados a matriz energética de cada país. Portanto, os valores apresentados nas tabelas acima, podem representar uma maior ou menor significância, dependendo do tipo de matriz e seus respectivos impactos e custos totais.

Quanto às saídas dos processos do sistema produtivo do MEA estas constituem, além do próprio produto, nas perdas dos materiais usados na fabricação (tabela 3), bem como nas emissões ambientais (resíduos, efluentes e emissões atmosféricas) procedentes de cada fase de produção. As perdas durante o processo podem ser considerados por dois parâmetros: desperdícios de materiais e rejeitos oriundos de produtos defeituosos. No que diz respeito às emissões para o meio ambiente, estas foram divididas em três categorias: ar, água e solo. Dada a relativa importância da platina no consumo de energia para a produção do MEA e principalmente para a tecnologia PEMFC, optou-se por apresentar aqui, de forma detalhada, somente as saídas relacionadas às emissões para o meio ambiente deste catalisador (tabela 4). Os parâmetros das emissões para o solo não apresentaram valores.

Tabela 3 – Perdas de materiais no processo de produção do MEA.

Materiais utilizados nos processos	Uso (%)	Perdas (%)
Platina	98,0	1-2
Rutênio	98,0	1-2
Água Deionizada ¹	93,7	16,3
Nafion Dispersão®	93,7	16,3
Carbono	98,0	2
Tinta Catalítica	90,0	10
Carbon Paper	92,5	7,5 *
Membrana Nafion®	95,0	5 *
Água Deionizada ²	99,9	0,01

¹ Água utilizada para produzir a tinta catalítica.

² Água utilizada na eliminação dos solventes orgânicos.

*Perdas relacionadas aos desperdícios e erros no corte.

FONTE: KARAKOUSSIS *et.al.* (2000). MODIFICADO por FUKUROZAKI (2006)

Não obstante, em muitos casos, também a ineficiência do processo pode produzir emissões adicionais e, até mesmo no caso dessas emissões não representarem um peso para as questões ambientais, o custo das crescentes perdas podem representar uma barreira para a inserção da PEMFC no mercado. Um exemplo atual do custo equivalente de pequenas e crescentes perdas de platina, considerando a ausência de reciclagem e recuperação é ilustrado na tabela 5. O preço

considerado foi de \$1321,00/0,03kg (MATTHEY, 2006).

Com base nos dados da Tabela 5, é evidentemente clara a importância da recuperação e reciclagem de platina, pois esses procedimentos podem proporcionar uma diminuição dos requerimentos de material e reduzir significativamente o custo da produção.

Tabela 4 – Emissões para o meio ambiente da produção de platina.

Platina			
Emissões para o ar	mg/kW	Emissões para água	mg/kW
Partículas	11272034,29	DQO	64932,46
CO	6822788,57	DBO	20022,02
CO ₂	10775801143	Acido (H+)	665,76
SO _x	3185069257,1	Sólidos Dissolvidos	-----
NO _x	17716524,34	Hidrocarbonetos	4779,87
Hidrocarbonetos	37194134,10	NH ₄	23677,03
H ₂ S	22025,14	Sólidos em Suspensão	1520068,57
HCl	2182649,94	Metais	43142607,57
HF	307250,74	NO ⁻³	150441,99
Metais	2850772,43	Formas de Nitrogênios	16,49
Aromáticos-HC	76504,00	ClO ⁻³	-----
CFC/HCFC	-----	Fosfato as P ₂ O ₅	526461,82
VOC	35608,65	Detergente/Óleo	245313,37
-----	-----	Orgânicos dissolvidos	-----
-----	-----	Outros Orgânicos	12105343,55
-----	-----	Cl ⁻ , F ⁻ íons	58212200,28
-----	-----	SO ⁻⁴	42234045,71

Fonte: KARAKOUSSIS *et.al.* (2000). MODIFICADO por FUKUROZAKI (2006)

Tabela 5 – Custo das perdas de platina.

Entrada de Material (g/kW)	Perda de material no processo (%)	Perdas por ano (kg)	Custo (US\$)
0,83	7,4	173	7.617766,67
	8,4	196	8.630533,33
	12,4	290	12.769666,67

A recuperação da platina desperdiçada durante o processo e a reciclagem do catalisador de células desativadas é uma das principais questões das quais os produtores de CaC e empresas recicladoras de metais preciosos têm se preocupado e visualizado como uma oportunidade de negócio no setor, pois a tendência de uso da ACV para a rotulagem de produtos e a internalização das externalidades ambientais (por exemplo, taxas de carbono) poderá elevar o custo deste material no futuro.

Em geral, os incentivos para a otimização dos processos e materiais com base nas questões ambientais caminham na mesma direção que outras pressões comerciais para reduzir a complexidade do sistema de produção e custo, pois muitos dos materiais e processos são relativamente caros. Portanto, as

barreiras comerciais oriundas dos aspectos ambientais podem em muitos casos dirigir a antecipação do desenvolvimento de processos.

Considerações finais

Dentre os principais resultados obtidos na avaliação do ciclo de vida pode-se ressaltar que a célula a combustível PEMFC apresenta, durante o uso, vantagens ecológicas em função dos baixos índices de emissão de gases do efeito estufa, o que é especialmente importante para áreas urbanas com condições ambientais severas. Contudo, a produção do módulo apresenta impactos, principalmente relacionados aos metais do grupo de platina, que não podem ser negligenciados quando comparados à utilização de motores de veículos comuns.

Em relação às oportunidades identificadas, redução da carga, maximização da eficiência e da deposição seletiva da platina durante o processo de fabricação, destaca-se a reciclagem da platina. Embora muitos métodos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos com altos rendimentos de recuperação da platina sejam conhecidos, o mesmo princípio dos procedimentos para a extração do insumo na fonte primária reflete impactos relacionados às emissões de gases do efeito estufa e acidificação que devem ser considerados.

Desta forma, a reciclagem adequada da platina, envolvendo mecanismos ambientalmente amigáveis, demanda fatores de incentivos econômicos, disponibilidade de infra-estrutura para a reciclagem, desenvolvimento tecnológico, exportação dos países fornecedores, aumento do número de veículos movidos a células a combustível, bem como aspectos relacionados à legislação e demanda da sociedade, merecem um estudo aprofundado.

Referências

- D. HART; G. HORMANDINGER. *Power Sources*. 1998, 71, 348
- D. HART; G. HORMANDINGER. *ESTU Report F/02/00153/REP/1* Harwell, UK. 1998.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Environmental management – Life Cycle assessment: Principles and framework* - ISO 14.040. Genebra: ISO, 1997.
- J. MATHEY Platinum today. Disponível em http://www.platinum.mathey.com/analygst_index.html. Acessado em 20/03/2006.
- KARAKOUSSIS *et.al.* *Environmental Emissions of SOFC and SPFC System Manufacture and Disposal*. Imperial College of Science, Technology and Medicine. London, 2000.
- M. PEHNT. *Life-cycle Assessment of Fuel Cell Stacks*. International Association for Hydrogen Energy. Elsevier Science Ltda, 2001. p. 91 – 101.
- S.H. Fukurozaki, Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – USP, 2006.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY AND SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION. *LCAccess–LCA101*. Disponível em <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.html>. Acessado em 17/05/2004.