

# AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA TECNOLOGIA DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: UMA REVISÃO

*Emília Satoshi Miyamaru Seo*

*Luiz Alexandre Kulay*

*Sandra Harumi Fukurozaki*

## **Resumo**

A célula a combustível Membrana Trocadora de Prótons (PEMFC) é uma tecnologia emergente que apresenta vantagens comprovadas em termos de uso em relação aos processos convencionais de geração de energia elétrica. Tal característica credencia a PEMFC como candidata ideal para aplicações tanto de larga escala, como aquelas realizadas junto ao segmento automobilístico, como para usos mais simples e imediatos inclusive de amplitude doméstica. Como é prerrogativa de qualquer área do conhecimento bastante recente há, no entanto, algumas barreiras – sobretudo de ordem econômica, relativas ao alto custo dos materiais da membrana e dos catalisadores do grupo de metais da platina – a serem superadas, a fim de que esta tecnologia se torne acessível para efeito de consumo regular. Somem-se a estes, aspectos sócio-ambientais relacionados aos efeitos provocados sobre o homem e o meio ambiente decorrentes respectivamente, da extração, uso e destinação final destes metais. Desta forma, o processo de consolidação das células a combustível como alternativa inovadora de eletricidade, passar forçosamente por uma avaliação sistêmica de seu desempenho ambiental ao longo de todo o seu ciclo de vida. Dentro deste enfoque, uma análise do produto em questão por meio da técnica de Análise do Ciclo de Vida (ACV), poderia contribuir sobremaneira no sentido selecionar indicadores capazes de introduzir definitivamente a variável ambiental no processo gerencial de tomada de decisão voltado a projeto, re-projeto, processos, e, por que não dizer, planejamento estratégico e uso racional de investimentos da PEMFC. Dada a marcante escassez de literatura nesse campo, o presente trabalho pretende dar sua contribuição para que tais aspirações transformem-se em fatos concretos, realizando uma revisão da produção intelectual de âmbito internacional sobre Avaliação do ciclo de Vida da PEMFC, etapa a ser cumprida necessariamente nos primeiros movimentos desta iniciativa. Desta forma, pretende-se colaborar para o avanço do conhecimento das questões ambientais e sócio-econômicas relacionadas ao processo produtivo da PEMFC.

Palavras chaves: PEMFC, Células a Combustível, Análise do Ciclo de Vida.

## **1. Introdução**

Os valores que sustentam o atual modelo de desenvolvimento da sociedade moderna têm como um na busca da melhoria da qualidade de vida obtida a partir do exercício indiscriminado do progresso econômico um de seus pilares centrais de sustentação.

A adoção deste modelo sob a ótica restrita, tão somente, da satisfação das necessidades do ser humano – desconsiderando o entorno que o envolve e, por que não dizer, sustenta – o transforma em prática tecnocentrista predatório de conseqüências devastadoras tanto sobre o meio ambiente, quanto sobre o próprio homem. Apenas a título de exemplificação de tal correlação biunívoca merecem menção a escassez de recursos naturais, provocada por processos exploratórios descontroladas, a geração inadequada de rejeitos - em quantidade e grau de periculosidade, as disparidades econômicas e a desintegração social. Enfim, um quadro pouco alentador e até, e principalmente, paradoxal no que se refere à formulação de perspectivas futuras.

A questão energética deve merecer especial atenção no caminho a ser trilhado à busca de uma condição sustentável de desenvolvimento. Tanto isso é verdade que à medida que o tema, se por um lado é considerado como das condições essenciais para a melhoria da condição sócio-econômico da sociedade, por outro, várias alterações provocadas sobre o meio ambiente, e por decorrência, sobre a sociedade, ocorridas nas últimas décadas estão intimamente relacionadas à produção e o fornecimento de energia de forma eficiente (SILVEIRA *et. al.*, 2001).

Tal como reza o Relatório da Comissão de Brundtland (1987), o desenvolvimento sustentável predispõe o atendimento das necessidades presente, garantido que este mesmo direito seja preservado para as gerações futuras. Na forma como foi enunciado, tal conceito busca congrega três aspectos fundamentais e confluentes: o crescimento econômico, a equidade social e o equilíbrio ecológico (DONAIRE, 1995). Concretamente, este novo paradigma apóia-se nos modos de produção e consumo viáveis em longo prazo para o meio ambiente, associados ao fornecimento de serviços e produtos que atendam as necessidades básicas da população e proporcionem a ela uma melhor qualidade de vida, dentre outros aspectos, minimizando o consumo de recursos naturais e a geração de rejeitos.

Neste contexto, sendo a produção de eletricidade responsável por aproximadamente a terça parte do consumo energético primário do planeta, com

tendências de expansão nas próximas décadas, ficam evidentes que, o exercício da sustentabilidade predispõe a implementação de mudanças significativas em todas as etapas do ciclo de vida desse bem – ou seja, em suas geração, transmissão, distribuição e uso. De maneira ampla, essa transformação deverão passar, necessariamente, pela busca de tecnologias alternativas que permitam suprir a demanda energética mundial reduzindo, ainda que de maneira gradual, o consumo de combustíveis fósseis.

Para tanto, esforços no campo da inovação tecnológica, voltados exclusivamente à área energética, que resultem em menores impactos ambientais são imprescindíveis. Nesta perspectiva e em meio as diferentes rotas tecnológicas, a célula a combustível (CaC) é vista como possibilidade concreta para a premente necessidade mundial de energia limpa e eficiente, contribuindo não apenas para a redução substancial de emissões de gases do efeito estufa, como também, para uma potencial “economia futura do hidrogênio” (PEHNT & RAMESOHI, 2002).

Dado seu caráter versátil e funcional, os diferentes tipos de tecnologia CaC se prestam a usos em aplicações móveis e estacionárias, incluindo que variam desde residências, até plantas de produção de calor e energia de larga escala. No segmento móvel devem merecer especial destaque as CaC que operam a baixas temperaturas, entre 80 e 90 °C, caso da Célula a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons (PEMFC) pelo fato destas poderem ser utilizadas em veículos particulares, ou mesmo coletivos, em trens, aviões, barcos, além de diversos outros sistemas portáteis (BAUEN *et. al.*, 2003).

Ainda que no momento a PEMFC esteja no limiar do estágio comercial, o fator determinante para sua ampla inserção no mercado envolve, além de questões econômicas relacionadas ao alto custo dos materiais da membrana e dos catalisadores de platina, aspectos ambientais relativos exatamente a este metal, originados durante a produção e o pós-consumo do módulo da PEMFC (PEHNT, 2001).

Uma das formas mais concretas de quantificar os riscos e oportunidades associados à PEMFC no tocante aos efeitos acima descritos consiste da aplicação sobre o escopo em questão da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), dado seu caráter de abrangência, que se estende desde a extração dos recursos naturais empregados na manufatura de um produto, até o momento que a função para qual este se destina se esgota, levando forçosamente à disposição do mesmo.

Tendo em vista esse caráter sistêmico, processos de tomada de decisão que se baseiam em diagnósticos fornecidos pela ACV apresentam-se mais efetivos e sustentados em prazos mais longos, sobretudo quanto à redução dos custos operacionais, e porque não dizer, ambientais, das companhias, o que depreende a adoção desse instrumento para o desenvolvimento de novos modelos energéticos (CALDEIRA-PIRES *et. al.*, 2005).

Face o contexto antes esquadrinhado, apresenta-se como necessidade imediata à determinação precisa da importância das questões ambientais no desenvolvimento, na consolidação e na inovação da tecnologia de CaC. Neste sentido e dada a ampla escassez de trabalhos produzidos no país sobre o tema, este estudo se propõe a empreender uma apurada reflexão sobre a Avaliação do ciclo de Vida da PEMFC a partir de dados e informações coletados em estudos internacionais.

## **2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da PEMFC**

Uma análise da literatura especializada faz crer que os impactos ambientais associados à aplicação da tecnologia de CaC são conhecidos, e bem documentados. São exemplos dessa evolução os esforços de HART & HORMANDINGER (1997; 1998), HART & BAUEN (1998) e HAILES (1999).

Por outro lado, o mesmo não ocorre com para a produção e destinação final desta fonte de energia. Os primeiros passos neste sentido foram dados apenas recentemente por KARAKOUSSIS *et. al.* (2000), ao analisar, por meio da ACV, os materiais e os fluxos de energia de sistemas de fabricação de CaC.

Seguem-se a este, registros de PEHNT (2000a, 2000b, 2001, 2002, 2003); PEHNT & RAMESOHI (2002) e HANDLEY *et. al.* (2002) que, tendo em conta a demanda crescente do mercado de energia, bem como, o desenvolvimento de políticas regulatórias cada vez mais rígidas, dedicaram-se a avaliar os impactos associados a outras fases do ciclo de vida desse sistema. No Brasil esta iniciativa da apenas seus primeiros passos e, portanto, ainda não se dispõe de resultados concretos de pesquisa nesta linha.

Dentre os trabalhos sobre a avaliação do ciclo de vida da PEMFC nas etapas de manufatura e disposição final, destacam-se aqueles elaborados por PEHNT (2001) e HANDLEY *et.al* (2002), que se propuseram a examinar mais a fundo as propostas formuladas KARAKOUSSIS *et. al.* (2000), para o principal componente do módulo de célula PEMFC – o conjunto eletrodo membrana (MEA) – em particular sob a ótica dos eletrocatalisadores de platina. Essas evoluções são discutidas mais adiante neste documento.

### **3. Emissões Ambientais da PEMFC: Sistema de Produção e Disposição Final**

KARAKOUSSIS *et. al* (2000) foram os primeiros autores a reportar dados sobre os aspectos ambientais do sistema de manufatura de CaC e diagnosticar sua íntima relação com os custos de tal processamento. O objetivo central deste esforço de pesquisa versou sobre as emissões atmosféricas geradas durante as produções das células a combustível PEMFC e SOFC – esta última de óxido sólido, a busca de identificar fatores chaves capazes de representar barreira à competitividade comercial de cada sistema.

Embora, haja menção da análise da fase pós-uso das tecnologias estudadas, no período em que o estudo foi realizado não havia dados disponíveis sobre cenários de gerenciamento da disposição final, de forma que apenas conclusões preliminares aparecem reportadas sobre a questão.

Quanto ao escopo de abordagem, o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) concentrou-se, para ambos sistemas, tão somente nos elos da cadeia produtiva que constituem suas etapas de manufatura. O uso desses elementos foram também desconsiderados pela pesquisa, em virtude do tratamento investigativo bastante completo, dispensado a esta etapa do ciclo de vida das referidas CaC, por dois estudos realizados pela *East Tennessee State University* - ETSU publicados anteriormente. A Figura 1 traz representado o ciclo de vida de um sistema de célula a combustível.

O estudo da PEMFC está voltado à fabricação de dois módulos gerados a partir da tecnologia desenvolvida por *Ballard Power System*. O primeiro destes, do tipo móvel, apresenta potência nominal de 70kW, e foi produzido por intermédio de parceria estabelecida entre a *Ballard* e as empresas *Ford* e *Daimler Chrysler*, de grande expressão no segmento automobilístico, sendo instalado no *Necar 4*, um automóvel fabricado por esta última montadora.

Já o outro, oriundo de uma planta de cogeração estacionária de energia, consiste de um desenvolvimento ocorrido a partir de acordo firmado entre a *Ballard* e diversas empresas do setor energético, que se desenvolve sob a supervisão da *Alstom*. O módulo em questão consiste de um sistema combinado de energia e calor de potencial da ordem de 250 kW.

O foco do estudo de ciclo de vida da PEMFC concentrou-se nas fases 3.1, 3.2 e 3.3. do diagrama indicado na Figura 1. Na medida da disponibilidade, foram também incluídos no mesmo ICV, dados sobre correntes materiais e energéticas de entrada e saída dos processos nos estágios 1 e 2.

As questões ambientais originárias das fases 5 e 6 foram desconsideradas do escopo de abordagem do estudo, sendo aproveitados nesse caso e quando se fez necessário, trabalhos anteriores elaborados por HART & HORMANDINGER (1997) e HART & BAUEN (1998), cujos esforços resultaram em um cabedal de informações bastante completo sobre o tema.

Devido ao ainda elevado grau de incerteza sobre a melhor alternativa de gerenciamento da disposição final do sistema, a etapa 7 aparece indicada tão somente em termos qualitativos. Muito embora o escopo estabelecido por KARAKOUSSIS *et.al.* (2000) fosse bastante amplo, tal como é possível constatar pela descrição acima enunciada, o grau de incerteza dos resultados gerados por esses autores, motivados escassez de dados levantados, fez com que a presente análise se restringisse versasse apenas sobre a fabricação do MEA no que se refere em particular a produção dos eletrodos e da membrana eletrolítica.

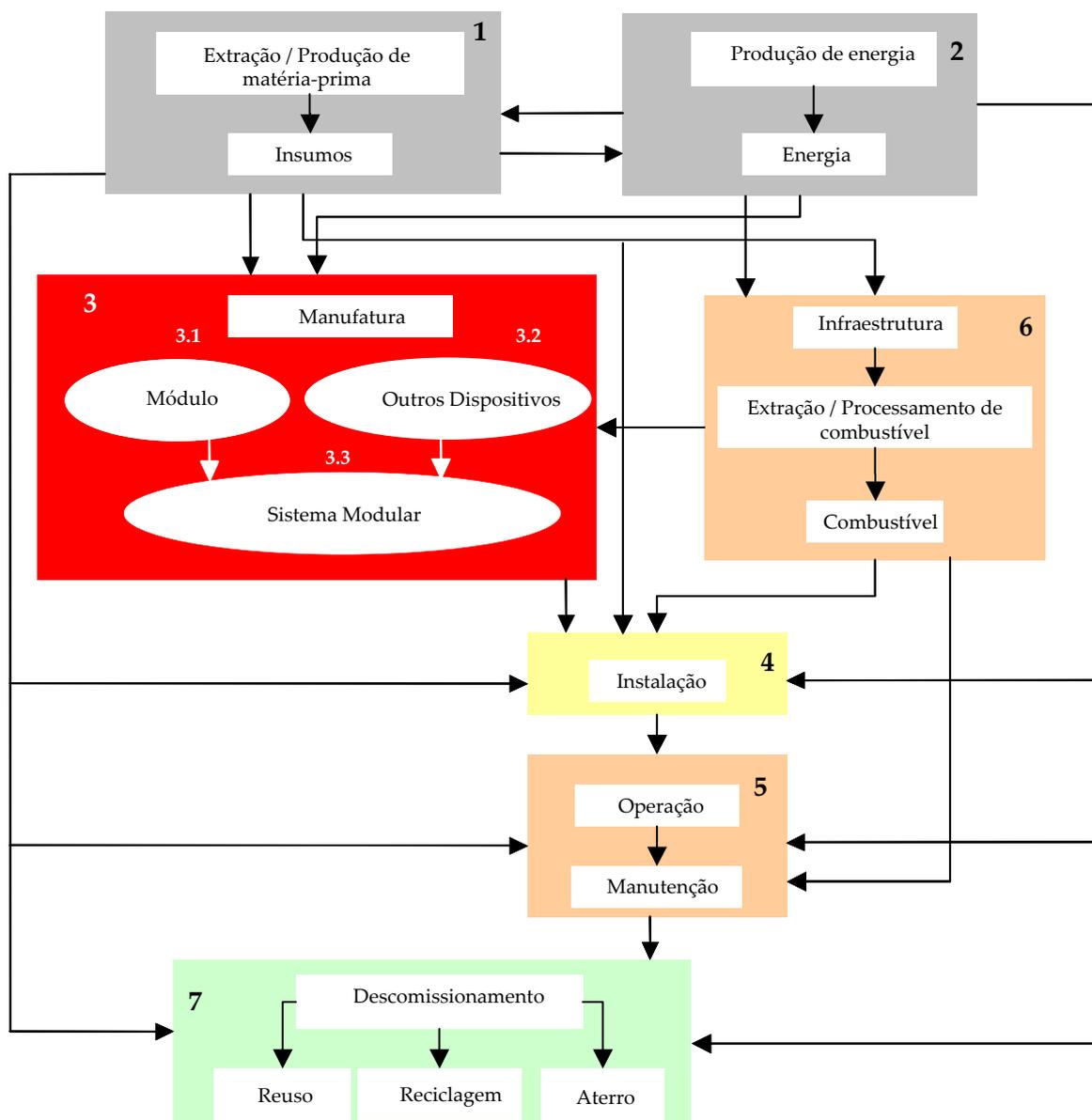


FIGURA 1 – Diagrama conceitual do ciclo de vida de um sistema CaC em 7 estágios  
 FONTE: adaptado de KARAKOUSSIS *et.al.* (2000)

### 3.1 Sistema PEMFC

As células de Membrana Trocadora de Prótons são produzidas de muitas maneiras e por diversas empresas e organizações de pesquisa. A vasta maioria do sistema de PEMFC é projetada e desenvolvida para teste. Nos últimos cinco anos o número de empresas produtoras de componentes ou sistemas de PEMFC tem crescido rapidamente; contudo, somente algumas destas realizam desenvolvimentos em termos de pesquisa exploratória neste campo.

Dentre essas empresas, destaca-se a *Ballard Power Systems* como a condutora do conhecimento em relação ao desenvolvimento de módulos e testes de protótipos em escala real, incluindo a produção para geração estacionária e automotiva. Disso decorre a opção por avaliar os dois sistemas antes citados. 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. Ressalte-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, de materiais e até, de emissões ambientais, o que torna desnecessário a descrição detalhada de um sistema do outro<sup>1</sup>.

### 3.2 Processo produtivo do MEA

Os elementos do MEA constituem-se no cerne do sistema de células a combustível. Por conta disso, o nível de detalhamento usado na análise da sua fabricação contemplou uma abordagem detalhada das correntes materiais de entrada e saída de todos os passos individuais de cada processo. A Figura 2 traz, ainda que de maneira resumida, o diagrama de fluxo da produção do MEA.

---

<sup>1</sup> Basicamente, as principais diferenças entre as duas aplicações no que tange ao MEA são a espessura da membrana e a quantidade de eletrocatalisador utilizados.

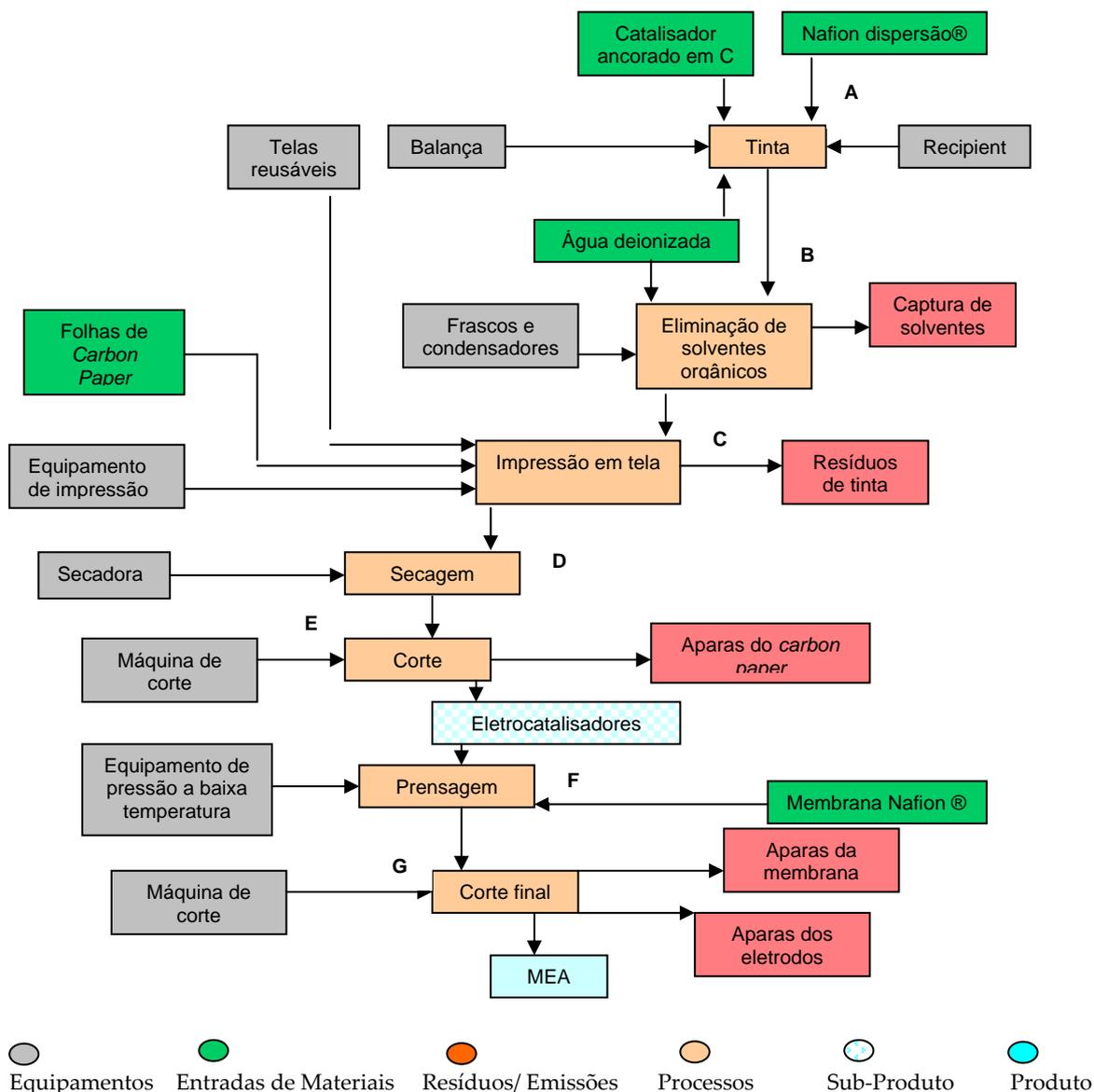


FIGURA 2 –Diagrama do fluxo de produção do MEA.

FONTE: adaptado de KARAKOUSSIS *et.al.* (2000)

- Tinta:** os catalisadores de Pt e Ru, ancorados em carbono, são adicionados a uma solução de Nafion, contendo H<sub>2</sub>O destilada e um solvente, que na maioria dos casos consiste de um álcool alifático.
- Eliminação de solventes orgânicos e redução da viscosidade:** a tinta é aquecida para eliminação dos solventes orgânicos por evaporação. Posteriormente, adiciona-se água para manter volume constante. Quando todos os solventes orgânicos tiverem sido, de fato, volatilizados, a solução é novamente aquecida a fim de promover a redução de sua viscosidade.

- c) **Impressão (*screen printed*):** a tinta catalítica é “impressa” em quantidades necessárias sobre o *Carbon Paper* - papel de fibra de carbono rígida preteflonada – para formar o eletrodo negativo e positivo.
- d) **Secagem:** a água remanescente dos eletrodos é eliminada em um secador tubular construído para uso específico nesta produção, denominado *tunnel dryer*.
- e) **Corte dos eletrodos:** os eletrodos constituídos de *Carbon Paper* e catalisador são cortados na forma e tamanhos desejados.
- f) **Montagem dos eletrodos na membrana eletrolítica:** a membrana polimérica Nafion® é colocada sob pressão entre os dois eletrodos previamente cortados, em uma temperatura de transição vítrea do Nafion®.
- g) **Corte final do MEA:** o conjunto eletrodo membrana prensado é cortado na forma e tamanho desejado.

### 3.3 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

As quantidades dos principais materiais constituintes do MEA, bem como o consumo de energético necessário à manufatura de cada destes são apresentadas na Tabela 1. Tal como se pode observar a partir desta série de dados, a platina demonstra ter o consumo energético específico mais significativo dentre todos os constituintes do MEA.

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

Materiais	Pt	Ru	Carbono	Carbon Paper	Nafion Membrana	Nafion Dispersão	Isopropanol	Água deionizada
Quantidade (kg/kW)	0,83	0,21	1,25	62	80	0,65	9,5	6,1
Energia	164268	41348	502	87310	1142	9,2	498	0,12

---

(MJ/kW)

---

FONTE: adaptado KARAKOUSSIS *et.al.* (2000)

Para os processos nos quais estes materiais são utilizados na fabricação do MEA da PEMFC, as exigências de eletricidade são ilustradas na Tabela 2. Neste caso em específico, 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

\* Conforme os processos descritos na seção 1.3

FONTE: adaptado de KARAKOUSSIS *et.al.* (2000)

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, como não poderia deixar de ser, relacionados diretamente a matriz energética de cada país. Portanto, os valores apresentados nas tabelas acima podem revelar maior ou menor significância, tanto em função da composição de matriz energética, como de seus respectivos impactos e custos totais.

Aparte do produto são saídas dos processos que perfazem o sistema produtivo do MEA, rejeitos na forma de perdas líquidas e sólidas, além de emissões atmosféricas, de materiais usados na fabricação (Tabela 3), procedentes de cada fase de produção. Essas perdas podem ser originárias de duas procedências: desperdício de materiais e produção de bens defeituosos e fora de especificação.

**TABELA 3** – Perdas de materiais no processo de produção do MEA.

Materiais de Processo	Uso (%)	Perdas (%)
Platina	98,0	1-2
Rutênio	98,0	1-2
Água Deionizada <sup>1</sup>	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 <sup>2</sup>	99,9	0,01

<sup>1</sup> Água utilizada para produzir a tinta catalítica.

<sup>2</sup> Água utilizada na eliminação dos solventes orgânicos.

\*Perdas relacionadas aos desperdícios e erros no corte.

FONTE: adaptado de KARAKOUSSIS *et.al.* (2000)

As gerações de rejeitos para o meio ambiente 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 foram quantificados.

Embora o MEA da PEMFC apresente, em ambas as aplicações, a utilização de materiais e processos iguais para a produção do conjunto eletrodo membrana, as quantidades necessárias para a fabricação dos módulos alteram o valor, além do consumo de energia, das emissões globais no sistema.

**TABELA 4 – Emissões para o meio ambiente da produção de platina<sup>2</sup>.**

Platina			
Emissões atmosféricas	mg/kW	Efluentes líquidos	mg/kW
Partículas	11272034	DQO	64932
CO	6822788	DBO	20022
CO <sub>2</sub>	10775801143	Acido (H <sup>+</sup> )	665
SOX	3185069257	Sólidos Dissolvidos	-----
NOX	17716524	Hidrocarbonetos	4779
Hidrocarbonetos	37194134	NH <sub>4</sub>	23677
H <sub>2</sub> S	22025	Sólidos em Suspensão	1520068
HCl	2182649	Metais	43142607
HF	307250	NO <sup>-3</sup>	150441
Metais	2850772	Formas de Nitrogênios	16,49
Aromáticos-HC	76504	ClO <sup>-3</sup>	-----
CFC/HCFC	-----	Fosfato as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	526461
VOC	35608	Detergente/ Óleo	245313
-----	-----	Orgânicos dissolvidos	-----
-----	-----	Outros Orgânicos	12105343
-----	-----	Cl <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> íons	58212200
-----	-----	SO <sup>-4</sup>	42234045

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

Na Tabela 5, a qual apresenta o total de emissões de cada subsistema da produção do MEA. Observe-se que os valores para a aplicação estacionária são maiores que aqueles mensurados para a aplicação do tipo móvel. Desta forma, é

<sup>2</sup> Ressalta-se que a fonte utilizada foi o banco de dados da *Team Software*.

nítido que qualquer requerimento de material tem seu efeito equivalente no ambiente.

**TABELA 5** – Total de emissões para o meio ambiente na produção do MEA.

<b>MEA</b>	<b>Aplicação estacionária (250 kW)</b>	<b>Aplicação móvel (70 kW)</b>
Emissões atmosféricas	2,53 E +15 mg/kW	7,09 E+ 14 mg/kW
Efluentes líquidos	4,95 E +10 mg/kW	1,39 E +10 mg/kW
Resíduos sólidos	4,64 E +06 mg/kW	1,30 E +06 mg/kW

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 do custo equivalente de pequenas e crescentes perdas de platina, considerando a ausência de reciclagem e recuperação é ilustrado na Tabela 6. O preço considerado foi de \$1321,00/0,03kg (MATTHEY, 2006).

**TABELA 6** – Custo das perdas de platina.

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

Com base nos dados da Tabela 6, é evidente a importância da recuperação e da reciclagem de platina, pois esses procedimentos podem proporcionar uma diminuição do consumo desse recurso de material bem como dos custos de produção.

A diminuição de perdas de platina ocorrida 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. Essa questão é vista no meio como oportunidade de negócio posto que a tendência de uso da ACV para a rotulagem de produtos e a internalização das externalidades ambientais irá fatalmente elevar o custo deste material futuramente.

Em geral, os incentivos para a otimização dos processos e materiais com base nas questões ambientais caminham na mesma direção que as demais barreiras comerciais, criadas no sentido de reduzir a complexidade do sistema de produção, bem como de seu custo, dado que muitos dos materiais e processos são relativamente dispendiosos. Portanto, as barreiras comerciais oriundas dos aspectos ambientais podem, em muitos casos, dirigir a antecipação do desenvolvimento de processos.

### **3.4 Análise do Inventário**

Conforme mencionado anteriormente, o estudo das *Emissões Ambientais da SOFC e PEMFC* não contemplou a avaliação dos impactos ambientais e, por conta disso, as etapas de classificação e de caracterização da geração de rejeitos em termos de impactos sobre meio ambiente constantes da técnica de ACV não foram realizadas.

De qualquer forma, por meio dados do ICV, observa-se que a geração de rejeitos materiais oriundos da produção do MEA, em especial a platina, apresenta parâmetros (NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, Pt, Cl<sup>-</sup> e F<sup>-</sup>, DQO, DBO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), que podem significar potenciais impactos à saúde humana, água, biota e camada de ozônio.

Além disso, é possível notar também que os impactos ambientais são fortemente relacionados à concentração de poluentes específicos no meio receptor, bem como da localização da sua ocorrência em termos geográficos (local, regional, global). No entanto, sem uma análise mais aprofundada não é possível identificar o

quanto os efeitos relacionados à produção do MEA são significativas no contexto ambiental.

Da mesma forma, uma análise baseada apenas nos dados de inventário infere que as perdas do processo produtivo do MEA estão intimamente relacionadas a entradas de materiais, e estes, por sua vez, ao consumo de energia.

Todos estes aspectos sinalizam uma elevação dos custos produtivos do MEA, na medida em que têm sua importância apoiada na crescente ênfase das políticas regulatórias (padrões de emissões para o ar, água e solo) e de mercado na avaliação do ciclo de vida (rotulagem ambiental), na tendência de internalização dos custos ambientais em muitos países, e no potencial fornecimento dos materiais.

Desta maneira, são temas relevantes para o desenvolvimento dos estudos posteriores neste campo – ou seja, de aplicação da técnica de ACV as CaC – a avaliação dos impactos ambientais decorrentes da etapa de fabricação destes bens, e nos cenários de gestão ambiental dos rejeitos, que por hora compreendem ações do tipo recuperação e reciclagem dos materiais utilizados.

Apresenta-se a seguir uma síntese dos estudos desenvolvidos por PEHNT (2001) e HANDLEY *et. al* (2003), que caminharam no sentido de equacionar estas questões e produziram um avanço da construção do conhecimento iniciado por KARAKOUSSIS *et. al* (2000).

Não serão apresentadas descrições detalhadas desses estudos, como realizado anteriormente, mas sim e tão somente, os resultados obtidos e respectivos julgamentos que representam o interesse geral.

#### **4. Avaliação do Ciclo de Vida de Módulos de Células a Combustível (CaC)**

O estudo intitulado *Life cycle assessment of fuel cell stacks* realizado por PENHT (2001) foi bastante semelhante àquele realizado por KARAKOUSSIS *et. al* (2000) no que se refere aos objetivos. Assim, também neste caso, o objeto foi realizar uma ACV de dois módulos da PEMFC, produzidos pela *Ballard*, sendo um deles de aplicação

móvel (75 kW), e o outro, estacionário (275 kW). Por meio da técnica de avaliação de desempenho ambiental PENHT pretendeu determinar tanto a importância relativa da produção do módulo comparado-o com a sua fase de utilização, como os potenciais aperfeiçoamentos e possíveis limitações em relação a esta produção.

Embora existissem diferenças entre o banco de dados utilizados para a análise do inventário, e os valores apontados por KARAKOUSSIS *et. al* (2000) para cada um dos módulos, em termos de produção de energia, PENHT (2001) avançou no sentido de caracterizar e quantificar as emissões oriundas do processo produtivo em impactos ambientais no sentido de prover informações para o possível aperfeiçoamento dos sistemas de produção.

Desta forma, os resultados obtidos pelo estudo indicaram que apesar da PEMFC apresentar, 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, a etapa produtiva, especificamente do MEA, possui impactos que não podem ser negligenciados quando comparados à sua utilização.

Estes impactos são causados principalmente pelo uso de metais do grupo da platina (PGM), como catalisadores, e estão relacionados: ao processo de extração pirometalúrgica; a alocação das diferentes emissões; e a sustentabilidade de produção dos países fornecedores.

Com base nesses resultados, a principal rota identificada no sentido da melhoria do desempenho ambiental do produto foi à reciclagem dos catalisadores do MEA. Além de reduzir significativamente as emissões responsáveis pelo aquecimento global e acidificação durante a fase de produção da PEMFC, esta possibilidade técnica tem por vantagem constituir-se em requisito econômico apoiado por organizações de cunho legal interessadas na produção de módulos PEMFC.

Portanto, os resultados alcançados por PEHNT (2001) evidenciam a importância do uso da ferramenta de ACV no contexto econômico e ambiental da

tecnologia PEMFC. Desta forma, o estudo apresentando a seguir, adianta-se no sentido de prover informações e métodos para o gerenciamento do estágio final do ciclo de vida PEMFC.

#### **5. Impactos da Legislação de Resíduos de Veículos na União Européia (UE): Opções de Fim de Vida para as Células a Combustível de Membrana Polimérica Trocadora de Prótons**

Na análise do fim de vida de um módulo de 70 kW da célula PEMFC inserida no trabalho *Impact of the European Union vehicle waste directive on end of life options for polymer electrolyte fuel cells* realizado por HANDLEY *et. al* (2002), o foco primordial incidiu sobre a construção de possíveis cenários e de estratégias a serem adotadas para o gerenciamento pós-consumo do módulo, com base na legislação da União Européia para resíduos de veículos.

Sob o enfoque da ACV, foram construídos cenários para cada componente do módulo (MEA, placas bipolares e componentes auxiliares), considerando as alternativas do que é ambientalmente mais adequado em função dos prováveis impactos dos resíduos da aplicação móvel desta tecnologia, de acordo com a seguinte hierarquia em termos de soluções e desenvolvimentos possíveis: reuso, reciclagem, incineração com recuperação de energia e disposição em aterros.

Diante das diretivas legais da União Européia (EU), concomitantes a ponderações sobre a viabilidade técnica, econômica e ambiental existentes, os resultados alcançados indicaram que a gama de pressões externas influenciando a escolha de uma estratégia de gerenciamento de fim de vida satisfatória e as oportunidades de reuso dos componentes são limitadas. Portanto e em princípio, a reciclagem é a melhor opção para o estágio final da PEMFC.

Ressalte-se que, no estudo em questão, todos os componentes podem ser reciclados de maneira separada. No caso particular dos catalisadores de platina, HANDLEY *et. al* (2002) relata que é possível recuperá-la com alto rendimento utilizando um método de extração por solventes. Também segundo estes autores,

além das razões econômicas para a implementação de tal procedimento, o argumento ambiental para a reciclagem da platina constitui-se em forte apelo, pois, em comparação à produção do bem a partir de fontes primárias, as emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) podem ser diminuídas de um fator igual a 100 vezes, enquanto que a demanda energética primária, de um fator da ordem de vinte vezes.

Neste quadro, constata-se mais firmemente a relevância dos estudos em ACV da PEMFC nos âmbitos do desenvolvimento sustentável e desenvolvimento tecnológico deste sistema de energia. A construção de cenários de disposição final formulados a partir de resultados proporcionados pela ACV veio reforçar que as alternativas e possíveis métodos de aperfeiçoamento do sistema devem ser desenvolvidos também para atender as necessidades legais e ambientais de cada país, região ou local.

## **6. Considerações Finais sobre os Estudos de ACV da PEMFC**

Uma das observações comuns a todos os estudos analisados no corpo deste documento é a de que a platina aparece dentre os principais contribuintes em termos de impactos ambientais durante a fase de manufatura da tecnologia PEMFC. Somado-se requisitos de ordem ambiental, como os significativos efeitos deteriorantes da platina sobre o meio ambiente, àqueles de caráter econômico – o elevado custo deste metal, nobre por natureza, aos técnicos, como o fato de a platina constituir-se atualmente, no catalisador mais viável para o sistema de energia PEMFC, a reciclagem surge como uma alternativa bastante efetiva – muito embora ainda mitigatória – para que os processos de produção de PEMFC sejam de fato sustentáveis.

Não obstante, é sempre importante ter em mente que as barreiras ambientais e econômicas à produção de qualquer produto, e o caso da PEMFC não é diferente, caminham juntas. Neste sentido, o uso de técnicas de caráter sistêmico tais como a ACV, ou variações que a incluam, tais como as Análise de Eco-eficiência e Análise de Sustentabilidade para a avaliação dos desempenho ambiental desta tecnologia,

sobretudo durante a fase de manufatura, constituem-se em ganhos significativos para a manutenção da condição de alternativa sustentável à matriz energética mundial.

## 7. REFERÊNCIAS

BAUEN, A. et. al. *Fuel Cells for distributed generation in developing countries – an analysis*. International Association for Hydrogen Energy. Elsevier Science Ltda. 2003. p. 695-701.

CALDEIRA-PIRES, A. et. al. (org). *Avaliação do ciclo de vida: a ISSO 14040 na América latina*. Brasília: Abipit, 2005. 337p.; 21,5 cm.

DONAIRE, D. *Gestão ambiental na empresa*, São Paulo: Atlas, 1995.

FUKUROZAKI, S. *Análise ambiental da célula a combustível de membrana trocadora de prótons sob enfoque da avaliação do ciclo de vida*. Dissertação de mestrado do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2006, 150 p.

HAILES, R. *Fuel cells for transportation: na inventory analysis of environmental interventions associated with a prototype stack componente manufacturing route*. MSc., Thesis, imperial College, 1999.

HART, D. & BAUEN, A. *Further assessment of the environmental characteristics of fuel cells and competing technologies*. ETSU Report F/02/00153/REP/1 Harwell, UK. 1998.

HART, D. & HORMANDINGER, G. *Initial assessment of the environmental characteristics of fuel cells and competing technologies*. V. 1. ETSU Report F/02/00111/REP/1 Harwell, UK. 1997.

HART, D. & HORMANDINGER, G. *Environmental benefits of transport and stationary fuel cells*. V. 1. Power Sources, v. 71, 1998. p. 348-353.

KARAKOUSSIS, V. et al. *Environmental emissions of SOFC and SPFC sysytem manufacture and disposal*. Imperial College of Science, Technology and Medicene, London, 2000.88p.

MATHEY, J. *Platinum today*. Disponível em [http://platinum.mathey.com/analygst\\_index.html](http://platinum.mathey.com/analygst_index.html) acesso em 20/03/2006.

PEHNT, M. *Ganzheitliche bilanzierung von brennstozellen als zukunftigen energiesystemen (Life cycle assessment of fuel cells as future energy systems)* Dissertation, German Aerospace Center, Institut fur Technische Thermodynamik, Stuttgart, 2000a.

PEHNT, M. *Life cycle analysis of fuel cells and relevant fuel chains*. Proceedings Hyforum, 2000b. p. 387-396. Munchen, september 2000.

PEHNT, M. *Life-cycle assessment of fuel cell of fuel cell stacks*. International Association for Hydrogen Energy. Elsevier Science Ltda., 2001.p.91-101.

PEHNT, M. *Life cycle assessment of fuel cells in stationary and mobile applications*. Dissertation, VDI-Verlag, Dusseldorf, 2002, ISBN 3-18-347606-1.

PEHNT, M. *Life cycle analysis of fuel cell system components*. Handbook of fuel cells- Fundamentals, technology and applications, edited by Viestich, W. et. al. v. 4. 2003.

PEHNT, M. & RAMESOHI, S. *Fuel cells for distributed power: benefits, barriers and perspectives*. Commissioned by WWF in co-operation with Fuel Cell Europe. June 2002. disponível em <<http://www.etn.wsr.ac.at>> acesso em 17/05/2006.

SILVEIRA, S. et .al. *A energia elétrica no âmbito do d esenvolvimento sustentável*. In: REIS, L.B. & SILVEIRA, S. *A energia elétrica para o desenvolvimento sustentável*. 2 ed. , São Paulo: USP, 2001. p. 17-42.