

# METODOLOGIA DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA: IMPORTÂNCIA NA INSERÇÃO DA TECNOLOGIA DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEMFC

Sandra Harumi Fukurozaki (1)

Emília Satoshi Miyamaru Seo

(1) Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais – CCTM . Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/ CNEN . São Paulo/ SP - Brasil.

## RESUMO

A melhoria no padrão de qualidade de vida da sociedade requer o aperfeiçoamento da qualidade de energia distribuída e dos serviços inerentes, dentro de um processo de sustentabilidade. Em meio as diferentes rotas tecnológicas para a geração de energia mais sustentável destacam-se as células a combustível (CaC), também denominadas pilhas a combustível. Estas, têm sido identificadas pela *Global Environment Facility* (GEF) como uma promissora tecnologia para a redução, no futuro, dos gases do efeito estufa nos países em desenvolvimento, assim como nos países desenvolvidos. Embora existam vários tipos de CaC, a tecnologia mais empregada para estudos de pesquisa em célula a combustível é a Membrana Polimérica Trocadora de Prótons – PEMFC. 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 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. Em que pese o desafio de atender as demandas do mercado, da sociedade e à crescente tendência de padrões mais rígidos de controle do meio ambiente, o presente trabalho tem por objetivo apresentar a ferramenta de gerenciamento ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida e sua importância na busca por alternativas sócio-econômicas e ambientais viáveis para a reciclagem dos catalisadores de platina da célula PEMFC. Desta forma, pretende-se colaborar para o avanço do conhecimento das questões ambientais e sócio-econômicas relacionadas ao processo produtivo da PEMFC.

**PALAVRAS CHAVES:** células a combustível, PEMFC, catalisadores de platina, análise do ciclo de vida.

## ABSTRACT

*To improve the standard of society's quality of life, it is necessary to improve the quality of distributed energy and its inherent services within a sustainability process. Among different technological routes that produce more sustainable energy are the fuel cells – also known as combustible batteries. The Global Environment Facility (GEF) has identified the fuel cells as a potential technology to reduce, in the future, the effect of greenhouse gases in both developed and developing countries. Although there are various types of fuel cells, the most used technology for research studies on fuel cells is the Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEMFC). However, economic issues - related to the high cost of the membrane's materials and of the catalysts of groups of platinum metals - are still some of the obstacles that need to be overcome for this technology to be more accessible. There are also socio-environmental aspects related to the impacts caused by the extraction, the use and the destination of these metals. Taking in consideration the challenges of complying with the demands of the market and the society as well as with the growing tendency of more rigid patterns of environmental control, the objective of the present work is to show the tool of environmental management - Life Cycle Assessment (LCA) - and its importance on the pursuit for socio-economic and environmental alternatives feasible to the recycling of the catalysts of platinum of the PEMFC. This way, it intends to collaborate to the progress of the knowledge about environmental and socio-economic subjects related to the productive process of the PEMFC.*

**KEYWORDS:** fuel cell, PEMFC, platinum catalysts, life cycle assessment.

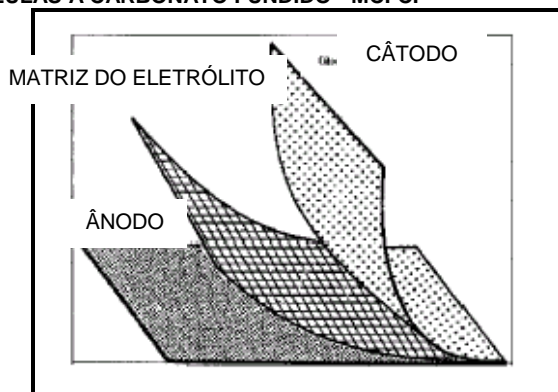
## 1. INTRODUÇÃO

A melhoria no padrão de qualidade de vida da sociedade requer o aperfeiçoamento da qualidade de energia distribuída e dos serviços inerentes, dentro de um processo de sustentabilidade <sup>[1, 2]</sup>. Entretanto, o modelo atual, dependente de combustíveis fósseis, não atende a necessidade de preservação e conservação de recursos naturais, tendo em vista que esses combustíveis não são renováveis e o seu beneficiamento e uso promovem diversos impactos ambientais, dentre eles a emissão de poluentes atmosféricos, tais como o dióxido de carbono, principal responsável pela ocorrência do efeito estufa e conseqüente aquecimento global <sup>[3]</sup>. Não obstante, existem fatores estratégicos e econômicos relevantes associados a concentrações de suas jazidas em poucas regiões do mundo e a instabilidade de seus preços <sup>[1, 4]</sup>.

Diante deste quadro, torna-se premente a busca por novas tecnologias para a obtenção de eletricidade que faça uso mais eficiente dos recursos naturais, utilizando fontes renováveis. Em meio as diferentes rotas tecnológicas para a geração de energia mais sustentável destacam-se as células a combustível (CaC), também denominadas pilhas a combustível. Estas são equipamentos capazes de converter energia química de certas fontes em energia elétrica sem a necessidade de combustão, com maior eficiência e menor emissão de poluentes que os equipamentos atuais <sup>[5]</sup>. O melhor combustível para a CaC é o hidrogênio que pode ser produzido a partir da eletricidade (eletrolise da água), por energia solar (conversão fotoquímica), por produção biológica, pela gaseificação de biomassa ou no futuro, produção termoquímica, incluindo a pirólise pela técnica via plasma <sup>[6]</sup>.

Há vários tipos de CaC mas todas se baseiam num desenho central (Figura 1), que consiste de dois eletrodos, um negativo (ânodo) e um positivo (cátodo). Estes eletrodos, caracterizados por uma estrutura porosa condutora de elétrons cuja espessura depende do tipo de célula, são separados por um eletrólito líquido ou sólido que carrega íons positivos entre os dois eletrodos <sup>[7]</sup>. Usualmente, classificam-se os vários tipos de CaC segundo o tipo de eletrólito utilizado e conseqüentemente a temperatura de operação. Na Tabela 1 são apresentados os diferentes tipos de CaC, bem como suas características principais.

**FIGURA 1 – UNIDADE COMPOSTA DE ÂNODO, CÂTODO E MATRIZ DO ELETRÓLITO, FABRICADA NA FORMA DE FILME DELGADO PARA CÉLULAS A CARBONATO FUNDIDO - MCFC.**



FONTE: WENDT *et. al*, 2000 <sup>[7]</sup>.

Dentre a infinidade de aplicações das CaC destacam-se a geração estacionária para uso comercial, residencial e industrial; a geração nos meios de transporte em substituição ao motor de combustão interna em caminhões, ônibus, automóveis, trens, aviões; e a alimentação de equipamentos eletro-eletrônicos em substituição às baterias nos celulares, computadores, entre outros.

Conforme WENDT *et al.* <sup>[7]</sup>, desde o final da década de 70 algumas atividades na área de células a combustível no Brasil têm sido realizadas. Direta ou indiretamente várias instituições, tais como a Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal do Rio de Janeiro, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT de São Paulo e o grupo de eletroquímica de São Carlos, já se dedicaram ao estudo deste tipo de tecnologia. Recentemente, em meados de 1998, iniciou-se no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN de São Paulo o estudo e desenvolvimento de sistemas, eficientes e de baixo impacto ambiental, associados à CaC.

Considerando que esta forma de geração de energia está no limiar de atingir o estágio comercial, os esforços em ciência, desenvolvimento e engenharia de produtos e processos associados as CaC são altamente justificáveis no momento. Portanto, duas vertentes de estudos são requeridas: demonstrativas, que facilitem a compreensão e aceitação dos produtos e processos; e de

desenvolvimento, a fim de garantir o domínio das tecnologias, que poderão trazer novos paradigmas à questão de obtenção de eletricidade <sup>[1]</sup>.

Em face deste contexto, o processo de transformação e exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional devem caminhar no sentido de reforçar o potencial presente e futuro de atender às necessidades e aspirações humanas <sup>[8]</sup>. Neste sentido, a crescente ênfase dada às células a combustível como candidatas a um sistema de geração de energia significa um desenvolvimento necessário da visão dos impactos ambientais de todo o seu ciclo de vida <sup>[9]</sup>, visto que uma investigação minuciosa dos aspectos técnicos, ecológicos e econômicos é imprescindível para a sua consolidação no mercado <sup>[10]</sup>.

**TABELA 1 – TIPOS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL, TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO E APLICAÇÕES POTENCIAIS.**

TIPO DE CÉLULA			DESCRIÇÃO E APLICAÇÕES		
CÉLULA A COMBUSTÍVEL	DENOMINAÇÃO EM INGLÊS	SIGLA EM INGLÊS	ELETRÓLITO	TEMP. (°C)	APLICAÇÕES POTENCIAIS
ALCALINA	ALKALINE	AFC	ALCALINO	50-200	TRANSPORTE, ESPAÇO
ELETRÓLITO POLIMÉRICO	POLYMER ELECTROLYTE	PEFC (1)	POLÍMERO	50-130	TRANSPORTE, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
METANOL DIRETO	DIRECT METHANOL	DMFC	POLÍMERO (METANOL DIRETO)	60-130	TRANSPORTE, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
ÁCIDO FOSFÓRICO	PHOSPHORIC ACID	PAFC	ÁCIDO FOSFÓRICO	190-210	COGERAÇÃO, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
CARBONATO FUNDIDO	MOLTEN CARBONATE	MCFC	CARBONATO FUNDIDO	630-650	COGERAÇÃO, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA OU CENTRALIZADA
ÓXIDO SÓLIDO	SOLID OXIDE	SOFC	ÓXIDO SÓLIDO	700-1000	COGERAÇÃO, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA OU CENTRALIZADA

(1) – TAMBÉM CONHECIDA COMO PEMFC – *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL*

FONTE: PROGRAMA BRASILEIRO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL - CENTRO DE CIÊNCIA E GESTÃO ESTRATÉGICA – CGEE / CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2002 <sup>[1]</sup>.

Segundo NETO <sup>[11]</sup>, a tecnologia mais empregada para estudos de pesquisa em célula a combustível é a PEMFC. Estas células de baixa temperatura de operação, que utilizam uma membrana polimérica como eletrólito são as mais promissoras como fonte estacionária e também como alternativa para motores a combustão, por serem robustas e de fácil acionamento e desligamento, além das vantagens intrínsecas, como a alta eficiência com baixa emissão de poluentes <sup>[7,12]</sup>.

Atualmente, há no mundo unidades de demonstração em operação gerando uma potência de 50kW e outras em desenvolvimento produzindo cerca de 250kW <sup>[11]</sup>. 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 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 <sup>[13]</sup>.

<sup>1</sup> O termo ciclo de vida recorre as atividades principais ao longo do curso “do berço à cova” do produto que inclui: a manufatura, uso, manutenção e disposição final, bem como aquisição de matéria prima.

Dentro deste enfoque, a ferramenta analítica de gerenciamento ambiental, Análise do Ciclo de Vida (ACV), que avalia 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<sup>[14]</sup>.

Segundo HANDLEY *et. al.*<sup>[9]</sup>, embora os potenciais impactos ambientais associados ao uso da aplicação da PEMFC sejam bem documentados, o mesmo não ocorre com aqueles relacionados à manufatura e destinação final. O primeiro passo neste sentido foi realizado recentemente por KARAKOUSSIS *et. al. apud* HANDLEY *et. al.*<sup>[9]</sup>, que analisou os materiais e fluxo de energia de um sistema de produção de células PEMFC, usando a análise de ciclo de vida.

Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida e a importância da sua aplicação na busca por alternativas sócio-econômicas e ambientais viáveis para a reciclagem dos catalisadores de platina da célula PEMFC. Desta forma, pretende-se colaborar para o avanço do conhecimento das questões ambientais e sócios econômicas relacionadas ao processo produtivo da PEMFC. O desenvolvimento deste estudo realizou-se com base nos dados fornecidos pela literatura.

## 2 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 2.1 – Análise do Ciclo de Vida do Produto

De acordo VIGON *et al.*<sup>[15]</sup>, os primeiros estudos de avaliação ambiental de produtos situam-se no início da década de 60, sendo inicialmente inventários de consumo energético. No final da década no entanto, e mais ainda após a divulgação do relatório do Clube de Roma<sup>[16]</sup>, houve um aumento da preocupação com o esgotamento de recursos naturais, fazendo com que seu consumo fosse igualmente incluído nas análises.

O estudo mais conhecido desta fase inicial da ACV foi a análise que a Coca-Cola encomendou para o *Midwest Research Institute*, cujo relatório publicado em 1969 comparava diversas embalagens de bebida no que diz respeito a emissões ao ambiente e consumo de recursos naturais<sup>[15; 17]</sup>. Este tipo de estudo passou a receber o nome de *Resource Environmental Profile Analysis* – REPA<sup>[18]</sup>, juntamente como qual desenvolveu-se na Europa o método *Ecobalance*<sup>[17]</sup>, bastante semelhante.

Segundo CURRAN<sup>[19]</sup>, estes trabalhos tiveram posteriormente grande repercussão, principalmente entre 1973 e 1975 quando devido à crise do petróleo governos começaram a demandar uma grande quantidade de estudos detalhados de alternativas energéticas aos combustíveis fósseis. No entanto, passado o período crítico da crise o interesse pela ACV decresceu, e na segunda metade da década de 70 foram realizados poucos estudos.

Porém, na década de 80, com a preocupação com o destino de resíduos, principalmente de embalagens, ressurgiu o interesse por ferramentas de comparação e avaliação de desempenho ambiental<sup>[17]</sup>. Em 1985, a ACV é escolhida pelos países da Comunidade Européia para o auto-monitoramento de empresas e seus consumos de matéria e energia<sup>[17; 20]</sup>.

Desde então o interesse pela ACV vem aumentando, com uma diversificação cada vez maior de usos e usuários<sup>[18]</sup>. Diversas instituições têm buscado uma base conceitual sólida e uniforme, sendo destacado o papel desempenhado pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), que tem trabalhado com a ACV desde 1990<sup>[15]</sup>.

Quanto à padronização propriamente dita, a *International Organization for Standardization*, baseada inicialmente em seminários e publicações da SETAC e de algumas outras instituições, iniciou então, o processo de elaboração das normas sobre ACV. Atualmente encontram-se publicadas:

- ❖ ISO 14.040: *Environmental management – Life-Cycle Assessment – Principles and framework*<sup>[21]</sup>,
- ❖ ISO 14.041: *Environmental management – Life-Cycle Assessment – Goal scope and definition and life cycle inventory analysis*<sup>[22]</sup>,
- ❖ ISO 14.042: *Environmental management – Life-Cycle Assessment –Life cycle impact assessment*<sup>[23]</sup>,
- ❖ ISO 14.043: *Environmental management – Life-Cycle Assessment –Life cycle interpretation*<sup>[24]</sup>,

As normas definem requisitos gerais para a condução de ACV e estabelecem critérios para a divulgação dos resultados ao público. O propósito destas é fornecer para as organizações ferramentas para a tomada de decisão, bem como a avaliação de alternativas sobre o método de

manufatura. Elas podem, também, ser usadas para dar apoio às declarações de rótulos ambientais ou para selecionar indicadores ambientais.

Além destas normas, a ISO <sup>[25]</sup> publicou dois Relatórios Técnicos (TR) e uma Especificação técnica (TS), a saber :

- ❖ ISO/ TR 14.047: *Environmental management- Life cycle impact assessment-Examples of application of ISO 14.042* <sup>[26]</sup>;
- ❖ ISO/ TS 14.048: *Environmental management - Life cycle assessment – Data documentation format* <sup>[27]</sup>;
- ❖ ISO/ TR 14.049: *Environmental management - Life cycle assessment - Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis* <sup>[28]</sup>;

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou até o presente momento apenas duas versões: a NBR ISO 14.040 – Gestão Ambiental- Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e estrutura <sup>[29]</sup>, lançada em novembro de 2001 e a NBR ISO 14.041 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Definição de Objetivo e Escopo, e Análise de Inventário, publicada em maio de 2004 <sup>[30]</sup>.

## 2.2 – Usos da ACV

Segundo CHEHEBE <sup>[31]</sup>, a análise do ciclo de vida pode desempenhar um papel crítico dentro das empresas e organizações ao fornecer um inventário das entradas e saídas de cada produto. Os resultados obtidos no estudo podem ser utilizados de diversas formas, como mostrado a seguir:

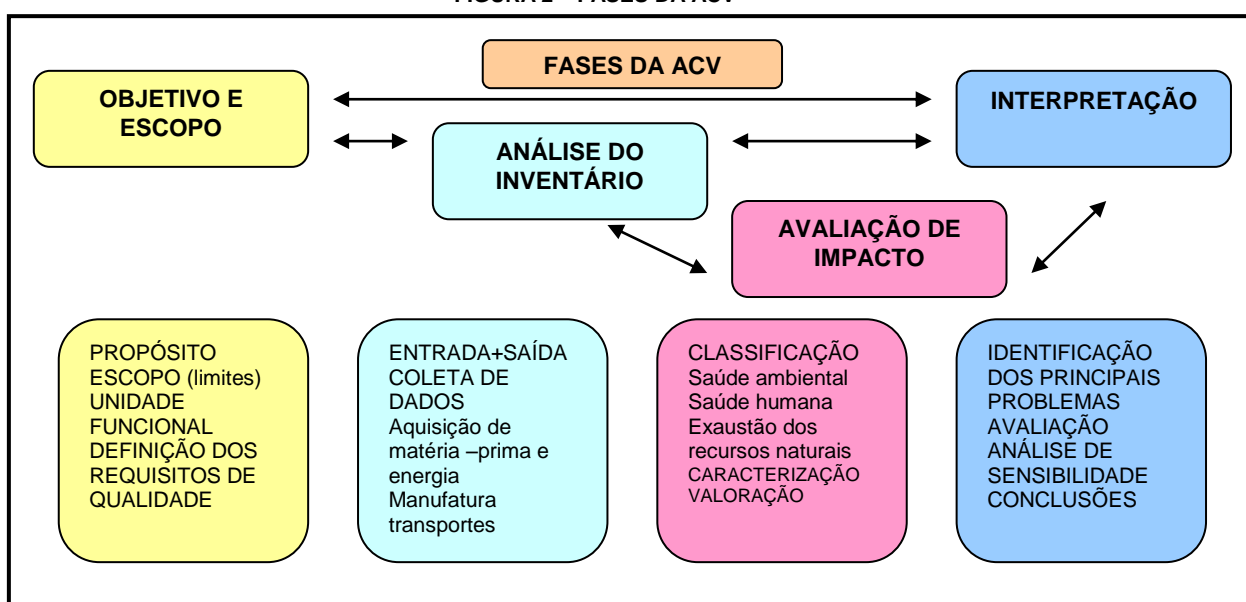
- ❖ Estabelecimento de uma ampla base de informações sobre as necessidades totais de recursos, consumo de energia e emissões.
- ❖ Identificação de pontos dentro do ciclo de vida como um todo, ou dentro de um determinado processo, onde seja possível considerar reduções nas necessidades de recursos e emissões.
- ❖ Comparação de entradas e saídas do sistema associadas a produtos alternativos, processos ou atividades.
- ❖ Auxílio no desenvolvimento de novos produtos, processos ou atividades visando uma redução das necessidades de recursos ou emissões.

Desta forma, são diversas as aplicações da ACV, e cada tipo de usuário aplica a metodologia para suas necessidades específicas. Exemplos de aplicações são as rotulagens ambientais, programas de prevenção à poluição, planejamento estratégico, seleção de fornecedores, marketing e aprimoramento do produto, entre outros.

## 2.3 – Fases da Análise do Ciclo de Vida

A ISO 14.040 <sup>[20]</sup> estabelece que a Análise do Ciclo de Vida de produtos deve incluir a definição do objetivo e do escopo do trabalho, uma análise do inventário, uma avaliação de impacto e a interpretação dos resultados, como mostrado na Figura 2.

FIGURA 2 – FASES DA ACV



FONTE: CHEHEBE, 1997 <sup>[15]</sup>.

### 2.3.1 – Definição do Objetivo e do Escopo

Nessa fase são definidos a razão principal para a condução do estudo, sua abrangência e limites, a unidade funcional, a metodologia e os procedimentos considerados necessários para a garantia da qualidade do estudo.

De uma forma simplificada a norma ISO 14040 <sup>[21]</sup> estabelece que o conteúdo mínimo do escopo de um estudo de ACV deve referir-se às suas três dimensões: onde iniciar e parar o estudo do ciclo de vida (a *extensão* da ACV), quantos e quais subsistemas incluir (a *largura* da ACV), e o nível de detalhes do estudo (a *profundidade* da ACV). De acordo com TILLMAN & BAUMANN <sup>[32]</sup> as fronteiras do sistema de produto são:

- ❖ *Fronteiras em relação ao sistema natural*: são os limites que indicam onde seu ciclo de vida se inicia e termina, em relação ao meio natural;
- ❖ *Fronteiras em relação a outros sistemas*: em geral, cada sistema de produto tem associado uma rede de outros sistemas, como produção de insumos, obtenção de matérias-primas, co-produtos gerados, entre outros. Deve-se delimitar dentro desta rede quais processos serão ou não estudados, sob pena de estarmos tentando abranger um universo demasiadamente amplo;
- ❖ *Fronteiras geográficas*: define onde cada processo será considerado como realizado, uma vez que cada localidade possui características que podem fazer o resultado se tornar inadequado (por exemplo, cada país possui uma matriz energética, e o uso de um modelo de geração da Alemanha, por exemplo, é inadequado ao Brasil);
- ❖ *Fronteira temporal*: considera o momento para o qual os dados levantados terão validade, ou seja, se será estudada uma situação atual, passada ou ainda cenários de futuro, e
- ❖ *Fronteiras de bens de capital*: determina se serão incluídas ou não no estudo as infra-estruturas necessárias para a realização dos processos (edifícios das fábricas, estradas, entre outros).

Na prática, o delineamento do contorno do sistema a ser estudado deve ser realizado com extremo cuidado, pois somos limitados pelos recursos financeiros e pelo tempo. Na ACV, assim como em várias técnicas de modelagem, existem certas tensões entre a precisão e a praticidade <sup>[30]</sup>. Deve-se, portanto, percorrer caminhos que tornem o estudo gerenciável, prático, econômico sem descuidar, no entanto, da confiabilidade do modelo. Em todos os casos, o princípio básico a ser aplicado é: *menos é melhor* <sup>[30]</sup>. Em resumo, ao iniciar-se uma ACV de um produto torna-se crítico um claro estabelecimento do objetivo e do escopo do estudo.

### 2.3.2 – Análise do Inventário do Ciclo de Vida

Uma vez que o objetivo e o escopo do estudo foram estabelecidos, a próxima fase da ACV é o Inventário. A definição do objetivo e do escopo do estudo fornece um planejamento inicial sobre a forma como o estudo será conduzido. O Inventário do Ciclo de Vida de um produto refere-se à coleta de dados e aos procedimentos de cálculos. Em tese, o inventário é semelhante a um balanço contábil-financeiro, só que medido em termos energéticos ou de massa. O total do que entra no sistema em estudo deve ser igual ao que sai.

A análise de inventário é a fase de coleta e quantificação de todas as variáveis (matéria prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes, resíduos sólidos, etc.) envolvidas durante o ciclo de vida de um produto (análise horizontal), processo ou atividade (análise vertical). A condução do inventário é um processo interativo. A seqüência de eventos invariavelmente envolve a checagem de procedimentos de forma a assegurar que os requisitos de qualidade estabelecidos na primeira fase estejam sendo obedecidos.

O inventário, na prática, é difícil e trabalhoso de ser executado por uma série de razões que vão desde a ausência de dados conhecidos e a necessidade de estimá-los à qualidade do dado disponível. De uma forma geral deve-se organizar a fase de análise do inventário de acordo com as seguintes atividades:

- ❖ Preparação para a coleta de dados;
- ❖ Coleta de dados;
- ❖ Refinamento dos limites do sistema;
- ❖ Determinação dos procedimentos de cálculo;
- ❖ Procedimentos de alocação.

A Norma ISO 14.040 <sup>[21]</sup> estabelece que um esquema geral para o inventário deve ser constituído:

- ❖ Da apresentação do sistema de produto a ser estudado e dos limites considerados em termos dos estágios de Ciclo de Vida, unidades de processo e entradas e saídas do sistema;
- ❖ Da base para comparação entre sistemas (em estudos comparativos);

- ❖ Dos procedimentos de cálculo e da coleta de dados, incluindo-se as regras para alocação de produtos e o tratamento dispensável à energia;
- ❖ Dos elementos necessários a uma correta interpretação por parte do leitor, dos resultados da análise do inventário.

### 2.3.3 – Avaliação de Impacto

Representa um processo qualitativo/quantitativo de entendimento e avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais baseado nos resultados obtidos na análise do inventário. Os níveis de detalhe, escolha dos impactos a serem avaliados e a metodologia utilizada dependem do objetivo e do escopo do estudo.

### 2.3.4 – Interpretação

Consiste na identificação e análise dos resultados obtidos nas fases de inventário ou avaliação de impacto de acordo com o objetivo e o escopo previamente definidos para o estudo. Os resultados dessa fase podem tomar a forma de conclusões e recomendações aos tomadores de decisão.

A fase de interpretação de uma ACV compreende as três etapas seguintes:

- ❖ Identificação das questões ambientais mais significativas com base nos resultados da análise do inventário ou ACV;
- ❖ Avaliação que pode incluir elementos tais como a checagem da integridade,
- ❖ Sensibilidade e consistência; conclusões, recomendações e relatórios sobre as questões ambientais significativas.

## 2.4 – Análise do Ciclo de Vida da PEMFC

No estudo realizado por PENHT <sup>[10]</sup>, a unidade funcional da ACV era um stack de 75 kW para aplicação automotiva e o objetivo da avaliação visava, principalmente, determinar a importância relativa da produção do stack comparado-o com a sua fase de utilização, bem como os potenciais aperfeiçoamentos ou possíveis limitações em relação a sua produção. Nesse caso, verificou-se 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 stack, apresenta impactos que não podem ser negligenciados quando comparados à utilização de motores de veículos comuns. Estes impactos são causados principalmente pelo uso de metais do grupo da platina (PGM) nos catalisadores, relacionados ao processo de extração pirometalúrgica, alocação das diferentes emissões e a sustentabilidade de produção dos países fornecedores. Em menor escala, destacam-se os impactos relacionados aos materiais e energia utilizados na fabricação das placas bipolares.

De acordo com o *Department of Energy* e o Grupo de Informação sobre Minerais - USGS dos Estados Unidos será essencial reciclar a platina para que a PEMFC seja um produto sustentável no futuro. Conforme Handley *et. al* <sup>[9]</sup>, há razões econômicas e ambientais fundamentais para reciclar a platina e quando presente o rutênio das PEMFC. O custo estimado para estes metais nobres em um stack de 70 kW encontra-se em torno de US\$ 1000 por 16 g. O argumento ambiental para a reciclagem da platina é forte, pois em comparação a produção a partir de fontes primárias, as emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) podem ser diminuídas por um fator igual a 100 e a demanda de energia primária por um fator 20.

Na análise do ciclo de vida de um stack de 70 kW da célula PEMFC, realizado por Handley *et. al* <sup>[9]</sup>, no qual visou-se identificar os prováveis impactos relacionados aos resíduos oriundos de veículos, considerando o contexto da legislação da União Européia, as informações obtidas subsidiaram as estratégias para o uso racional dos materiais, energia e destinação final dos componentes da célula: eletrodos, eletrólito, placas bipolares e acessórios. Os resultados alcançados indicaram que todos os componentes podem ser reciclados, destacando-se o fato de que a platina e o rutênio podem ser recuperados com alto rendimento e com menor impacto (ambientalmente melhor), ao se utilizar um processo de extração por solvente<sup>2</sup>.

Neste mesmo sentido, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares tem direcionado estudos na análise do ciclo de vida da unidade eletrodo matriz da célula do tipo PEMFC. Resultados

<sup>2</sup> Uma revisão detalhada do processo de extração por solvente para a recuperação destes metais foi determinada por BARNES & EDWARDS *apud* HNDLEY *et. al* <sup>[9]</sup>.

obtidos pelo laboratório de Componentes de Células a Combustível do IPEN, ao utilizar um processo próprio de recuperação da platina da unidade eletrodo matriz da célula PEMFC, apresentou, em processos químicos distintos, um rendimento de 90% e 99% de recuperação do metal. Não obstante, estudos têm sido direcionados no sentido de verificar a viabilidade de reaproveitamento deste metal na construção de novas células.

### 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente preocupação com os impactos ambientais gerados pela provisão de bens e serviços à sociedade tem sido indutora do desenvolvimento de novas ferramentas e métodos que visam a auxiliar na compreensão, controle e/ou redução desses impactos. A ACV vem se mostrando como uma importantíssima ferramenta para auxiliar em estudos dessa natureza, por considerar o impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida do produto: da extração das matérias-primas utilizadas à produção, ao uso e à disposição final.

Dentro deste contexto a ACV também se mostra muito eficiente na análise e redução de custos industriais, evidenciando benefícios econômicos e estratégicos perante uma adequada política ambiental, que afeta diretamente o comportamento da organização em relação às legislações ambientais vigentes.

Neste sentido, o enfoque gerencial da ACV constitui-se em um importante instrumento para a administração dos aspectos ambientais de sistemas de produtos, significando uma forte tentativa de integração da qualidade tecnológica do produto – ISO 9000, da qualidade ambiental – ISO 14000 e o do valor agregado para o consumidor e a sociedade – rótulos ambientais. Segundo CHEHEBE, em resumo, a Avaliação do Ciclo de Vida de produtos pode ser utilizada para obter-se um melhor entendimento de todo o sistema utilizado para produzir determinado produto e, conseqüentemente, aprimorá-lo.

### 4 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao técnico Marco Andreoli, do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais, pelo fornecimento das informações obtidas em laboratório.

### 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Fundo Setorial de Energia. Secretaria Técnica. **Programa Brasileiro de Células a Combustível: proposta para o programa**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, 2002. 30 f.
- [2] GOLDEMBERG, J. & VILLANUEVA, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. KOCH, A (tradutor). 2<sup>o</sup> Edição. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 209 p.
- [3] INTERGOVERNMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Disponível em <http://www.ipcc.ch/pub/un/ipccwg1s.pdf> Acessado em 10/05/2004.
- [4] JANUZZI, G.M. **Energia e Mudanças Climáticas: barreiras e oportunidades para o Brasil**. Disponível em <http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/Artigos/id5.htm> . Acessado em 10/05/2004.
- [5] 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.
- [6] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Fundo Setorial de Energia. Secretaria Técnica. **Estado da Arte e Tendências das Tecnologias para Energia**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, 2003. 90 f.
- [7] WENDT, H. *et. al.* **Tecnologia de Células a Combustível**. Química Nova. Vol. 23, nº4. 2000. p. 538 – 546.
- [8] PENNA, C.G. **O Estado do Planeta: sociedade do consumo e degradação ambiental**. Rio de Janeiro: Record, 1999. 252 p.
- [9] HANDLEY, C. *et. al.* **Impact of the European Union vehicle waste directive on end-of-life options for polymer electrolyte fuel cells**. Journal of Power Sources. Elsevier Science Ltda. 2002. p. 344 – 352.
- [10] PENHT, M. **Life-cycle Assessment of Fuel Cell Stacks**. International Association for Hydrogen Energy. Elsevier Science Ltda. 2001. p. 91 – 101.



- [11] NETO, E.H.G. **Brasil H2 Fuel Cell Energy**. Disponível em <http://www.celulaacombustivel.com.br/cac/oconceito/cachistoria.htm>. Acessado em 07/06/2004.
- [12] SPINACÉ, E. V. *et al.* **Eletro-oxidação de Metanol e Etanol sobre Eletrocatalisadores de PtRU/C Preparados pelo Método de Deposição Espontânea**. Anais do 12º Congresso Brasileiro de Catálise. -----, -----, p.1105-1107.
- [13] CAMARGO, J.C. **O Uso de Platina em Células a Combustível**. CENEH - Boletim 9 – Hidrogênio e Energia. Disponível em <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/boletim/boletim9/boletim9.htm>. Acessado em 20/06/2004.
- [14] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY AND SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION. **LCAccess – LCA 101**. Disponível em <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.htm>. Acessado em 17/05/2004.
- [15] VIGON, B.W. *et al.* **Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles**. Cincinnati: EPA, 1993.
- [16] MEADOWS, D.H. *et al.* **Limites do crescimento**. São Paulo: Ed. Perspectiva, 1972.
- [17] CHRISTIANSEN, K. **Life Cycle Assessment in a Historical Perspective**, *In*: Workshop Internacional sobre Análise do Ciclo de Vida. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- [18] WENZEL, H. *et al.* **Environmental Assessment of Products. 2 vol.** Copenhagen: Kluwer Academic Press, 1997.
- [19] CURRAN, M.A. (org.). **Environmental Life Cycle Assessment**. Nova Iorque: McGraw Hill, 1996.
- [20] FAVA, J. *et al.* **A Technical Framework for Life-Cycle Assessment**. Washington: SETAC, 1991.
- [21] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental management – Life Cycle assessment: Principles and framework - ISO 14.040**. Genebra: ISO, 1997.
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental management – Life Cycle Assessment: Goal and scope definition and inventory analysis- ISO 14.041**. Genebra: ISO, 1998.
- [23] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental management – Life Cycle Assessment – Life cycle: impact assessment- ISO 14.042**. Genebra: ISO, 2000a.
- [24] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental management – Life Cycle Assessment: Life cycle interpretation - ISO 14.043**. Genebra: ISO, 2000b
- [25] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental management – Life Cycle Assessment**. Disponível em <http://www.iso.org>. Acessado em 20/06/2004.
- [26] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental management- Life Cycle Impact Assessment: Examples of application of ISO 14.042- ISO/ TR 14.047**. Genebra: ISO, 2003b.
- [27] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental management - Life Cycle Assessment: Data documentation format- ISO/ TS 14.048**. Genebra: ISO, 2002.
- [28] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental management - Life Cycle Assessment: Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis- ISO/ TR 14.049**. Genebra: ISO, 2000c.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.040 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.040 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: Definição de Objetivo e Escopo e Análise do Inventário**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [31] CHEHEBE, J. R. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark . CNI, 1997. 120p.

[32] TILLMAN, A.M. & BAUMANN, H. **General Description of Life Cycle Assessment Methodology**. Estocolmo: Chalmers University of Technology, 1995.