

UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM AUTOMÓVEIS COMO SISTEMA DE PROPULSÃO ALTERNATIVO AO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Diogo Adamy Barreto¹
Glaucio Vanderlei dos Santos²
Admilson Teixeira Franco³
Cássia Maria Lie Ugaya⁴
Marco Aurélio de Carvalho⁵

Resumo. O presente artigo aborda a tecnologia envolvida nas Células a Combustível (CaCs), investigando sua utilização em automóveis como um sistema de propulsão alternativo ao motor de combustão interna convencional. Para tanto, foram revisados os principais tipos de Células a Combustível em desenvolvimento atualmente, dando-se uma maior ênfase à célula do tipo membrana polimérica – PEMFC – a qual, devido às suas características técnicas e econômicas, é a que melhor se enquadra nos quesitos necessários à substituição do motor à combustão interna atual. Com o propósito de caracterizar a tecnologia da CaC, foram comparados, para todos os tipos de células apresentadas, os atuais estágios de desenvolvimento tecnológico, princípios de funcionamento, materiais comumente utilizados e as suas vantagens e desvantagens técnicas e econômicas. De posse desses dados, foi possível fazer a comparação entre a utilização de CaCs em veículos automotivos com os atuais motores de combustão interna convencionais. Através de uma consulta à especialistas da área de CaCs e com o auxílio de ferramentas de prospecção

¹ Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
e-mail: dbarreto@yahoo.com

² Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
e-mail: glaucio27@yahoo.com.br

³ Doutor em Engenharia Mecânica pela UNICAMP. Professor do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
e-mail: admilson@cefetpr.br

⁴ Doutora em Engenharia Mecânica pela UNICAMP. Professor do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
e-mail: cassia@cefetpr.br

⁵ Doutor em Engenharia da Produção pela UFSC. Professor do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
e-mail: decarvalho@cefetpr.br

tecnológica, foram elaborados cenários para a utilização de CaCs em substituição ao motor de combustão interna, buscando-se prever como e quando esta nova tecnologia estaria técnica e comercialmente disponível e quais países seriam os pioneiros em ter uma frota de veículos a CaC trafegando em seu território.

Palavras-Chave: Células a combustível (CaC), Hidrogênio, Veículo híbrido, Motor de combustão interna, Cenários.

Abstract: The present article studies the involved technology in the Fuel Cells investigating its use in automobiles as an alternative propulsion system to the conventional internal combustion engine. For in such a way, the main types of Fuel Cells in development currently had been revised, giving a larger emphasis to the Fuel Cell of the type Polimeric Membrane - PEMFC - which, considering its economic and technical characteristics, the one that best fit in the necessary questions to the substitution of the engine to the current internal combustion. With the intention to characterize the technology of the Fuel Cells, they have been compared, for all the types of presented cells, the current state-of-art of technological development, principles of functioning, materials commonly used and its economic and technical advantages and disadvantages. With these data it was possible to make the comparison between the use of Fuel Cells in automobiles with the current conventional engines of internal combustion. Fuel Cells specialists were consulted and with the aid of tools of technological prospecting, scenes for the use of Cells in substitution of the internal combustion engine have been elaborated, looking for a forecast as and when this new technology would be commercially available to which countries would be the pioneers in having a fleet of Fuel Cells vehicles travelling in its territory.

Keywords: Fuel Cells, Hydrogen, Hybrid Vehicle, Internal Combustion Engine, Scenarios.

1. Introdução

Percebe-se que grandes mudanças ocorrem de maneira freqüente em todo o cenário mundial, sejam elas de hábitos, de tecnologias, de alimentação ou trabalho e, com isso, novos são os paradigmas que surgem e precisam ser ultrapassados, fazendo com que deflagrem instabilidades políticas, sociais, ambientais e econômicas em todos os setores da sociedade. Em consequência disso e do mundo globalizado, deve-se tratar os problemas de maneira conjun-

ta e global, pois qualquer impacto causado em uma determinada região do planeta terá efeitos diversos no todo.

O que se vê hoje é uma nova fase em relação ao que ocorreu com o carvão e o petróleo no início do século 20. Uma nova economia de energia está surgindo, não de uma nova fonte, mas de limites que a natureza impõe aos recursos fósseis e também pela sua poluição e exploração de forma desordenada e descontrolada, requerendo limites de produção cada vez mais severos, almejando o desenvolvimento de uma energia mais limpa e eficiente. Segundo Rifkin (2003), a humanidade está prestes a entrar na “Era do Hidrogênio”.

O hidrogênio, além de ser um combustível limpo que possui grande capacidade de armazenar energia, é o elemento mais comum e mais abundante do universo (COLUMBIA, 2001), porém não é encontrado em sua forma primária na Terra, devendo, portanto, ser processado de forma a ser utilizado. O hidrogênio foi descoberto por Henry Cavendish em 1776 através da eletrólise da água e foi descrito por ele como um “ar inflamável”. Desde o histórico acidente com o Zepelin (LZ 129 Hindenburg), em 6 de maio de 1937, o hidrogênio tornou-se conhecido para o público em geral como um gás de alto risco. Veículos e instalações de células a combustível são chamados hoje por alguns de “pequenos Hindenburgs”. Embora o hidrogênio possua boas características combustíveis, e isso seja uma virtude para sua utilização em células a combustível, é, também, uma grande barreira para sua aplicação em larga escala, já que novos acidentes poderão ocorrer, se não houver um controle eficaz de sua utilização. Essas características, entre outras, são questionáveis na aplicação do hidrogênio como forma de obtenção de energia e devem ser consideradas para sua utilização em automóveis.

Para que o estudo da tecnologia das CaCs e a infra-estrutura do hidrogênio sejam eficientes e competitivos com outras tecnologias similares existentes, os primeiros passos deverão ser subsidiados pelos governos, ou ainda, por meio de cooperações e parcerias público-privadas, devido aos altos custos de pesquisa e desenvolvimento (LEIBY; RUBIN, 2002). Um exemplo disso é o programa de álcool combustível – Proálcool - implantado com sucesso em anos passados e que poderia ser retomado para atingir uma produção otimizada e atender uma parte da demanda na produção de hidrogênio (GEIGER, 2003). Tem-se, então, que a idéia de se desenvolver um veículo a CaC reside, principalmente, no fato de que os veículos atuais, movidos a motor de combustão interna, são um dos maiores responsáveis pela emissão de poluentes na atmosfera. Além disso, estima-se que os meios de transporte são responsáveis pela utilização de um terço dos combustíveis fósseis consumidos no planeta.

Esses veículos proporcionarão não apenas vantagens ambientais como as citadas acima, mas passarão por mudanças extremas de conceito. Além de diminuir consideravelmente a emissão de poluentes emitindo pelo escape

uma substância muito menos nociva ao ambiente, o vapor d'água, ao invés da tradicional fumaça preta e poluída carregada de CO₂ e material particulado, eles serão silenciosos, com aceleração suave e sem solavancos, as vibrações serão decorrentes apenas da pista de passeio já que a CaC não possui partes móveis, não precisarão de óleos lubrificantes, serão mais econômicos tanto em sua manutenção quanto no que diz respeito a uma maior autonomia com menos combustível, entre outras.

Ainda são vários os desafios a serem alcançados, tais como: a redução nos custos de fabricação das CaC, a durabilidade dos componentes, a eficiência, confiabilidade e a infra-estrutura tão exigidas pelo mercado consumidor. Entretanto, a corrida rumo ao domínio desta tecnologia foi iniciada, em que cada fabricante está desenvolvendo um sistema próprio. A questão, agora, é prever quando a transição da economia do petróleo para a economia do hidrogênio irá ocorrer, e quem será o primeiro a fornecer um sistema tecnologicamente apropriado e economicamente viável.

2. Contextualização Histórica

Desde seu início, a civilização humana sempre procurou por fontes de energia que auxiliassem sua evolução. Até a Idade Média, a queima de lenha e a tração animal eram praticamente as únicas fontes de energia utilizadas. Durante a Revolução Industrial, o principal combustível consumido foi o carvão mineral; logo seguido do advento do petróleo e seus derivados, combustíveis estes que causam grande impacto no modo de se obter energia, assim como em sua utilização. O crescente aumento do consumo de energia, e o conseqüente agravamento no ecossistema terrestre causado pelo impacto do uso de combustíveis fósseis criaram um cenário que em poucos anos se tornará insustentável e irreversível.

As formas de energia sucedem-se de forma que a quantidade de carbono é reduzida a cada modificação na forma de obtenção de energia. Para descrever o processo de redução da proporção de carbono em relação ao hidrogênio à medida que as fontes de energia se sucedem, é utilizado o termo “descarbonização da energia” (AUSUBEL, 2000). É possível considerar o hidrogênio como a forma de obtenção de energia mais limpa de todas, pois não possui nenhum átomo de carbono em sua composição.

A primeira CaC foi construída em 1801 por Humphrey Davy, que realizou estudos eletroquímicos usando carbono e ácido nítrico. Já, a primeira célula a combustível a hidrogênio e oxigênio foi desenvolvida por William Robert Grove em 1839. Algumas outras descobertas ocorreram desde então, porém essa tecnologia não foi muito difundida até 1960, quando, durante a corrida espacial, a NASA desenvolveu sistemas para armazenamento de hidrogênio e o aproveitamento deste combustível por meio das Células a Combustível.

Com relação as CaCs utilizadas em automóveis, os primeiros veículos elétricos surgiram ainda no século XIX e precederam a invenção do motor de propulsão a gasolina por Daimler e Benz, na Alemanha, em 1885. Antes que esta tecnologia se impusesse até os nossos dias, eram prósperas as manufaturas de veículos elétricos, e, até mesmo, linhas de ônibus elétricos ganhavam espaços nas ruas de Londres por volta de 1886. Estes progressos tornaram-se possíveis às custas de pesquisas de G. Trouvé em 1881, na França, que vieram permitir a recarga das baterias. Em 1899, o engenheiro belga Camille Jenatzy construiu um carro elétrico que alcançou a incrível velocidade, para época, de 100 km/h. Apesar das qualidades que estes veículos demonstravam, as limitações do tempo de recarga e autonomia não se mostraram suficientes para suplantarem o sucesso iniciado com o lançamento do Ford T, em 1909, e voltaram ao cenário mundial somente na década de 70 com a crise do petróleo e, novamente, na década de 80 quando o mundo voltou-se para as questões ambientais e percebeu que necessitava de uma fonte energética mais limpa.

A tecnologia aplicada em veículos CaC já esta sendo desenvolvida há muitos anos, não especificamente para a aplicação junto às células a combustível, mas em outras tecnologias; no caso os veículos elétricos e conseqüentemente os veículos híbridos. Conceitualmente um veículo CaC é um veículo híbrido que utiliza como fonte geradora as células a combustível, por isso a comparação entre as tecnologias (OGDEN, 2000).

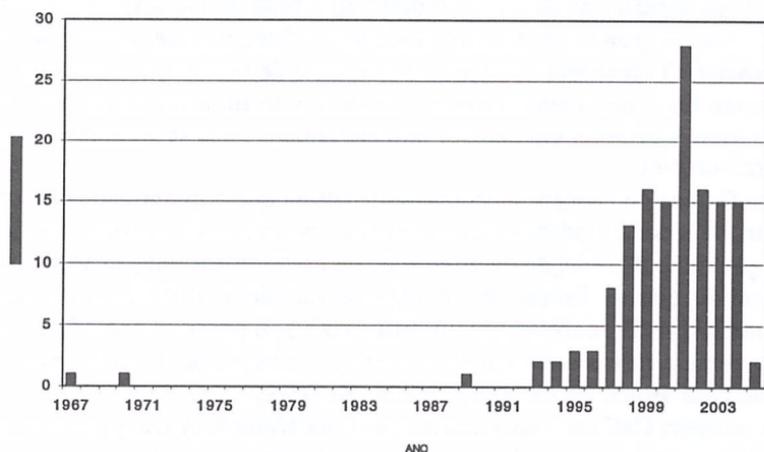


FIGURA 1. Lançamento de protótipos por ano.

Na figura 1, é possível visualizar a evolução no lançamento de protótipos que utilizam Células a Combustível como forma de obtenção de energia, mostrando o grande interesse dos grandes fabricantes por esta tecnologia, principalmente nestes últimos anos.

Já, na figura 2, é possível perceber uma crescente evolução do registro de patentes na aplicação de CaC, nos diferentes campos de aplicação. Pode-se observar que até o ano de 1995 o crescimento se mantinha linear, enquanto que a partir daí ocorreu um crescimento exponencial dos registros, evidenciando novamente o grande interesse das empresas em estudar esta nova área do conhecimento.

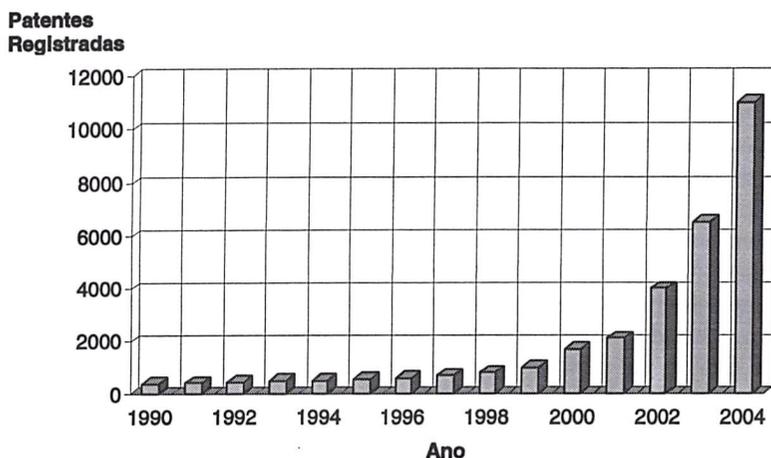


FIGURA 2. Evolução de patentes registradas.

3. Conceitos Básicos sobre Células a Combustível

A Célula a Combustível é um dispositivo eletroquímico que converte a energia química de uma reação, diretamente em energia elétrica. A estrutura básica de uma CaC consiste de uma camada de eletrólito em contato com um ânodo e um cátodo, um de cada lado e ambos porosos. Em uma CaC típica, o ânodo (eletrodo negativo) é alimentado continuamente com gás combustível, enquanto que o cátodo (eletrodo positivo) recebe um oxidante (o oxigênio do ar). A reação eletroquímica que ocorre nos eletrodos produz uma corrente elétrica.

Com a aplicação de um catalisador de platina ou níquel, o hidrogênio é separado em prótons e elétrons (íons de hidrogênio). Estes íons passam através de uma membrana no centro das CaCs e, novamente, com a aplicação de um catalisador de platina ou níquel, combinam-se com o oxigênio e elétrons no lado do cátodo, produzindo água, que é expelida em forma de vapor.

Na figura 3, tem-se o princípio de funcionamento de uma célula a combustível, descrito passo a passo, com intuito de se ter um melhor entendimento do processo de geração de energia elétrica no interior da célula.

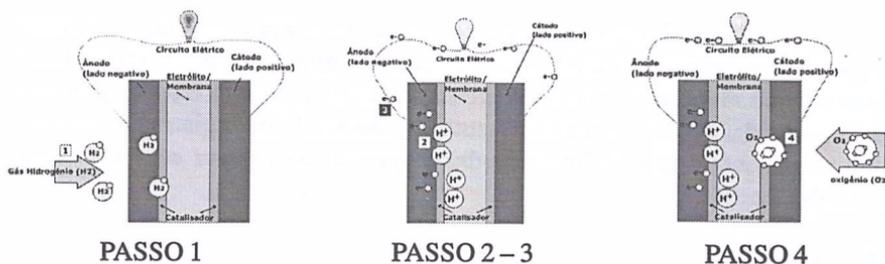


FIGURA 3. Esquema do funcionamento de uma Célula a Combustível

Passo 01) De um lado da CaC, o gás hidrogênio (H_2) pressurizado é bombeado para o terminal negativo do eletrodo, o ânodo. O gás é forçado a passar por canais de fluxo até atingir o catalisador.

Passo 02) Quando a molécula de hidrogênio entra em contato com o catalisador, ela se separa em dois íons de hidrogênio (H^+) e dois elétrons (e^-).

Passo 03) Os elétrons (e^-) são conduzidos através do eletrodo até atingirem o circuito externo, onde temos um fluxo de elétrons, isto é, uma corrente elétrica no sentido do eletrodo positivo, o cátodo. Os gases de hidrogênio (H_2) que não foram quebrados pelos catalisadores não passam através do eletrólito, mas são realimentados até serem quebrados.

A reação química que caracteriza essa fase é:



Passo 04) Do outro lado da CaC, o gás oxigênio (O_2) é bombeado para o terminal positivo do eletrodo, o cátodo. O gás é forçado a passar por canais de fluxo até atingir o catalisador.

Passo 05) Uma vez no catalisador, a molécula de oxigênio combina-se com os íons de H^+ que atravessaram o eletrólito e com os elétrons, para formar a molécula de água (H_2O). Nesta reação, uma certa quantidade de calor é liberada (vapor de água).

A reação química que caracteriza essa fase é:



O hidrogênio, quando queimado com oxigênio puro, tem como produtos apenas calor e água, enquanto que se queimado com o ar, constituído por cerca de 68% de nitrogênio, alguns óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados. Ainda assim, a queima de hidrogênio produz menos poluentes atmosféricos do que os combustíveis fósseis.

Num sistema com CaC, a utilização do hidrogênio puro traz vantagens como: não necessitar de reformadores (equipamento utilizado para extrair o hidrogênio de uma fonte deste combustível), diminuindo assim o tamanho e custo do sistema, além de não contaminar as membranas e eletrodos que são sensíveis a alguns compostos (YACOBUCCI, 2004).

3.1. Principais tipos de Células a Combustível

Na tabela 1, estão apresentados os principais tipos de CaC existentes em desenvolvimento nos diversos grupos de pesquisa em todo o mundo, bem como as características básicas de cada uma delas.

No estudo de CaC para aplicação em automóveis, deve-se estudar isoladamente a célula do tipo PEMFC por se tratar da tecnologia que está sendo desenvolvida e tratada como a melhor opção para essa aplicação. Todos os grandes fabricantes de automóveis escolheram essa tecnologia como sistema de geração de energia para seus veículos. A principal questão dessa tecnologia é o custo dos materiais da membrana e os catalizadores de platina, que são muito caros (HAMADA, 2001).

Tipo	PAFC	SOFC	MCFC	AFC	PEMFC
Eletrólito	Ácido Fosfórico	Cerâmico	Mistura de Carbonatos	Hidróxido de Potássio	Membrana Polimérica
Temperatura de operação (°C)	150-220	800-1000	650	100 - 250	80
Portador de carga	H ⁺	O ⁻²	CO ₃ ⁻²	OH ⁻	H ⁺
Catalizador	Platina	Titanato de Cálcio	Níquel	Platina	Platina
Reforma	Externa	Interna	Interna	Externa	Externa
Eficiência (%)	35-45	60-70	Acima de 60	40-50	40-50
Estado de desenvolvimento	Principalmente aplicações estacionárias	Processo de validação	Processo de validação	Sistemas comerciais	Protótipos
Vantagens	1 - Apresentam flexibilidade na utilização de combustíveis; 2 - São estáveis; Têm baixa volatilidade;	1 - Tem um eletrólito sólido, evitando problemas como vazamentos;	1 - Pode ser feita de metal comum, reduzindo o custo de fabricação;	1 - Baixa temperatura de operação; 2 - Boa relação peso x volume;	1 - Possuem eficiência em torno de 55%; 2 - Têm ótima relação peso x volume;
Desvantagens	1 - Apresenta a menor eficiência entre todas as outras CaC's; 2 - São lentas em relação ao aquecimento e ao início das reações	1 - Escassez de materiais disponíveis;	1 - O eletrólito é muito corrosivo; 2 - A temperatura de operação diminui a vida útil do material componente;	1 - Vida útil curta;	1 - Utilização da platina como catalizador (alto custo);

TABELA 1. Comparação de Células a Combustível (Fonte:).

4. Aplicação de Células a Combustível em Automóveis

Todo veículo híbrido, seja ele movido com Célula a Combustível ou não, necessita de dispositivos para armazenamento de energia que podem ser formados por baterias e capacitores.

A bateria é um dos componentes mais importantes em um veículo híbrido. Com o auxílio de baterias é possível obter maior controle na distribuição da energia gerada pela Célula a Combustível; a energia excedente é armazenada e a energia requerida é fornecida pela bateria. A energia é armazenada em forma de energia química e liberada conforme solicitada. Os principais critérios para a seleção de uma bateria são: temperatura de trabalho, potência requerida, baixo custo, tempo de carga / descarga e reciclabilidade.

Juntamente com as baterias, são utilizados capacitores, para os casos da necessidade de um pico de consumo durante acelerações do automóvel. O capacitor é um dispositivo que armazena energia elétrica na forma de carga elétrica, e a principal diferença entre um capacitor e uma bateria é que um capacitor pode ser rapidamente carregado e descarregado.

Outra tecnologia amplamente utilizada é a frenagem regenerativa, que reaproveita parte da energia dissipada durante a desaceleração para armazenar energia elétrica. Para isso existe um sistema eletrônico que controla a atuação dos motores elétricos do automóvel. Durante a aceleração, o motor transmite potência as rodas e durante a desaceleração transforma o mesmo motor em um gerador e essa energia é transferida à bateria.

Deve existir, também, em um automóvel CaC um controle efetivo dos gases utilizados no processo químico, sendo para isso muito importantes os filtros dos gases e os umidificadores, pois o controle da umidade dos gases é de extrema importância para a eficiência do sistema e também para o aumento da durabilidade da célula.

Por fim, os controladores regulam a intensidade de corrente do sistema elétrico do automóvel. Um controlador possui duas funções principais, um componente de comando administra as instruções do motorista e outro componente de força controla a potência do motor.

4.1. Comparação entre a utilização da Célula a Combustível PEMFC em relação ao motor de combustão interna em automóveis

O veículo a Célula a Combustível apresenta claras vantagens em relação ao veículo com motor a combustão interna, e estas serão apresentadas abaixo. Entretanto, a diferença principal entre estas duas tecnologias é que o veículo a Células a Combustível utiliza um “módulo de células a combustível”, responsável pela geração da energia elétrica para os motores elétricos do sistema, convertendo esta energia em movimento, isto é, em energia mecânica. Já, os veículos com motor a combustão interna, utilizam-se da energia química

contida no combustível, tal como a gasolina, o álcool ou o gás natural, para convertê-la em calor por meio da combustão, fazendo com que a expansão resultante dos gases, em alta temperatura, forneça a energia mecânica aos pistões, bielas e virabrequim, gerando o movimento do sistema.

Além da diferença citada, referente ao princípio de funcionamento, pode-se relacionar ainda, outras vantagens existentes nos veículos a Células a Combustível (CaC) quando comparados aos com motor a combustão interna (MCI). Estas vantagens são:

1) A conversão da energia química do combustível em energia mecânica no MCI ocorre em altas temperaturas e envolve muitas partes móveis. Devido a esses componentes móveis e ao próprio processo de combustão, os veículos movidos com MCI emitem mais poluição sonora, bem como utilizam óleos lubrificantes para reduzir o atrito gerado entre as partes, os quais poluem o meio ambiente. Além disso, existe o problema da manutenção que, proporcionalmente, é mais cara e complicada do que nos veículos movidos a CaC. Como o sistema a CaC é composto por poucas partes móveis, tem-se também uma aceleração mais suave e sem solavancos, ao contrário do que ocorre nos veículos com MCI.

2) No veículo a CaC existe a possibilidade de se gerar energia por meio da frenagem, sendo este processo denominado de “frenagem regenerativa”. Este processo transforma a energia mecânica utilizada nos freios em energia elétrica, armazenando-a em equipamentos chamados de “ultracapacitores”. Estes dispositivos têm a função de armazenar energia elétrica nos campos entre placas eletricamente carregadas, com intuito de fornecer esta mesma energia extra durante ultrapassagens ou, ainda, em subidas íngremes, isto é, quando ocorrerem picos de tensão no sistema.

3) A utilização de motores elétricos abre a possibilidade na organização dos espaços no veículo. Como a energia elétrica da CaC pode ser transmitida mais facilmente que a energia mecânica do MCI, a utilização de motores elétricos diretamente às rodas libera espaço para redistribuição de itens internos do veículo, sem o comprometimento do desempenho ou da potência. Com isso, torna-se desnecessário reservar um grande compartimento para acomodar o motor, o que permite que as carrocerias sejam intercambiáveis. Este novo conceito permitirá aos donos dos veículos irem às suas revendedoras para “acoplar” novas carrocerias personalizadas em seu chassi usado. Como exemplo disso, pode-se citar o veículo – conceito da General Motors, o *Autonomy*, equipado com células a combustível, motores elétricos em cada roda e ainda com a tecnologia *drive-by-wire*, que permite que o freio, aceleração e direção do veículo sejam controlados eletronicamente, ao invés de mecanicamente.

4) Uma das mais importantes diferenças entre um motor elétrico e um motor de combustão interna é a eficiência que cada sistema é capaz de fornecer. A eficiência para um MCI é a relação entre a energia química contida no

combustível e a transformada em energia útil, isto é, a energia mecânica para movimentar a roda de um veículo. Já, a eficiência de um motor elétrico é a relação entre a energia elétrica que foi fornecida e a transformada em energia de movimento. Esta eficiência pode ultrapassar os 95%, especialmente para valores elevados de potência. Com isso tem-se uma eficiência energética, para este tipo de veículo, muito maior que a eficiência dos veículos com MCI. Isto acontece pois a CaC do tipo PEMFC, com eficiência entre 40 a 50% e motores elétricos com eficiência entre 90 a 95% compõe uma eficiência global em torno de 43%, enquanto que a mesma eficiência para um veículo com MCI está em torno de 20 a 25%, isto é, a metade da eficiência de um veículo a CaC.

4.2. Barreiras para a utilização de Células a Combustível em Automóveis

Vários obstáculos deverão ser superados para o início da produção de veículos em larga escala e a subsequente substituição do motor tradicional por esta nova tecnologia. Será necessário superar obstáculos tecnológicos, econômicos, governamentais e do próprio mercado consumidor que terá sua cultura modificada pela introdução desse novo conceito tecnológico (HERNANDEZ, 2004). As barreiras tecnológicas são listadas a seguir:

A Célula a Combustível mais utilizada, a PEMFC, ainda não apresenta propriedades técnicas satisfatórias, as questões de aumento da durabilidade e redução do custo ainda são as grandes dificuldades para a utilização das células a combustível de modo comercial. Quatro são as dificuldades para a aplicação da PEM: grande quantidade de platina utilizada, aumento da potência das células, durabilidade e a produção em massa dessas células e de todos os componentes utilizados em seu funcionamento.

- O armazenamento do hidrogênio ainda é um problema a ser enfrentado devido a grande dificuldade de armazenamento do hidrogênio líquido, que deve ser mantido a temperaturas impraticáveis (-253°C) para um sistema móvel, como é o caso dos veículos automotores. Portanto, as linhas de pesquisa estão seguindo para o armazenamento do hidrogênio comprimido, utilizando vasos de pressão com altíssima qualidade e, assim, diminuindo o risco de incidentes com o hidrogênio.

- A produção do hidrogênio ainda é um grande problema para o uso contínuo das células a combustível; os processos desenvolvidos até o momento não são viáveis, seja por seu alto custo ou por seu alto grau de poluição. Novos processos deverão ser estudados para viabilizar o uso do hidrogênio em larga escala.

Tecnicamente, ainda existem outras barreiras para a aplicação da CaC em automóveis, como por exemplo a tecnologia de reformadores, baterias, capacitores, motores, enfim, muitos outros componentes que são utilizados em um veículo híbrido, ou de célula a combustível.

5. Análises de condições futuras para a aplicabilidade de Células a Combustível em automóveis

O estudo de cenários consiste em uma conexão da atualidade com uma descrição de um futuro específico. O estudo de um cenário futuro é caracterizado por uma descrição plausível de como um determinado ambiente poderia se apresentar. Portanto, é um estudo da probabilidade de determinadas previsões ocorrerem, baseado em tendências tecnológicas e de mercado.

O sistema global na aplicabilidade de Células a Combustível em automóveis pode ser subdividido em diversas variáveis, sejam elas quantificáveis ou não com o intuito de se ter uma visão global do sistema como um todo (RIBEIRO, 1997). As diversas variáveis desse sistema podem ser trabalhadas de forma a se obter um gráfico de relação de forças, conforme observado na figura 4.

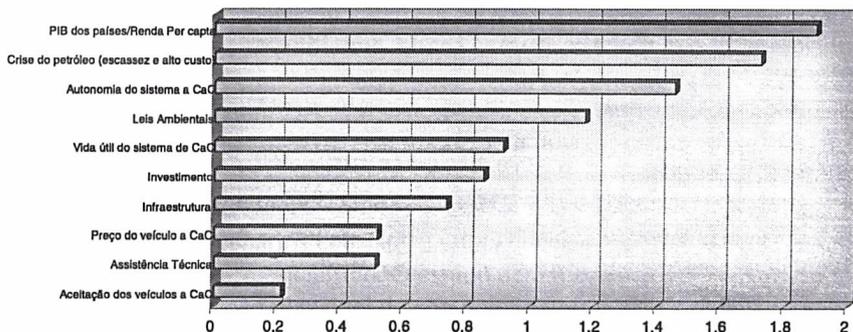


FIGURA 4. Relação de forças entre as variáveis do sistema CaC - Automóvel.

O sistema CaC - automóvel pode então ser dividido nas seguintes variáveis, a serem discutidas a seguir:

1. PIB / renda per capita: considera-se que países que possuam maior capacidade de investimentos, estariam na vanguarda da implementação do sistema;
2. crise do petróleo: com a crise do petróleo, a aplicação de CaC deverá ser antecipada;
3. autonomia do sistema CaC: os automóveis a CaC possuem uma autonomia muito baixa, isso dificulta a inicialização desse sistema;
4. leis Ambientais: com a rigidez das novas normas ambientais os sistemas MCI podem ter um agravante na sua continuidade como propulsor nos automóveis;
5. vida útil do sistema CaC: as Células a Combustível ainda possuem uma vida útil muito abaixo do necessário para sua aplicação em automóveis, e possuem também um alto custo de manutenção;

6. investimento: o investimento em P&D nessa tecnologia é outro fator importante para sua viabilidade;
7. infraestrutura: a criação de uma rede de postos de abastecimento é de vital importância para a aplicação da CaC;
8. preço do veículo a CaC: redução do custo inicial de um veículo CaC;
9. assistência técnica: criação de uma rede de assistência técnica, com mão-de-obra especializada;
10. aceitação dos veículos CaC: aceitação da tecnologia pelos consumidores.

O relacionamento de forças classifica as variáveis que possuem maior influência sobre as demais, ou seja, indica qual é a variável de maior peso no sistema. Nessa relação de forças, as variáveis PIB e crise do petróleo merecem destaque em consequência da fraca ou nenhuma dependência que apresentam relativamente aos demais atores, sendo considerados os atores-chave (ARCADE, 2002).

Pode-se identificar a estabilidade das relações entre variáveis através do posicionamento dessas no Plano de Influência / Dependência (PERESTRELO, 2000).

O sistema é considerado estável se houver simultaneamente variáveis muito influentes e pouco dependentes e variáveis muito dependentes e pouco influentes. É considerado instável se suas variáveis não possuírem influência sobre as demais.

O indicador de estabilidade pode variar de 0 até 100%, sendo que:

- $H \cong 0\% \Rightarrow$ situação instável, pois as variáveis são simultaneamente muito influentes e muito dependentes;
- $H \cong 100\% \Rightarrow$ situação estável, pois as variáveis ou são muito influentes ou muito dependentes;

No caso do sistema considerado, o indicador de estabilidade é de 30%, o que sugere que as variáveis em análise são muito influentes e muito dependentes ao mesmo tempo, o que significa que nenhuma variável isolada possui o poder de definir a direção a ser seguida.

5.1 Análise de Cenários – uma visão nacional

Em uma análise de cenários, seria possível fazer muitas considerações e análises que levariam a infinitas possibilidades dentro de um universo real. Os cenários propostos neste artigo levam em consideração a opinião de alguns dos maiores especialistas na área de Células a Combustível no Brasil, opiniões essas, levantadas através de questionário específico e analisadas dentro do contexto brasileiro.

Serão propostos dois cenários, sendo um otimista em relação a aplicação das Células a Combustível em automóveis e outro pessimista, sendo que muitas análises intermediárias podem ser extraídas desses dois cenários que se encontram em extremos opostos.

5.1.1 Cenário Otimista

Para a elaboração deste cenário, foram considerados os seguintes fatores:

1 – Segundo os especialistas consultados, a crise do petróleo deverá ocorrer entre 10 e 25 anos. Deve-se considerar que, em um ambiente nacional o hidrogênio será produzido a partir de derivados do petróleo ou de outros combustíveis já existentes, como o etanol e o metanol, processos esses que possuem um custo de obtenção do hidrogênio mais baixo.

2 – Ainda serão necessários mais de 10 anos de Pesquisa e Desenvolvimento na área de CaCs para a introdução dessa tecnologia no mercado mundial. Portanto, esta tecnologia se tornará competitiva somente após 2015.

3 – A tecnologia CaC terá um futuro promissor, e terá todos os objetivos, necessários para sua implementação atendidos.

4 – Foram consideradas projeções da General Motors de produção mundial em 2010 de 40 mil veículos CaC, sendo que a tecnologia ainda deverá tardar alguns anos e terá seu início apenas em 2015 (THOMAS, 2002), conforme hipótese 2.

5 – Projeção de crescimento de 2,5% ao ano nas vendas de automóveis a partir de 2005, segundo estimativa da H2Gen, em estudo prospectivo a nível mundial (THOMAS, 2002). Em um cenário nacional pode-se observar a tendência de crescimento na produção de veículos na figura 5, conforme dados da ANFAVEA.

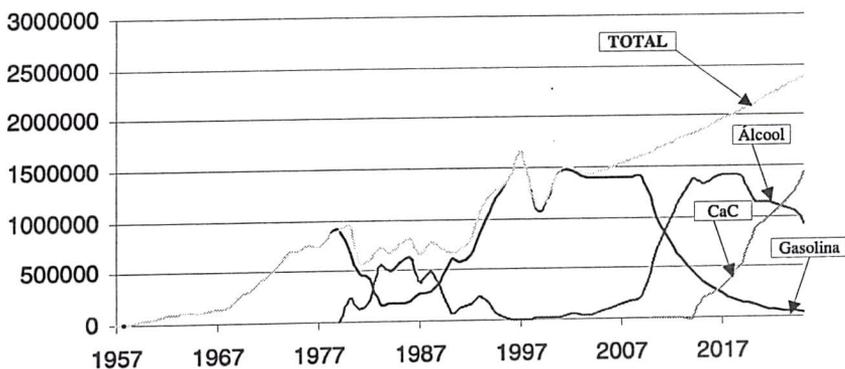


FIGURA 5. Projeção de vendas de veículos CAC em um cenário otimista (nacional).

5.1.2 Cenário Pessimista

Nesse cenário, é considerado um ambiente pessimista em que o principal agente ativador também é a crise do petróleo, porém não haverá tempo hábil para o desenvolvimento das Células a Combustível. Em um cenário nacional, o substituto para o combustível derivado do petróleo seria o etanol e não haveria a introdução em larga escala do veículo movido com Célula a Combustível. Nesse caso, essa tecnologia não teria um futuro no Brasil.

Na figura 6, é mostrado um cenário nacional para os veículos a CaC e com a crise do petróleo ocorrendo dentro de 5 anos. Dentro do contexto, teríamos a inversão das vendas de veículos a gasolina por veículos a etanol, sem a inclusão no mercado de veículos com tecnologia CaC.

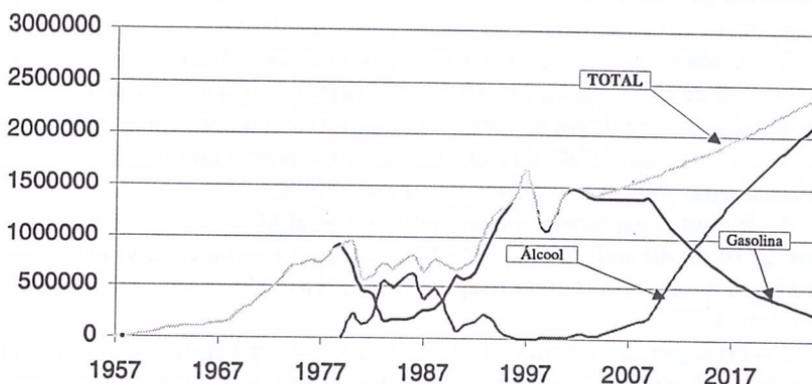


FIGURA 6. Projeção de vendas de veículos em um cenário pessimista (nacional).

Segundo os especialistas entrevistados, este é um cenário que dificilmente ocorrerá, sendo que a tecnologia das CaC provavelmente terá um futuro promissor e ocupará seu espaço no mercado mundial.

6. Conclusões

Um novo conceito relacionado a geração de energia em âmbito mundial está sendo estabelecido. A tecnologia das células a combustível está se tornando mais popular e comercialmente viável à medida que crescem os problemas técnicos, ambientais e comerciais em virtude da utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia. O aquecimento global, a escassez e alto custo do petróleo, provável crise energética, falência dos recursos naturais, leis ambientais mais rigorosas, entre outras, são exemplos destes problemas e que colocam “em cheque” a tecnologia usada atualmente, fazendo com que governos e empresas privadas invistam no desenvolvimento de novas fontes

e formas de energia, como é o caso da tecnologia das células a combustível e, mais especificamente, no trabalho apresentado, a utilização desta tecnologia em veículos de passeio como um sistema de propulsão alternativo em substituição aos atuais veículos com motor de combustão interna.

Depois de todos os estudos técnicos, comerciais e ambientais, das variáveis levantadas e analisadas, do estudo prospectivo de viabilidade técnica e comercial, e a consulta aos especialistas mais renomados do Brasil, com relação à implantação dos veículos a Célula a Combustível, cabe-nos aguardar que as previsões otimistas feitas neste artigo venham realmente a se concretizar, e, com isso, a população mundial possa desfrutar de uma melhor qualidade de vida, tanto com relação à tecnologia utilizada, quanto dos benefícios ambientais que com certeza o emprego desta tecnologia trará.

7. Referências Bibliográficas

ARCADE, Sirius et al. **Structural Analysis with the MICMAC Method & Actors Strategy with MACTOR Method.** 2002.

AUSUBEL, Jesse H. **Where is the Energy Going?** The Industrial Physicist. Fevereiro de 2000.

COLUMBIA UNIVERSITY PRESS. "Hidrogênio", **Enciclopédia Columbia**, 6ª ed. 2001.

GEIGER, Stefan. **Fuel Cell Today. Fuel Cells in Brazil – A Survey of Current Developments**, 2003.

HAMADA, A., SUSAI, H., KAWAKAMI, A.. **Development of a 1 KW PEM Fuel Cell Power Source.** Fuel Cells Bulletin, nº 29, p.7-11, fev. 2001.

HERNANDEZ, Hector (editor). **Potencial do Uso do Hidrogênio para Transporte ao Longo do Tempo.** Comissão Europeia - Instituto para Estudos de Prospecções Tecnológicas, 2004.

LEIBY, Paul N., RUBIN, Jonathan. **Estudo da Transição dos Combustíveis Utilizados em Veículos**, 2002.

OGDEN, Joan M., KREUTZ, Thomas G, STEINBUGLER, Margaret M. **Fuel for Fuel Cell vehicles.** Center for Energy & Environmental Studies, Princeton University – USA – janeiro de 2000.

PERESTRELO, M., CALDAS, José M. C. **Instrumentos de Análise para o Método dos Cenários.** DINAMIA – Centro de Estudos sobre a Mudança Socioeconômica. Março de 2002.

RIBEIRO, José Manuel Felix. **Prospectiva e Cenários – Uma Breve Introdução Metodológica.** Lisboa, 1997.

RIFKIN, Jeremy. **A Economia do Hidrogênio**. M. Books, 2003.

THOMAS, Sandy. **Hydrogen and Fuel Cells: Pathway to a Sustainable Energy Future**. H. Gen Innovations Inc. EUA, 2002.

VIEIRA, Leociléia Aparecida. **Projeto de Pesquisa e Monografia: O que é? Como se faz?**: Normas da ABNT / Leociléia Aparecida Vieira. 2.ed. ver.- Curitiba: Ed. do Autor, 2004.

YACOBUCCI, Brent D., CURTRIGHT, Aimee. **A Hydrogen Economy and Fuel Cells: An Overview**. In: Congressional Resaearch Service, 1. R. do Congresso, 2004.

8. Nota de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste artigo.