

# **ANÁLISE DA POTÊNCIA CONSUMIDA POR UM VEÍCULO ELÉTRICO A CÉLULAS A COMBUSTÍVEL (FCEV) UTILIZANDO CICLOS DE TESTE PADRÃO**

## **Brandão, Mauricio Oliveira**

COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Mecânica, Av Brigadeiro Trompowysk s/n - Centro de Tecnologia, Bloco G sala G-204, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2562-8388, fax (21) 2562-8383, e-mail: [homer@ufrj.br](mailto:homer@ufrj.br)

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Av Um s/n, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2598-6068, e-mail: [homer@cepel.br](mailto:homer@cepel.br)

## **Santos, Bruno Cardoso**

COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Mecânica, Av Brigadeiro Trompowysk s/n - Centro de Tecnologia, Bloco G sala G-204, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2562-8388, fax (21) 2562-8383, e-mail: [bcsantos@ufrj.br](mailto:bcsantos@ufrj.br)

## **Dutra, Max Suell**

COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Mecânica, Av Brigadeiro Trompowysk s/n - Centro de Tecnologia, Bloco G sala G-204, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2562-8388, fax (21) 2562-8383, e-mail: [max@serv.com.ufrj.br](mailto:max@serv.com.ufrj.br)

## **Almeida, Silvio Carlos Aníbal**

PEM/UFRJ – Programa de Engenharia Mecânica, Av Brigadeiro Trompowysk s/n - Centro de Tecnologia, Bloco G sala G-204, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2562-8388, fax (21) 2562-8383, e-mail: [silvio@serv.com.br](mailto:silvio@serv.com.br)

**Resumo.** *As células a combustível se destacam por apresentarem um elevado rendimento e baixo nível de emissões. O desenvolvimento dessa tecnologia apresenta grande interesse a nível mundial, pois sua utilização em veículos é uma das soluções mais promissoras para diminuir os efeitos da poluição nos grandes centros urbanos, embora seu elevado custo ainda limite a aplicação desses dispositivos a campos específicos.*

*A tendência mundial dos carros a células a combustível em desenvolvimento é o uso integrado de um empilhamento de células do tipo PEM (Proton Exchange Membrane) e um acumulador de energia, seja ele um supercapacitor ou mesmo um banco de baterias.*

*Pode-se determinar a potência requerida por um veículo a partir de potências parciais as quais se devem cada tipo de evento sofrido pelo mesmo. Assim obtém-se um modelo para a potência consumida pelo veículo. Esse consumo, associado ao seu respectivo rendimento, permite que, a partir de uma trajetória qualquer, se determine a potência necessária ao veículo. Dessa avaliação pode-se estudar a melhor forma de se aproveitar a potência fornecida pela célula e pelo acumulador.*

*Este trabalho apresenta a estratégia de controle, desenvolvido a partir do modelo cinemático do veículo, que permite determinar a potência consumida, objetivando aumentar sua autonomia. O estudo*

*previne a descarga completa do acumulador evitando a falta da reserva de potência necessária em situações adversas como ultrapassagens e fortes arrancadas.*

**Palavras-chave:** *Células a Combustível, Fuel Cells, Veículos Elétricos, Modelagem de Veículos.*

## 1. INTRODUÇÃO

As células a combustível se destacam como uma fonte de energia promissora seja para aplicações de pequena ou grande escala. O destaque se deve à sua modularidade e alta energia específica. Em particular, a indústria automobilística vem impulsionando o desenvolvimento de tecnologias que viabilizem o carro elétrico. Tal interesse é devido às crescentes preocupações com o meio ambiente, onde a qualidade do ar respirado é muito valorizada. Os veículos elétricos apresentam uma alternativa para os altos níveis de emissões verificados nos carros com motores de combustão interna. As células a combustível por possuírem energia específica maior do que as baterias comumente utilizadas em veículos elétricos fazem com que o carro elétrico à célula a combustível seja escolhido.

Visando uma alta eficiência do sistema de geração de energia elétrica produzido por uma célula a combustível, é necessário se determinar qual a potência necessária para que um veículo seja capaz de executar as tarefas normais de um veículo atual.

Um veículo de passeio opera na maior parte do tempo abaixo de sua potência máxima. Alguns sistemas de veículos a célula a combustível regulam essa potência variando o fluxo dos gases provocando assim a queda ou aumento da potência gerada. A outra solução, e adotada nesse estudo, é estabelecer um sistema híbrido célula a combustível e acumulador, onde a célula a combustível produz sempre a mesma potência e tal potência é gerenciada de forma otimizada. Para tal é importante se determinar a potência suficiente para realizar a grande maioria das ações e situações a que o veículo é submetido.

## 2. CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

### 2.1. Definição e Características

As células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química de uma reação de oxi-redução entre o hidrogênio e o oxigênio, diretamente em energia elétrica.

Suas estruturas básicas são o catodo anodo e eletrólito. O catodo é o pólo positivo, onde o oxigênio sofre redução, o anodo é o pólo negativo onde o hidrogênio sofre oxidação e o eletrólito é o meio que conduz os íons de um pólo ao outro. Externamente à célula verifica-se uma corrente devido à diferença de potencial entre os pólos. Na Fig. (1) pode ser visto um esquema de funcionamento de uma célula a combustível.

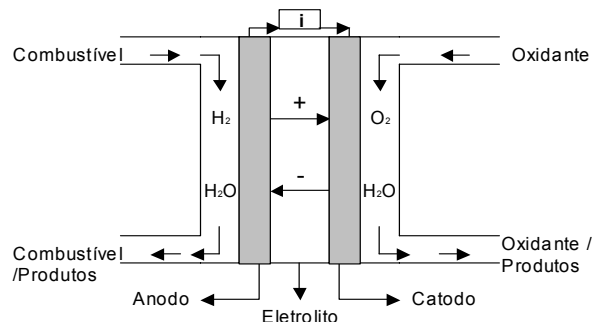


Figura 1. Esquema de funcionamento de uma célula a combustível

A classificação das células a combustível é feita principalmente com referência ao tipo de eletrólito usado. O tipo mais pesquisado para aplicações automotivas é a célula a combustível de membrana polimérica - PEMFC (*Proton Exchange Membrane*) - que é uma membrana ácida de troca protônica. Esse tipo de célula tem temperatura de operação de 70°C e é bem compacta.

O empilhamento (*Stack*) é caracterizado pela ligação em série de várias células a combustível. O potencial resultante é a soma dos potenciais de cada célula.

### 3. ACUMULADORES

Os acumuladores são fundamentais para os sistemas de células a combustível. Primeiramente porque as células a combustível têm uma temperatura ótima de funcionamento. Essa temperatura ótima é onde o rendimento de conversão da célula é máximo. Sendo assim, é muito interessante que a célula já comece a funcionar estando em sua temperatura ideal. Para tal o papel dos acumuladores é fundamental.

Além de servir como sistema para inicialização da pilha a combustível os acumuladores podem trabalhar em conjunto com a célula a combustível formando um sistema híbrido célula/acumulador. Isso é possível dado que um veículo não utiliza sua potência máxima a todo instante. Somente em situações muito adversas como subidas muito íngremes e acelerações muito bruscas o valor da potência consumida pode atingir o seu máximo.

Como o custo das células a combustível está diretamente relacionado a potência gerada por ela, a possibilidade de se ter uma unidade de menor potência pode minimizar o custo do sistema.

Quando citado o acumulador tenta-se abordar o sistema de armazenamento de energia não sendo explicitado qual seria melhor. Mesmo assim alguns pontos podem ser esperados de um acumulador para que este seja bem adaptado a esse sistema híbrido. Tais características seriam as mesmas que fazem da célula a combustível um dispositivo interessante para aplicações veiculares, como menor peso, maior densidade energética, menor volume e resposta rápida.

### 4. MODELO VEICULAR

A potência requerida por um veículo pode ser definida por suas ações e perdas. A partir desse modelo simples é possível avaliar e dimensionar a potência esperada do módulo de potência do veículo.

A potência de tração pode ser definida como uma soma das seguintes parcelas como mostrado na Eq. (1).

$$P_{tração} = P_{cinética} + P_{potencial} + P_{pneus} + P_{aero} \quad (1)$$

#### 4.1. Energia Cinética

A potência consumida por um veículo devido a aceleração pode ser representada pela variação de energia cinética como mostrado em Eq. (2).

$$P_{cinética} = \frac{d(KE)}{dt} = Mva \quad (2)$$

#### 4.2. Energia Potencial

Quando um veículo sobe uma ladeira uma diferença de energia potencial é verificada. Para executar tal tarefa, é necessário um aumento de potência. Tal contribuição pra a potência total consumida pode ser modelada a partir da Eq. (3).

$$P_{potencial} = \frac{d(PE)}{dt} = Mgv \sin \theta \quad (3)$$

#### 4.3. Atrito de Rolamento

A potência consumida pelo atrito de rolamento depende de uma constante, determinada experimentalmente, representada na Eq. (4).

$$P_{rol} = CrMgv \quad (4)$$

#### 4.4. Arrasto Aerodinâmico

O arrasto aerodinâmico é variável para cada veículo, mas um estudo qualitativo pode ser feito supondo uma área frontal média. A partir desta aproximação a Eq. (5) representa a contribuição desta parcela no valor da potência total.

$$P_{aero} = \frac{\rho C_d A (v + w)^2 v}{2} \quad (5)$$

#### 4.5. Potência Total

Assume-se que para um veículo médio de passageiros o sistema elétrico e os acessórios consomem, juntos, uma potência máxima de 5kW segundo Dircks (1988). Ainda é necessário adicionar a eficiência de cada parcela que segundo Dircks (1988) teria um valor global igual à 85%. Dessa forma a potência total pode ser obtida da forma mostrada na Eq. (6).

$$P_{total} = \frac{P_{tracao}}{\mathcal{E}_{total}} + P_{access} \quad (6)$$

### 5. CICLOS DE TESTES PARDONIZADOS

Uma maneira muito utilizada de se prever o comportamento de um veículo é fazer o teste em dinamômetros. Para isso utilizam-se algumas condições e ações no teste reunidas no que se chama de ciclo de teste (*driving schedule*). Existem normas para esses testes e ciclos padrão. O ciclo padrão utilizado neste estudo foi o EPA – UDDS do *United States Enviromental Protection Department*. O ciclo fornece os valores da velocidade contra o tempo. A Fig. (2) mostra o ciclo padrão.

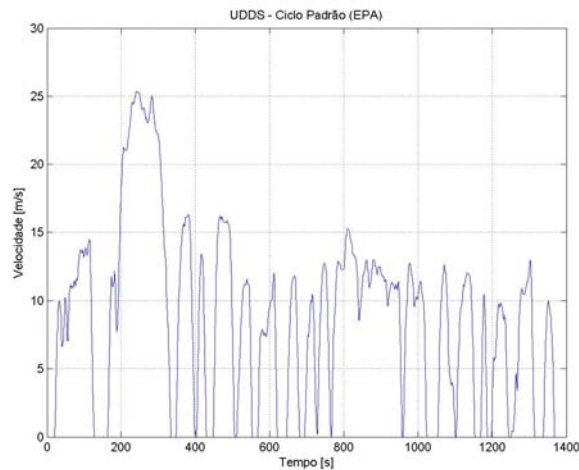


Figura 2. Ciclo de teste padrão.

## 6. ANÁLISE GRÁFICA

Após a discriminação de cada parcela e da determinação do ciclo, pode-se então simular o comportamento da potência consumida pelo veículo. Para tal é necessário determinar o valor de certas constantes, como listado na Tab. (1).

Tabela 1. Valores das variáveis adotadas no trabalho.

Variável	Valor	Unidade [SI]
A	2.2	[m <sup>2</sup> ]
Cd	0.3	adimensional
Cr	0.01	adimensional
g	9.8	[m/s <sup>2</sup> ]
M	1000	[kg]
$\rho$	1.17	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	$0 - \pi/6$	[rad]

O ciclo de teste padrão UDDS supõe que o terreno é plano, que não há vento. A aceleração é tirada a partir do próprio gráfico do ciclo. As seguintes relações podem ser expressas segundo Eq. (7), Eq. (8) e Eq. (9).

$$a(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (7)$$

$$w = 0 \quad (8)$$

$$\theta = 0 \quad (9)$$

Aplicando todas essas hipóteses no cálculo da potência tem-se o gráfico da potência consumida durante o ensaio a qual está representada na Fig. (3).

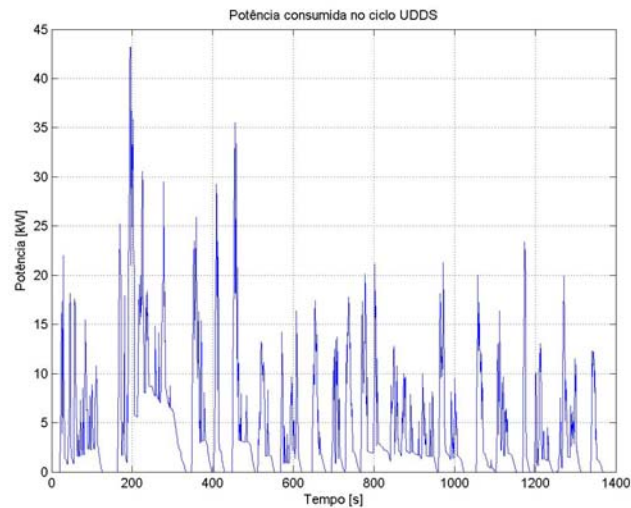


Figura 3. Variação da potência consumida no ciclo padrão.

A situação mostrada na Fig. (3), representa uma situação muito confortável para o veículo uma vez que a maior parcela é devido à aceleração. A influência de cada parcela pode ser vista na Fig. (4).

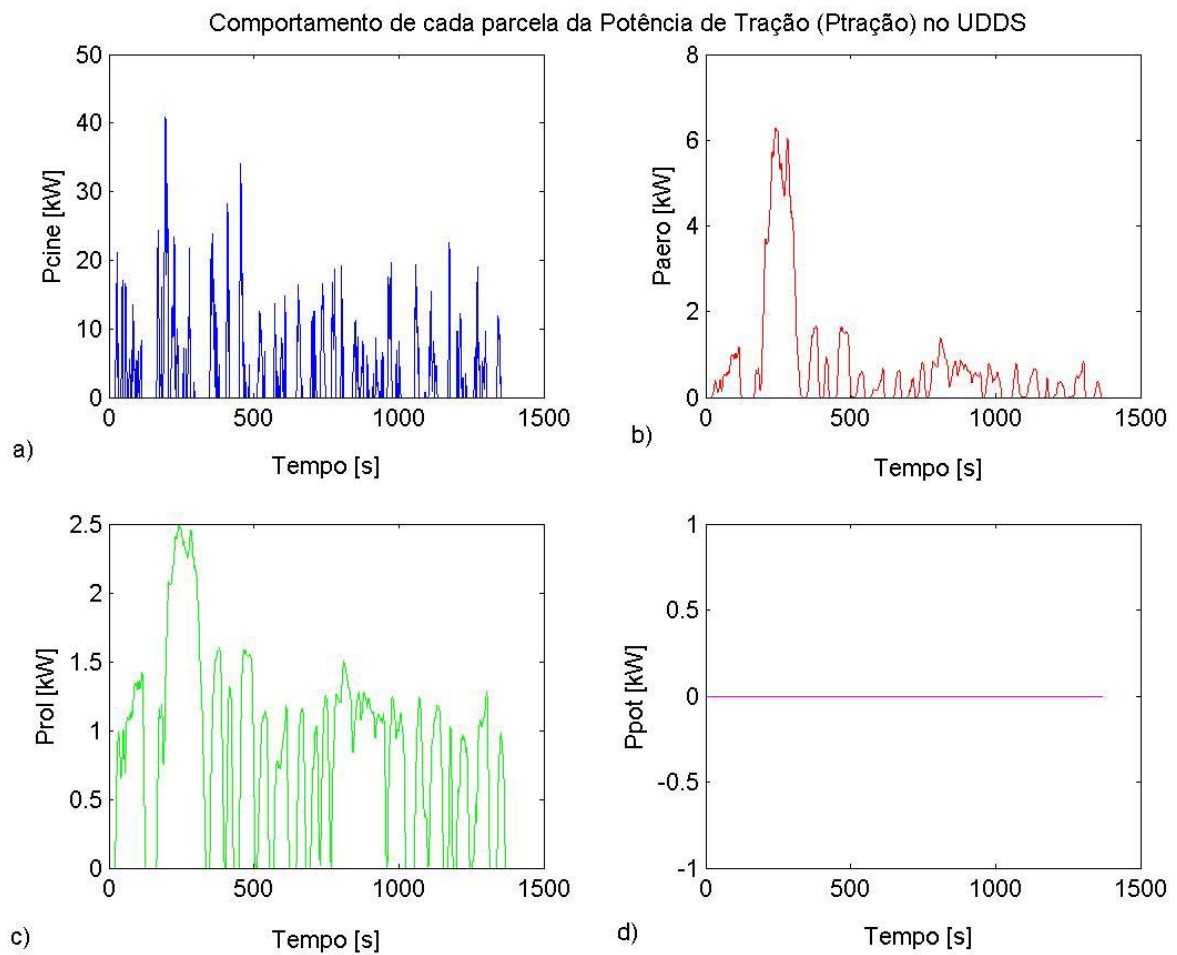


Figura 4. Comportamento de cada parcela da Potência de Tração no ciclo UDDS.

A situação real dos veículos não segue, em grande parte dos casos, as hipóteses feitas nesse ensaio, pois existem subidas e vento. Neste caso há a necessidade de avaliar-se o impacto de tais eventos na potência consumida.

Para tal foi feito uma segunda avaliação com outras hipóteses expressas respectivamente nas Eq. (10) e Eq. (11).

$$w = 20m/s \quad (10)$$

$$\theta = \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{9} rad \quad (11)$$

Aplicando essas novas hipóteses no cálculo da potência tem-se o novo gráfico da potência consumida durante o ensaio a qual está representada na Fig. (5-b). Em consequência dessas novas hipóteses a potência máxima exigida subiu de 43kW para 79kW, como visto na Fig. (5-a) e na Fig. (5-b).

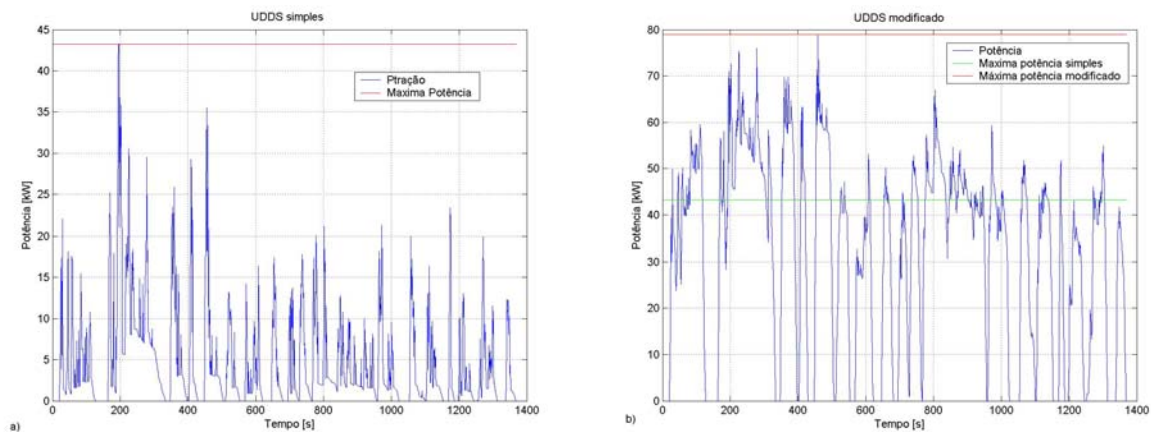


Figura 5. Comparação entre o ciclo original e o modificado.

A grande mudança nessa nova situação se dá principalmente pela grande influência da parcela devido a diferença de energia potencial, ou seja, devido às subidas. Uma correção nos valores de inclinação foi feita para a região onde a velocidade era máxima. Nesse caso o ângulo foi reduzido em 50% pois é contracenso ter-se a maior velocidade na maior inclinação. Para tais situações temos o comportamento de cada parcela mostrado na Fig. (6).

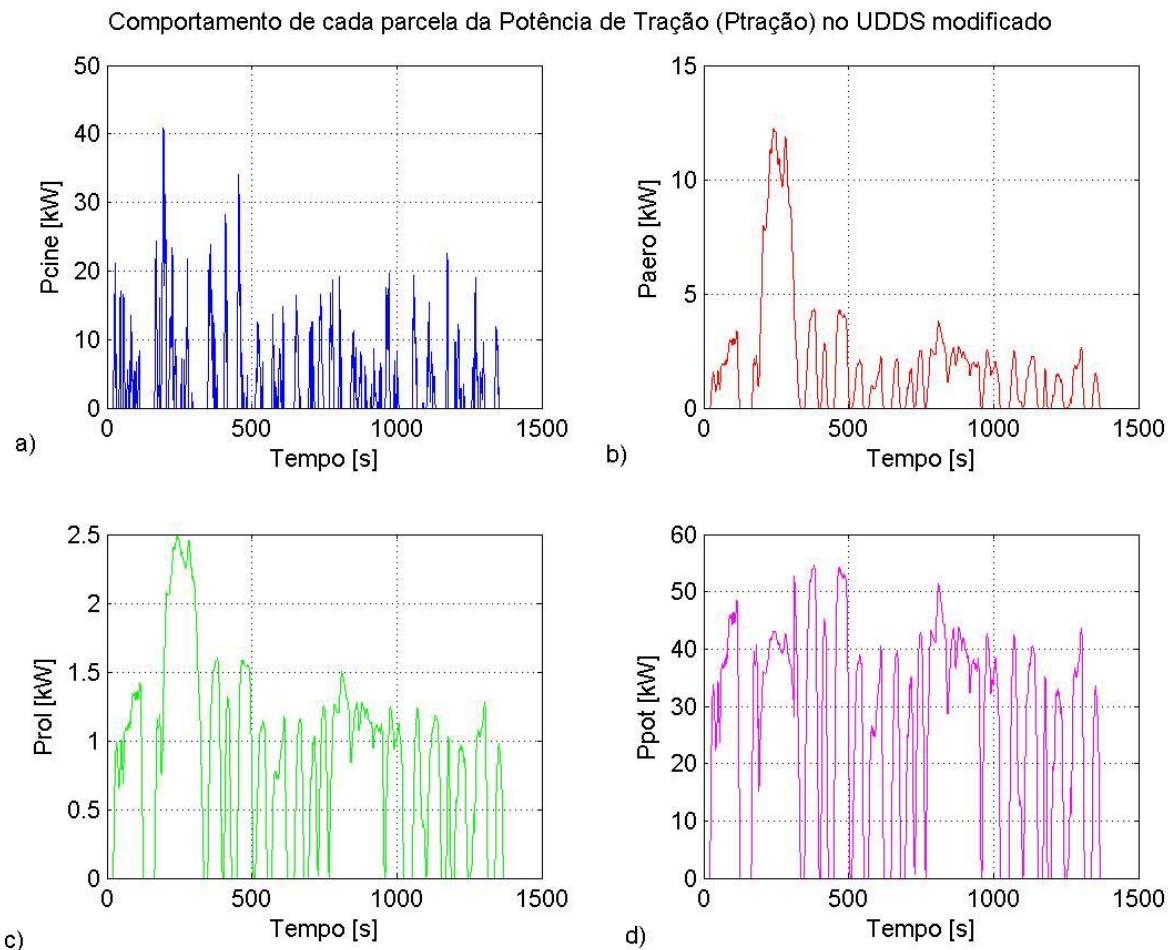


Figura 6. Comportamento de cada parcela no ciclo UDDS modificado.

## 7. CONCLUSÃO

Ao avaliar graficamente o comportamento da potência pode-se prever que a potência de 50kW seria necessária para suprir as necessidades do veículo. Porém uma vez que seja levada em consideração situações mais severas como subidas e vento na pista, a potência necessária deve ser aumentada, sendo então necessários 79kW para o veículo.

Tal relação permite um sistema híbrido de uma célula a combustível e um acumulador no qual a célula seria responsável por 50kW e o acumulador por 30kW. Tais valores seriam gerenciados segundo a necessidade do veículo. Caso ele estivesse numa situação simples de cruzeiro, a célula a combustível seria suficiente para as necessidades. Já caso ele estivesse passando por situações mais severas, o acumulador forneceria a potência extra necessária.

Como em situação de cruzeiro a célula produziria constantes 50kW, e apenas cerca de 43kW estariam sendo consumidos, restaria a diferença de 8kW de potência para ser gasto na recarga do acumulador.

Um sistema de controle poderia ser adaptado verificando o nível de carga da bateria e indicando ao motorista a possibilidade ou não de se ter uma potência a mais. Um indicador no painel faria tal função.

No futuro é bem possível que os acumuladores sejam para os carros a célula a combustível como são as baterias para os veículos de motores de combustão interna. Porém, devido ao alto custo associado às células a combustível, um sistema híbrido de células a combustível com acumuladores parece ser a realidade dos próximos anos.



## **8. AGRADECIMENTOS**

Programa de Engenharia Mecânica da UFRJ  
CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica  
Engenheiro Tadeu Cordeiro - CENPES - PETROBRÁS

## **9. REFERÊNCIAS**

- Brandão, M.O, Almeida, S. C. A, 2002, Direct Oxidation Fuel Cells, Proceedings of the Young Scientist Prize – Electric Energy – Generation, Transmission and Rational Use.
- Lamy, C., Lima, A., LeRhun, V., Delime, F., Coutanceau, C., Léger, J., 2001, Recent Advances in the development of direct alcohol fuel cells (DAFC), *Journal of Power Sources*.
- Orel, B., 2001, Proton-conducting sol-gel hybrids containing heteropoly acids, *Solid State Ionics*.
- Dircks, K., 1998, Recent advances in fuel cells for transportation application, EVS15, Brussels
- Williams, K.R., 1966, An introduction to fuel cells, Elsevier.

## **10. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

## FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE (FCEV) POWER CONSUMPTION ANALISYS USING STANDARD DRIVING SCHEDULE

### **Brandão, Mauricio Oliveira**

COPPE/UFRJ – Mechanical Engineering Program, Av Brigadeiro Trompowysk s/n - Centro de Tecnologia, Bloco G sala G-204, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2562-8388, fax (21) 2562-8383, e-mail: [homer@ufrj.br](mailto:homer@ufrj.br)

CEPEL – Electric Power Research Center – Av Um s/n, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21)2598-6068, e-mail: [homer@cepel.br](mailto:homer@cepel.br)

### **Santos, Bruno Cardoso**

COPPE/UFRJ – Mechanical Engineering Program, Av Brigadeiro Trompowysk s/n - Centro de Tecnologia, Bloco G sala G-204, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2562-8388, fax (21) 2562-8383, e-mail: [bcsantos@ufrj.br](mailto:bcsantos@ufrj.br)

### **Dutra, Max Suell**

COPPE/UFRJ – Mechanical Engineering Program, Av Brigadeiro Trompowysk s/n - Centro de Tecnologia, Bloco G sala G-204, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2562-8388, fax (21) 2562-8383, e-mail: [max@serv.com.ufrj.br](mailto:max@serv.com.ufrj.br)

### **Almeida, Silvio Carlos Aníbal**

PEM/UFRJ – Mechanical Engineering Program, Av Brigadeiro Trompowysk s/n - Centro de Tecnologia, Bloco G sala G-204, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, tel (21) 2562-8388, fax (21) 2562-8383, e-mail: [silvio@serv.com.br](mailto:silvio@serv.com.br)

*Abstract. Fuel Cells detach for presenting high efficiency and very low emissions. The development of this technology is of very interesting worldwide, because its utilization on electric vehicles is one of the most promising solutions for lowering the emissions of the greenhouse effect gases in urban centers. Although all this interests the high cost of this technology still limits its application to specific fields.*

*A world tendency of fuel cell vehicles under development is the use of PEM fuel cells together with any kind of energy accumulator such as a pack of batteries or a supercapacitor.*

*The power needed by a vehicle can e defined by its actions and losses. With this simple model its possible to evaluate and size the power expected from the fuel cell module for automotive applications, so the number optimized single cells is determined. Than is possible to develop an strategy for power management from the fuel cell and from the accumulattor*

*This peper presents the strategy of control, developed from the vehicle cinematic model, what makes possible to determine the consumed power, trying to incrase the driving range. The study prevents the accumulator complete discharge, avoiding the lack of reserve power, this last one, necessary in many adverse situations.*

*Keywords: Fuel Cells, Electric Vehicle, Vehicle Modeling.*