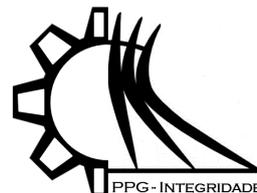




ISSN 2447-6102



Artigo

# Gerenciamento de potência para veículos elétricos híbridos de célula a combustível

Revoredo, T.C.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro; teorevored@uerj.br

\* Correspondence: teorevored@uerj.br

Received: 06/11/2020; Accepted: 05/11/2020; Published: 31/12/2020

**Resumo:** Os sistemas de transporte estão mudando. Veículos convencionais propelidos por motores de combustão interna estão perdendo espaço para veículos propelidos por fontes alternativas de energia devido a fatores ambientais e políticos em todo o mundo. Os veículos de células de combustível figuram como uma das principais alternativas aos veículos convencionais, à medida que novas tecnologias os tornam mais viáveis comercialmente. Nesse contexto, este trabalho apresenta algumas estratégias de gerenciamento de potência aplicáveis a veículos elétricos híbridos de células a combustível com base em um modelo dinâmico, que permite a avaliação de desempenho e a comparação com veículos movidos por motores de combustão interna. O modelo inclui uma pilha de células de combustível, baterias, um motor de indução e a dinâmica do veículo. As reações do motorista são emuladas através de um controlador PI, o motor elétrico é controlado por um algoritmo de modos deslizantes e o gerenciamento de potência é realizado sujeito a restrições tais como a eficiência das células a combustível e o estado de carga das baterias. O consumo de energia é comparado com veículos leves semelhantes de motores de combustão interna. Os resultados demonstram o menor consumo de combustível do veículo de célula a combustível se comparado a veículos convencionais e comprovam o melhor desempenho da configuração híbrida. Além disso, validam a utilidade do modelo para simular veículos elétricos híbridos e investigar diferentes estratégias de controle para obter melhor desempenho.

**Keywords:** Veículos híbridos de célula a combustível, gerenciamento de potência, consumo de combustível equivalente.

## Power management for fuel cell hybrid vehicles

**Abstract:** Transportation systems are changing. Vehicles propelled by alternative energy sources are closing the gap to conventional vehicles propelled by internal combustion engines due to environmental and political factors worldwide. Fuel cell vehicles stand as one of the main alternatives to conventional vehicles, as new technologies are turning them into a more commercially viable option. In such context, this work presents a few power management strategies applicable to fuel cell hybrid electric vehicles based on a dynamical model which allows performance evaluation and comparison to vehicles propelled by internal combustion engines. The model comprises a fuel cell stack, batteries, an induction motor and the vehicle's dynamics. The driver's reactions are emulated through a PI controller, a sliding mode algorithm controls the electric motor and the power management is performed subject to restrictions such as fuel cell efficiency and batteries state of charge. Energy consumption is compared with internal combustion engine lightweight vehicles. The results show lower fuel consumption of the fuel cell vehicle configuration when compared to conventional vehicles and proves the better performance of the hybrid vehicle. In addition, they validate the model's usefulness to emulate hybrid electric vehicles and investigate different control strategies for better performance.

**Keywords:** Fuel cell hybrid vehicles, power management, equivalent fuel consumption.

## 1. Introdução

Os veículos movidos por motores de combustão interna estão com os seus dias contados. Com o aumento das preocupações ambientais e a necessidade de reduzir as mais de  $36 \times 10^9$  toneladas de gás carbônico que são anualmente despejadas na atmosfera (Global Carbon Project, 2018), muitos países estão se planejando e tomando medidas para banir esses que são uns dos principais vilões deste cenário (Willings, 2020), (Coren, 2018). Como principal alternativa para substituí-los, figuram os veículos elétricos, definidos como aqueles que utilizam pelo menos um motor elétrico como elemento de tração, tais como os veículos a bateria (VEBs), os trólebus, os híbridos (VEHs) e os veículos de célula a combustível (VECaCs) (Instituto Nacional de Eficiência Energética, s.d.).

Dentre as diversas opções de veículos elétricos, aqueles propelidos através de energia entregue por uma única fonte, tais como os veículos solares, os VEBs e os trólebus, tendem a apresentar limitações que dificultam o seu estabelecimento como alternativa aos automóveis atuais, como por exemplo, baixa autonomia (VEBs), baixa eficiência em lugares com pouca incidência de luz do Sol (veículos solares) ou dificuldade de implantação da infraestrutura necessária para seu uso (trólebus). Por consequência, o uso de veículos híbridos é uma alternativa mais interessante para o projeto de automóveis de passeio, nos quais diferentes fontes de energia são utilizadas em conjunto, para que supram umas as deficiências das outras. A combinação mais comum atualmente é o emprego de um motor de combustão interna (MCI) em conjunto com um banco de baterias (BB). Entretanto, esta é uma configuração temporária na medida em que os primeiros serão gradativamente eliminados ao longo das próximas décadas. Nesse contexto, o uso de células a combustível está cada vez mais presente, e os avanços tecnológicos vêm acontecendo de maneira a transformar esta alternativa em realidade técnica e comercial.

### 1.2 Gerenciamento de potência em VEHs

A utilização de fontes diferentes de energia em um mesmo veículo demanda uma estratégia de controle que gerencie o funcionamento desses sistemas para melhor desempenho. Um algoritmo que determine a quantidade de potência necessária à uma solicitação do motorista, bem como a divisão adequada dessa potência entre as fontes de energia do sistema implementa o que se define como Estratégia de Gerenciamento de Potência (do inglês, *Power Management*), que pode ser realizada por diferentes abordagens, agrupadas em três categorias: Técnicas heurísticas; Métodos estáticos de otimização e Métodos dinâmicos de otimização.

As técnicas heurísticas tais como lógica fuzzy e controle baseado em regras para o gerenciamento de potência de VEHs são bem exploradas na literatura (Yin, et al., 2019), (Zhou, et al., 2018) e têm a seu favor a facilidade e o baixo custo de implementação, embora geralmente não explorem de maneira completa veículos complexos. Os critérios para a definição das regras são geralmente determinados de maneira intuitiva ou com base na experiência do projetista e não é necessário o conhecimento prévio do ciclo de condução a ser realizado, o que permite implementação em tempo real (Huang, et al., 2018).

Nos métodos estáticos de otimização a potência elétrica é traduzida em uma quantidade equivalente de estados estacionários de consumo de combustível para calcular o custo total. Uma estratégia de controle ótimo determina, então, a divisão apropriada da solicitação de potência entre cada uma das fontes de energia utilizando mapas de eficiência. São, portanto, métodos de otimização instantânea de acordo com as variáveis do sistema em cada instante de tempo, e podem ser aplicados em tempo real. O método mais difundido desta classe é denominado estratégia de minimização do consumo equivalente (ECMS, do inglês *Equivalent Consumption Minimization Strategy*), introduzido inicialmente por (Paganelli, et al., 2001), na ocasião aplicado a um veículo híbrido propelido por um motor de combustão interna (MCI) em conjunto com um BB, e explorado por outros autores posteriormente, em variações que incluem a adaptabilidade do algoritmo, para que estime o consumo equivalente para um trecho do ciclo de condução corrente em tempo real, aplicando-o ao trecho seguinte (Sun, et al., 2015).

Os métodos dinâmicos de otimização consideram a dinâmica do sistema e a otimização passa a ser tratada de acordo com um horizonte de tempo, ao invés de instantes específicos. Embora tenham a capacidade de otimização global, esses métodos têm a desvantagem de dependerem do ciclo de condução e não podem ser implementados em tempo real, sendo geralmente utilizados como parâmetro de comparação para determinação da otimalidade de algoritmos de tempo real (Zhang, et al., 2015).

### 1.3 Veículos de célula a combustível

Dentre as tecnologias de VEs e VEHs existentes atualmente, uma das mais promissoras utiliza CaCs como fonte de energia. Células a combustível são elementos que transformam energia química em energia elétrica e operam com

alta eficiência e baixo ruído, além de possuírem características que tornam atraente sua aplicação em veículos, tais como baixo peso, baixo custo e a possibilidade de desenvolvimento de veículos com boa autonomia. Entretanto, CaCs não são capazes de armazenar energia, o que implica que a maneira mais adequada de aplicá-las em VEs é como uma das fontes de um veículo híbrido, sendo a outra um banco de baterias ou outra tecnologia que permita o armazenamento de energia. Por suas vantagens, as CaCs vêm cada vez mais sendo empregadas no desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos. As principais montadoras de veículos leves já possuem veículos movidos por CaCs em sua gama de produtos há vários anos.

Como em qualquer outro tipo de VEH, nos VECaCs é necessário realizar o gerenciamento adequado de potência para operar a pilha de CaCs e a(s) fonte(s) auxiliar(es) de forma eficiente, alcançando, assim, baixo consumo de combustível (hidrogênio) e manutenção do estado de carga do BB (quando existente) entre limites adequados enquanto satisfazendo a solicitação de potência do motorista. Além disso, há outros desafios a serem superados pelos fabricantes de veículos leves de célula a combustível, tais como: Custo, desempenho, confiabilidade, operação em condições extremas e escolha do combustível (utilização de combustível reformado ou hidrogênio puro). Assim, o estudo de VECaCs têm ganho importância e ainda há muito a ser feito com relação a esta tecnologia. Nesse contexto, este trabalho apresenta um modelo matemático e computacional que permite emular a operação de veículos elétricos híbridos de célula a combustível, além de discutir diferentes estratégias de gerenciamento de potência para o mesmo. O modelo é realizado no ambiente Matlab/Simulink (Mathworks, 2020) e todos os gráficos apresentados como resultados neste trabalho advém deste modelo.

O trabalho é organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta de maneira resumida o modelo dinâmico do veículo e na Seção 3 são discutidas estratégias de controle empregadas para o gerenciamento da potência do mesmo, além de apresentados resultados de simulação que refletem o seu desempenho. Na Seção 4 são realizadas considerações finais sobre o trabalho.

## 2. Modelo Do Veículo Elétrico de Célula a Combustível

### 2.1 Banco de baterias

Baterias são sistemas que convertem energia química em energia elétrica. Em baterias recarregáveis, é possível reverter a reação química por meio da inversão da corrente elétrica, e levar o estado de carga (SOC) da bateria de volta a um determinado valor. Um conjunto de baterias é denominado banco de baterias, e é um componente importante em muitos veículos elétricos, pois, além de compor o sistema de geração de potência, permite o aproveitamento de energia de frenagem, que em áreas urbanas típicas corresponde a mais de 25% da energia total de tração, podendo atingir valores da ordem de 70% em grandes cidades tais como São Paulo (Junior, 2014).

A partir de um tempo de descarga ( $t$ ) e uma capacidade nominal ( $C$ ) especificados, pode-se calcular o tempo de descarga real de uma bateria em função da corrente drenada com base em uma capacidade de carga de referência, denominada Capacidade de Peukert, definida pela Equação (1), na qual  $I_{bat}$  denota a corrente solicitada à bateria e  $k$  é uma constante denominada Coeficiente de Peukert.:

$$C_p = (I_{bat})^k \times t = \left(\frac{C}{t}\right)^k \times t \quad (1)$$

Considerando um intervalo de tempo  $\delta t$ , no qual uma corrente constante,  $I_{bat}$ , é solicitada a bateria, a carga removida da mesma é calculada pela Equação (2) (Larminie & Lowry, 2012).

$$Q_{\delta t} = \delta t \times [I_{bat}]^k \quad (2)$$

Se  $\delta t$  é dado em segundos, a carga total removida da bateria após  $n$  instantes de tempo,  $Q_n$ , em Ah, é dada pela Equação (3).

$$Q_n = Q_{n-1} + \frac{\delta t \times [I_{bat}]^k}{3600} \quad (3)$$

Trata-se de um integrador discreto. Em tempo contínuo, com  $\delta t \rightarrow 0$ , pode-se reescrever esta relação tal como apresentado na Equação (4) que, portanto, descreve a quantidade de carga (energia) que é retirada da bateria em um determinado intervalo de tempo.

$$Q(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} [I_{bat}(t)]^k dt \quad (4)$$

Considerando a razão entre esta energia e a capacidade de carga original da bateria, o estado de carga é encontrado pela subtração deste valor do estado inicial (100%), tal como apresentado na Equação (5).

$$SOC = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{[I_{bat}(t)]^k}{C_p} dt = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{I_{bat}(t)}{C} dt \quad (5)$$

A tensão de circuito aberto ( $E$ ) depende do SOC e do número de células que formam a bateria, sendo calculada por meio da Equação (6) (Larminie & Lowry, 2012).

$$E = n \times [2 + 0.15(SOC)] \quad (6)$$

Por fim, a tensão entre os terminais da bateria pode ser determinada utilizando-se a lei de Ohm, tal como exposto na Equação (7), na qual  $R_{int}$  é a resistência interna, considerada constante em função da capacidade da bateria, e calculada com base na corrente que a descarregaria por completo no decorrer de 10 horas caso fosse aplicada de maneira constante ao longo do tempo ( $I_{10}$ ), de acordo com o apresentado na Equação (7).

$$V = E - R_{int}I = E - n \times \frac{0.022}{I_{10}} I \quad (7)$$

## 2.2 Pilha de células a combustível

Assim como as baterias, as células a combustível (CaCs) são dispositivos que convertem energia química em energia elétrica. Porém, diferentemente das baterias, nas quais a energia máxima disponível é determinada pela quantidade de reagentes armazenados, uma CaC é uma fonte conversora de energia que pode, teoricamente, fornecer energia elétrica por tanto tempo quanto lhe seja fornecido combustível (Wong, et al., 2019). Para tal, um combustível gasoso (geralmente hidrogênio) é constantemente fornecido ao anodo (eletrodo negativo) e um oxidante (oxigênio) ao catodo (eletrodo positivo). O hidrogênio é oxidado no catodo, resultando em um elétron que é conduzido pelo circuito externo, podendo alimentar uma carga, e um próton que é conduzido através do eletrólito. O processo produz energia elétrica, água e calor. A tensão de saída de uma CaC pode ser definida como (N. Mebarki, 2016):

$$V_{FC} = E_{nerst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (8)$$

Na qual  $E_{nerst}$  é a tensão de circuito aberto (potencial termodinâmico) da célula,  $V_{act}$  é a perda por ativação do anodo e do catodo,  $V_{ohmic}$  é a perda ôhmica e  $V_{con}$  a perda resultante do transporte de massa. O potencial termodinâmico é função da temperatura e das pressões parciais de oxigênio e hidrogênio nos canais de entrada da célula, valores estes que não devem variar entre as células de uma mesma pilha.  $E_{nerst}$  é definido pela equação a seguir (Zhao, et al., 2015):

$$E_{nerst} = \frac{\Delta G}{2 \times F} + \frac{\Delta S}{2 \times F} \times (T - T_{ref}) + \frac{R \times T}{2 \times F} \times \left[ \ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \times \ln(P_{O_2}) \right] \quad (9)$$

Nesta,  $\Delta G$  representa a mudança na energia livre de Gibbs, em J/mol,  $F$  é a constante de Faraday (96.487 C),  $\Delta S$  é a variação de entropia (J/mol),  $R$  é a constante universal dos gases (8.314 J/K×mol),  $P_{O_2}$  e  $P_{H_2}$  as pressões parciais de oxigênio e hidrogênio (atm), respectivamente,  $T$  a temperatura de operação da célula a combustível e  $T_{ref}$  a temperatura de referência (25°C).

Na Equação (8),  $V_{act}$  é resultado da lentidão das reações que ocorrem na superfície dos eletrodos, nas quais uma parte da tensão gerada é gasta para conduzir a reação química que transfere os elétrons entre os eletrodos. Esta perda é calculada utilizando-se a Equação (10).

$$V_{act} = -\xi_1 - T(\xi_2 + \xi_3 \ln C_{O_2} + \xi_4 \ln i_{FC}) \quad (10)$$

Na qual  $C_{O_2}$  é a concentração de oxigênio na interface catalítica do catodo ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ), determinado pela Equação (11),  $i_{FC}$  é a corrente elétrica que flui através da CaC, e  $\xi_i$  são coeficientes de parametrização definidos baseados em equações teóricas que levam em consideração fatores termodinâmicos, cinéticos e eletroquímicos (Zhao, et al., 2015).

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \times 10^6 \times e^{\frac{-498}{T}}} \quad (11)$$

A perda ôhmica,  $V_{ohmic}$ , é devida à resistência ao transporte de elétrons do catodo para o anodo, sendo diretamente proporcional a corrente elétrica. Trata-se de uma das principais fontes de perda de energia em células a combustível. Ela é calculada pela Equação (12), na qual  $R_M$  e  $R_C$  são as resistências equivalente da membrana e à transferência de prótons através da mesma, respectivamente,  $A_{fc}$  é a área da CaC,  $\rho_M$  é a resistividade da membrana e  $L$  a sua espessura.

$$V_{ohmic} = i_{FC} \times (R_M + R_C) = i_{FC} \times \left( \frac{\rho_M \times L}{A_{fc}} + R_C \right) \quad (12)$$

Enquanto  $A_{fc}$  e  $L$  são parâmetros dimensionais mensuráveis,  $\rho_M$  é função do tipo e da umidade da membrana, da temperatura de operação e da densidade de corrente. A resistividade da membrana é calculada de acordo com a Equação (13) (Laoun, et al., 2016) para uma membrana do tipo Nafion, largamente utilizada em células de membrana polimérica.

$$\rho_M = \frac{\left[ 1 + 0.03 \left( \frac{i_{FC}}{A_{FC}} \right) + \left( \frac{T}{4887.0968} \right)^2 \left( \frac{i_{FC}}{A_{FC}} \right)^{2.5} \right]}{0.0055 \left[ \psi - 0.634 - 3 \left( \frac{i_{FC}}{A_{FC}} \right) \right] e^{\left[ \frac{T-303}{0.2392T} \right]}} \quad (13)$$

Na qual  $0.0055(\psi - 0.634)$  é a resistividade específica da membrana ( $\Omega \cdot cm$ ) a  $30^\circ C$  com  $i_{FC} = 0$ . O termo exponencial no denominador é a correção de temperatura para casos nos quais a temperatura da CaC não é de  $30^\circ C$ .  $T$  é a temperatura absoluta da célula (K). O termo entre colchetes no numerador, juntamente com o termo  $3i_{FC}/A_{FC}$  no denominador são determinados empiricamente, e representam a correção para a resistividade específica da membrana em função da densidade de corrente elétrica e da temperatura da CaC. O parâmetro  $\psi$  é ajustável em função da preparação da membrana e da umidificação da mesma, dentre outros fatores. Ainda com relação à Equação (8),  $V_{con}$  é resultado da redução da concentração de oxigênio e/ou hidrogênio no catodo e no anodo e é definida pela equação a seguir:

$$V_{con} = -B \times \ln \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (14)$$

Na qual  $B$  (Volts) é um coeficiente de parametrização que depende da célula e de seu estado de operação, e  $J$  e  $J_{max}$  representam as densidades atual e limite de corrente, em mA/cm<sup>2</sup>.

### 2.2.1 Dinâmica da CaC

A quantidade de reações que ocorrem na interface eletrodo/eletrólito de uma célula a combustível depende da densidade de elétrons e íons de hidrogênio nas superfícies de ambos. Quanto maior a concentração de carga, maior é a corrente gerada. Essa concentração de carga gera uma tensão elétrica na interface e se comporta de maneira semelhante a um capacitor elétrico. Quando a corrente muda de valor, algum tempo é necessário para que a quantidade de carga armazenada na interface eletrodo/eletrólito se dissipe ou aumente, ou seja, a tensão de ativação não segue imediatamente a corrente tal como ocorre com a tensão ôhmica. Esse atraso pode ser equacionado como segue.

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{i_{FC}}{C} - \frac{V_d}{\tau} \quad (15)$$

Na qual  $V_d$  representa a tensão dinâmica da célula a combustível, equivalente a tensão sobre uma capacitância elétrica  $C$ , com uma constante de tempo  $\tau$ , definida de acordo com a Equação (16).

$$\tau = C \times R_a = C \times \left( \frac{V_{act} + V_{con}}{i_{FC}} \right) \quad (16)$$

Na Equação (16),  $R_a$  é a resistência equivalente e a soma  $V_{act} + V_{con}$  é igual a  $V_d$  na Equação (15). Assim, uma CaC pode ser modelada como um circuito elétrico de acordo com a Figura 1. Um modelo computacional para representar o comportamento de uma pilha de células a combustível é facilmente construído utilizando as Equações (8) a (16), que permitem o cálculo, a partir de uma corrente demandada, da tensão e potência de saída da pilha e das pressões parciais dos gases nos anodo e catodo.

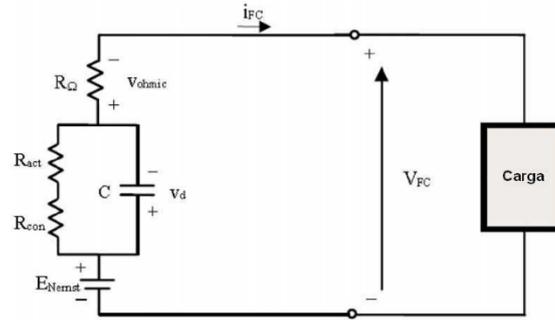


Figura 1. Circuito elétrico equivalente de uma célula a combustível.

A tensão e a potência da pilha de CaCs,  $V_{pilha}$  e  $P_{pilha}$ , são encontradas multiplicando-se as tensão ( $V_{FC}$ ) e potência ( $P_{CaC}$ ) de uma célula pelo número de células que a compõem ( $n$ ):

$$V_{pilha} = n \times V_{FC} \tag{17}$$

$$P_{pilha} = n \times V_{FC} \times i_{FC} \tag{18}$$

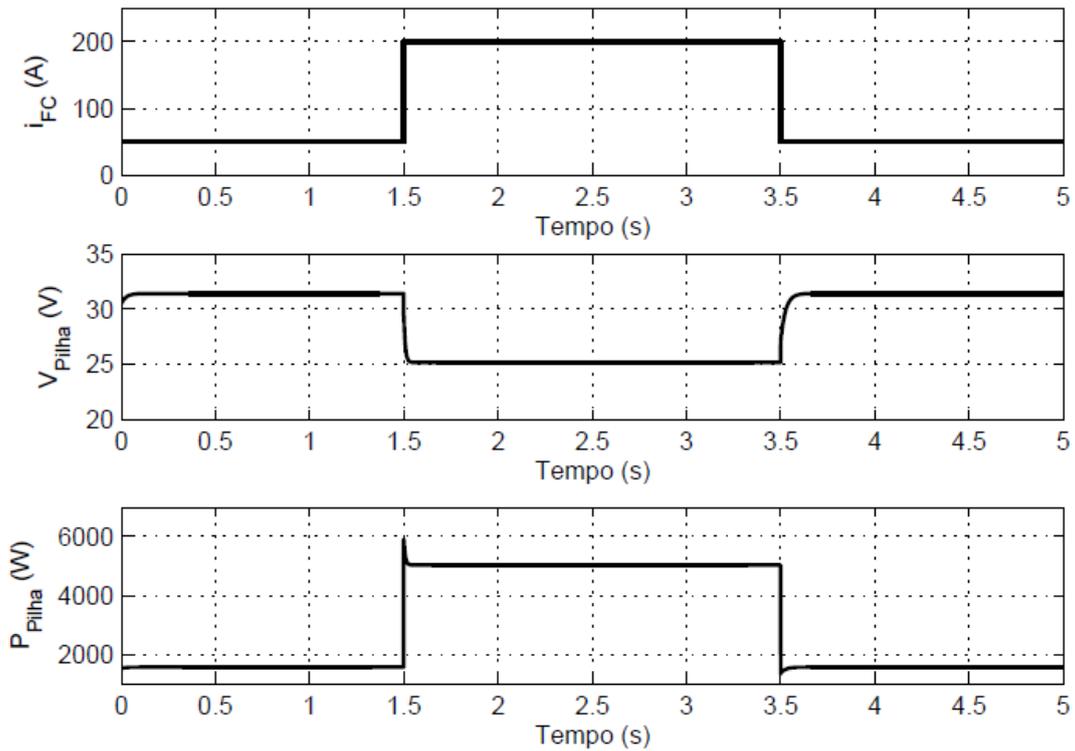


Figura 2. Tensão e potência da CaC em função da inserção e retirada de carga.

A Figura 2 apresenta resultado de simulação realizada com os dados apresentados na

**Tabela 1** para uma pilha de CaCs de membrana polimérica (PEM). Embora a constante de tempo associada a variação da tensão da pilha de CaCs seja pequena, é possível perceber que a tensão varia de maneira mais suave se comparada a variação da corrente.

**Tabela 1.** Parâmetros de células combustíveis.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$A_{fc}$	$232cm^2$	$\varepsilon_3$	$7.60 \times 10^{-5}$
$L$	$178\mu m$	$\varepsilon_4$	$1.93 \times 10^{-4}$
$P_{H_2}$	1 atm	$T$	343 K
$P_{O_2}$	1 atm	$\psi$	23
$B$	0.016 Volts	$J_{MAX}$	960 mA/cm <sub>2</sub>
$R_C$	0.3mΩ	$C$	3 F
$\varepsilon_1$	-0.948	$n$	42
$\varepsilon_2$	$0.00286 + 0.0002 \ln A + (4.3 \times 10^{-5}) \ln c_{H_2}$		

### 2.2.2 Consumo

A vazão de hidrogênio consumido é calculada em função da massa molar ( $M_{H_2}$ , em g/mol) do gás e da corrente elétrica atravessa a célula ( $i_{FC}$ ), de acordo com a Equação (19) (Dicks & Rand, 2018).

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = \frac{M_{H_2} i_{FC}}{2F} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (19)$$

Na qual  $F$  é a constante de Faraday. De maneira semelhante, a vazão de Oxigênio consumido e a vazão de água produzida são calculadas de acordo com as Equações (20) e (21).

$$\frac{dm_{ar}}{dt} = 3.57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (20)$$

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (21)$$

Na Equação (20),  $\lambda$  é a razão estequiométrica (aqui considerada igual a 2). Para encontrar o consumo de uma pilha de CaCs, ao invés de uma única célula, basta multiplicar as Equações (19), (20) e (21) pelo número de células da pilha.

### 2.2.3 Eficiência

A eficiência de uma CaC ( $\eta_{FC}$ ) pode ser determinada através da Equação (22), na qual  $\mu_f$  é o coeficiente de utilização de combustível (Dicks & Rand, 2018)

$$\eta_{FC} = \mu_f \times \frac{V_{FC}}{1.48} \times 100\% \quad (22)$$

### 2.3 Motor elétrico

O modelo dinâmico utilizado para representar o comportamento do motor elétrico de indução do VEH é tal como apresentado em (Vadim Utkin, 2009) e (Yan, et al., 2004). As equações dinâmicas que o definem, apresentadas em coordenadas  $(\alpha, \beta)$ , são exibidas a seguir:

$$\frac{di_\alpha}{dt} = \beta\eta\psi_\alpha + \beta\omega\psi_\beta - \gamma i_\alpha + \frac{1}{\sigma L_S} u_\alpha$$

$$\frac{di_\beta}{dt} = \beta\eta\psi_\beta - \beta\omega\psi_\alpha - \gamma i_\beta + \frac{1}{\sigma L_S} u_\beta$$

$$\frac{d\psi_\alpha}{dt} = -\eta\psi_\alpha - \omega\psi_\beta + \eta L_h i_\alpha$$

$$\frac{d\psi_\beta}{dt} = -\eta\psi_\beta + \omega\psi_\alpha + \eta L_h i_\beta$$

$$T = \frac{3N_r L_h}{2L_r} (i_\beta \psi_\alpha - i_\alpha \psi_\beta)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (T - T_l) \quad (23)$$

nas quais:

$$\eta = \frac{R_r}{L_r}; \beta = \frac{L_r}{\sigma L_S L_r}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_h^2}{L_S L_r}; \gamma = \frac{R_S + \frac{L_h^2}{L_r} R_r}{\sigma L_S} \quad (24)$$

e  $i_\alpha, i_\beta$  são as componentes da corrente no estator nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$ ,  $\psi_\alpha, \psi_\beta$  são as componentes do fluxo magnético no rotor nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$ ,  $u_\alpha, u_\beta$  são as componentes da voltagem no estator nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$ ,  $L_r, L_S, L_h$  são as indutâncias do rotor, estator e mútua, respectivamente,  $R_r, R_S$  são as resistências do rotor e do estator,  $\omega$  = velocidade angular do rotor,  $J$  é o momento de inércia do rotor do motor,  $T$  é o torque do motor,  $T_l$  é o torque da carga e  $N_r$  é a quantidade de pares de polos.

Do ponto de vista de controle, o objetivo é fazer com que o motor siga um torque de referência. Em outras palavras, a potência demandada ao veículo pelo motorista é traduzida em uma demanda de torque ao motor elétrico que, para gerar o torque desejado, necessitará do fornecimento de potência (corrente elétrica) proveniente das fontes de energia do sistema. O controlador do veículo (sistema de gerenciamento de potência) determinará, em seguida, a quantidade de potência que deverá ser requisitada a cada fonte.

A corrente é obtida através da Equação (25) (Yan, et al., 2004).

$$i = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (25)$$

As potências elétrica e mecânica do motor elétrico são calculadas de acordo com as Equações (26) e (27), respectivamente, onde  $u$  é a tensão elétrica fornecida ao motor.

$$P_{el} = u \times i \quad (26)$$

$$P_{mec} = T \times \omega \quad (27)$$

Sejam as seguintes equações de erro (Yan, et al., 2004) :

$$S_T = T - T^* \quad (28)$$

$$S_\psi = c(\psi - \psi^*) + (\dot{\psi} - \dot{\psi}^*) \quad (29)$$

nas quais  $T^*$  e  $\psi^*$  são os torque e fluxo desejados e  $\psi = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2}$ . Sejam:

$$S = \begin{bmatrix} S_T \\ S_\psi \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} -\psi_\beta & \psi_\alpha \\ \psi_\alpha & \psi_\beta \\ \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} & \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$\dot{S}$  pode ser encontrada através da Equação (23), e pode ser escrita como:

$$\dot{S} = f_1(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) + c_1 D \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (31)$$

na qual  $c_1$  é constante e  $f_1$  é uma função contínua de variáveis de estado, ambas assumidas limitadas. Pode-se determinar modos deslizantes através da utilização da transformação não linear:

$$S^* = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = D^{-1} S \quad (32)$$

$D^{-1}$  existe para todo  $\psi \neq 0$ . Logo:

$$\dot{S}^* = \dot{D}^{-1}S + D^{-1}\dot{S} = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) + c_1 \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (33)$$

na qual  $f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)$  é função contínua e limitada. Multiplicando-se os dois lados da Equação (33) por  $S^*$ , tem-se:

$$S^*\dot{S}^* = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)S^* + c_1uS^* \quad (34)$$

Selecionando a lei de controle tal como:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= -u_0 \text{sign}(S_1) \\ u_\beta &= -u_0 \text{sign}(S_2) \end{aligned} \quad (35)$$

e substituindo  $u$  na Equação (34), tem-se:

$$S^*\dot{S}^* = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)S^* - c_1u_0|S^*| \quad (36)$$

ou ainda:

$$S^*\dot{S}^* \leq -c_1u_0|S^*| \quad (37)$$

Já que  $f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)$  é limitada e é possível encontrar  $u_0 \geq |f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)|$ . Assim, a condição de alcançabilidade  $S^*\dot{S}^* \leq 0$  é satisfeita e um modo deslizante surge em  $S^* = S = 0$ . Então  $T \rightarrow T^*$  e  $\psi \rightarrow \psi^*$  é solução da Equação  $S_\psi = 0$  e os torque e fluxo desejados são alcançados.

Cabe ressaltar que o fluxo magnético do rotor do motor geralmente não é medido, mas apenas estimado através da medição da velocidade angular do rotor, bem como das componentes da corrente no estator (Vadim Utkin, 2009). Ademais, para a implementação do controlador é necessário converter as tensões no estator,  $u_\alpha$  e  $u_\beta$ , para tensões de fase,  $u_a$ ,  $u_b$  e  $u_c$ , o que pode ser realizado através da transformação linear a seguir:

$$[u_a u_b u_c]^T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^T [u_\alpha u_\beta]^T \quad (38)$$

## 2.4 Dinâmica do veículo

O sinal de entrada para a dinâmica do veículo é o torque proveniente do motor elétrico e o sinal de saída é a velocidade do veículo, que é realimentada e controlada de acordo com a solicitação do motorista, conforme a Equação (39).

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} \left( \frac{\tau_{ref} - \tau_b}{r_{roda}} - \frac{Bv}{r_{roda}^2} - F_r - F_a \right) \quad (39)$$

na qual  $\tau_{ref}$  é o torque gerado pelo motor elétrico (torque de referência),  $\tau_b$  é o torque de fricção aplicado às rodas do veículo,  $B$  é coeficiente de amortecimento viscoso,  $r_{roda}$  é o raio das rodas,  $M$  a massa e  $v$  a velocidade do veículo,  $F_r$  é a força de resistência ao rolamento e  $F_a$  é a força de resistência ao movimento devido ao arraste aerodinâmico. As forças  $F_r$  e  $F_a$  são dadas pelas Equações (40) e (41), respectivamente, sendo  $C_d$  o coeficiente de arraste aerodinâmico,  $\rho_a$  a densidade do ar,  $A$  a área frontal do veículo,  $C_{rolamento}$  o coeficiente de resistência ao rolamento e  $F_n$  a força normal aos pneus.

$$F_r = C_{rolamento} \times F_n \quad (40)$$

$$F_a = \frac{1}{2} C_d \rho_a A v^2 \quad (41)$$

Os parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 2 e foram, em sua maioria, retirados dos arquivos do programa ADVISOR, um programa de simulação de veículos desenvolvido pelo departamento de energia americano (DOE) reconhecido como um dos principais simuladores de automóveis existentes. A massa do veículo, originalmente 825kg, foi aumentada em 140kg, de maneira a incluir o peso médio de duas pessoas. Além disso,

massa adicional foi utilizada para os diferentes tipos de VECaCs em função do peso aproximado das fontes de energia. Na Tabela 2,  $g$  representa a aceleração da gravidade.

**Tabela 2.** Parâmetros do veículo.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$M$	965 a 1205kg	$B$	0,001
$A$	$2,332m^2$	$J_r$	$\frac{181}{2,205} \times \frac{r_{roda}^2}{2} kgm^2$
$C_d$	0,37	$g$	$9,81m/s^2$
$r_{roda}$	0,2711m	$\rho_a$	$1,2kgm^3$
$C_{rolamento}$	0,009	$F_n$	$M \times g$

#### 2.4.1 Representação do motorista

O motorista impõe a velocidade ao veículo através da atuação nos pedais do acelerador e do freio. Trata-se do elemento que fecha a malha de realimentação, medindo a velocidade do veículo e comparando-a com uma velocidade de referência. O motorista pode ser modelado como um controlador proporcional e integral (PI) que atua por meio do sinal de torque de referência. Por simplicidade, o controlador é projetado desconsiderando-se a não-linearidade inserida pela força de arraste aerodinâmico. Entretanto, através de um ajuste de ganhos é possível utilizar o controlador PI com o modelo dinâmico completo do veículo, incluindo a força de arraste. O controlador é projetado de maneira que a entrada seja o erro entre a velocidade desejada (velocidade de referência) e a velocidade atual do veículo, e a saída (sinal de controle) seja o torque que deve ser transmitido ao eixo das rodas. Esta saída pode ser entendida como sendo a posição dos pedais do acelerador e do freio, modificada de acordo com a atuação do motorista. Nesse trabalho, a sintonia do controlador PI foi realizada manualmente, a partir da observação de respostas ao degrau simuladas para o sistema. Os valores dos ganhos utilizados nas simulações apresentadas a seguir são  $K_p = 300$  e  $T_i = 80$ .

### 3. Estratégias De Gerenciamento De Potência

Os VECaCs podem ser classificados em três categorias: não-híbridos, híbridos sem regeneração e híbridos regenerativos. Em VECaCs híbridos com regeneração, o BB permite o aproveitamento de parte da energia que seria desperdiçada durante frenagem. Em VECaCs não-híbridos não existe regeneração, e a energia gerada durante frenagem é desperdiçada através de freios de fricção ou banco de resistores. Nesta configuração, a solicitação de potência feita a pilha de CaCs segue a solicitação do motorista (exceto durante frenagem), o que pode implicar em frequente operação da pilha em regiões de baixa eficiência devido à alta solicitação de potência. Na configuração híbrida sem regeneração, o sistema de armazenamento de energia é utilizado apenas como suporte à célula a combustível, fornecendo parte da potência ao veículo quando a mesma opera em regiões de baixa eficiência. Nesses VECaCs, o BB pode ser recarregado apenas através da pilha de CaCs. As vantagens desta configuração são seu baixo custo e a simplicidade de sua eletrônica de potência.

#### 3.1 Ciclos de condução

O ciclo de condução desejado pelo motorista pode ser emulado através de ciclos normatizados que reproduzem situações de condução diversas. Neste trabalho, três ciclos diferenciados foram considerados, a saber: *Federal Urban Driving Schedule* (FUDS), *Highway Fuel Economy Driving Schedule* (HFET) e *US06 Supplemental Federal Test Procedure* (SFTP), todos estes estabelecidos pela agência de proteção ambiental norte-americana (EPA, do inglês *Environmental Protection Agency*).

O ciclo FUDS representa condições de condução em cidades, com baixas velocidades e muitas situações de aceleração e frenagem; o HFET representa condução em estradas, onde velocidade razoavelmente constante é mantida e poucas situações de aceleração e frenagem são necessárias; e o ciclo SFTP simula um perfil agressivo de condução, com altas velocidade e aceleração, rápidas mudanças de velocidade e condições de condução após partida. As principais características dos três ciclos são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Principais características dos ciclos de condução.

Ciclo	FUDS	HFET	SFTP
Distância (km)	11,8	16,5	12,8
Duração (s)	1372	766	601
Velocidade média (km/h)	31,4	77,6	77,1
Velocidade máxima (km/h)	91,2	96,4	129,2
Quantidade de paradas	18	1	8

O controle do veículo pode ser resumido da seguinte maneira:

1. A velocidade almejada é comparada com a velocidade atual do veículo;
2. O controlador PI gera um sinal de referência que representa o torque necessário para que o veículo atinja a velocidade estabelecida;
3. O controlador do veículo avalia o torque necessário e gera um sinal de referência para o motor elétrico;
4. O controlador do motor elétrico faz com que o mesmo gere o torque desejado;
5. A potência necessária ao motor elétrico é solicitada às fontes de energia pelo controlador do veículo. A divisão desta solicitação é feita de acordo com estratégia de controle e as restrições aplicáveis.

O sinal de referência (torque) transmitido ao motor elétrico pode não ser igual à solicitação do motorista. Ele poderá variar de acordo com a capacidade do motor elétrico em gerá-lo e com a capacidade das fontes de energia proverem a potência necessária.

Além da potência para realizar o ciclo de condução, as fontes do veículo devem também ser capazes de alimentar os sistemas auxiliares tais como ar condicionado, rádio, vidros elétricos, iluminação interna, etc. Nos resultados que seguem, foi adicionado uma potência de 2kW em cada instante de tempo de maneira a representar a solicitação média de potência dos sistemas auxiliares de um veículo leve (Larminie & Lowry, 2012).

### 3.2 VECaC não-híbrido

A estratégia de controle para veículos de célula a combustível não-híbridos restringe-se a ajustar a potência da pilha de CaCs para satisfazer a solicitação de carga ao longo do tempo. Durante frenagem, a pilha é desligada. A Figura 3 apresenta um exemplo dos resultados obtidos para o ciclo de condução FUDS. Nesta,  $V_{veiculo}$  é a velocidade desempenhada pelo veículo,  $P_{motor}$  é a potência necessária ao motor de indução para que o mesmo satisfaça a solicitação do motorista e a alimentação dos sistemas auxiliares, e  $P_{CaC}$  é a potência solicitada à pilha de células a combustível. Daqui por diante,  $P_{motor}$  será tratada, por simplicidade, como sendo a solicitação de potência por parte do motorista do veículo.

A Tabela 4 apresenta a quantidade de hidrogênio consumido e a eficiência média da pilha de CaCs ( $\bar{\eta}_{FC}$ ) ao longo dos ciclos FUDS, HFET e SFTP. O ciclo HFET implica no menor consumo de hidrogênio, pois a potência necessária para sua realização é menor do que os outros dois. Já os ciclos SFTP e FUDS resultam em praticamente o mesmo consumo. Como não há fonte de energia auxiliar, a pilha de CaCs opera com baixa eficiência em muitos momentos.

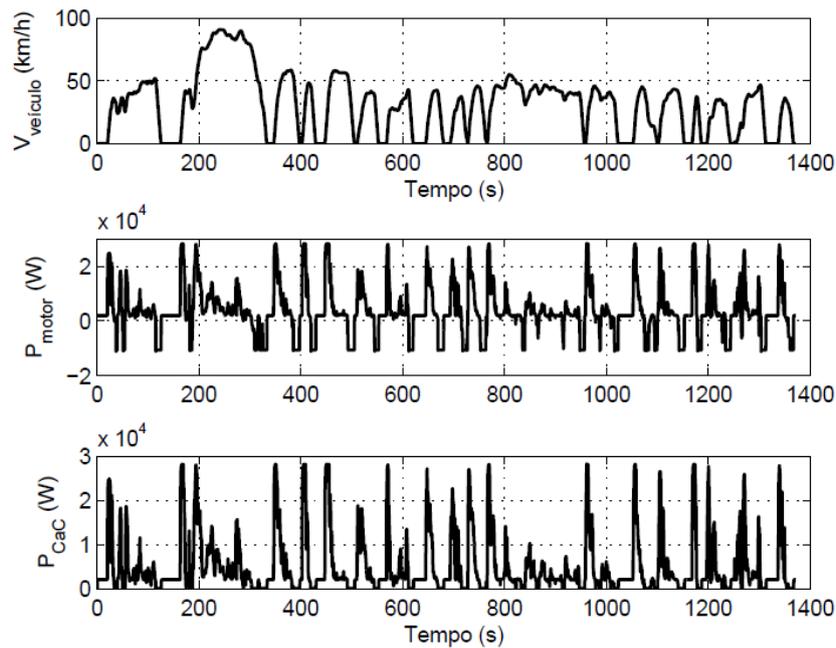


Figura 3. VECaC não-híbrido com ciclo FUDS.

Tabela 4. Consumo e  $\bar{\eta}_{FC}$  para o vecac não híbrido.

Ciclo	Consumo de $H_2(kg)$	$\bar{\eta}_{FC}$
FUDS	$12,90 \times 10^{-2}$	47,83%
HFET	$10,23 \times 10^{-2}$	42,62%
SFTP	$12,33 \times 10^{-2}$	43,19%

### 3.3 VECaC híbrido sem regeneração

Para VECaCs híbridos sem regeneração, o controlador deve acionar o banco de baterias para que o mesmo forneça parte da energia quando a pilha de CaCs opera com baixa eficiência ou quando a demanda de potência é muito elevada. Nesse caso, a potência da pilha de células é mantida constante e a diferença entre a solicitação do motorista e a potência fornecida pela pilha será suprida pelo banco de baterias. A estratégia é realizada dessa maneira até que o BB atinja um limite mínimo de estado de carga ( $SOC_{min}$ ). A partir deste momento o banco de baterias não mais será utilizado para evitar operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência até que seja novamente carregado, atingindo um limite superior determinado ( $SOC_{max}$ ). Para tal, a pilha de CaCs carrega o BB nos momentos em que a solicitação de potência for menor do que a potência máxima que a pilha é capaz de prover.

Pode haver momentos em que a potência solicitada pelo motorista seja maior do que a pilha de CaCs é capaz de fornecer. Nesta condição existem duas alternativas possíveis: Fornecer a potência solicitada pelo motorista através do acionamento do BB ou suprir apenas a potência máxima que a pilha de CaCs pode fornecer e não acionar o banco de baterias, evitando descarregá-lo. Caso a primeira alternativa seja empregada, a vida útil do banco de baterias será diminuída em função do aumento dos ciclos de utilização se comparado à segunda opção, entretanto haverá momentos nos quais o desempenho do veículo será comprometido em função da potência fornecida pelas fontes de energia ser menor do que a potência demandada. De maneira semelhante, pode ocorrer que o  $SOC$  do banco de baterias atinja o limite mínimo permitido e a solicitação de potência do motorista seja maior do que a pilha de CaCs é capaz de prover. Nesse caso, deve-se optar entre descarregar o banco de baterias além do limite desejado ( $SOC_{min}$ ) ou manter o estado de carga neste limite, o que implica em não satisfazer a solicitação do motorista. Nesse trabalho, o BB é utilizado nas situações onde a solicitação de potência é maior do que a pilha de CaCs é capaz de prover.

A Figura 4 apresenta a distribuição de potência quando a estratégia de controle é aplicada para a realização do ciclo de condução FUDS. A potência máxima da pilha de CaCs é limitada para evitar operação em regiões de baixa eficiência. Um limite de aproximadamente 30% foi utilizado como o valor mínimo de eficiência permitido. O número

de células da pilha de CaCs foi reduzido à metade se comparado ao VECaC não híbrido e o banco de baterias é composto por 12 (doze) baterias do tipo chumbo ácido de 12 Volts (6 células), semelhantes as utilizadas hoje em dia em veículos leves convencionais.

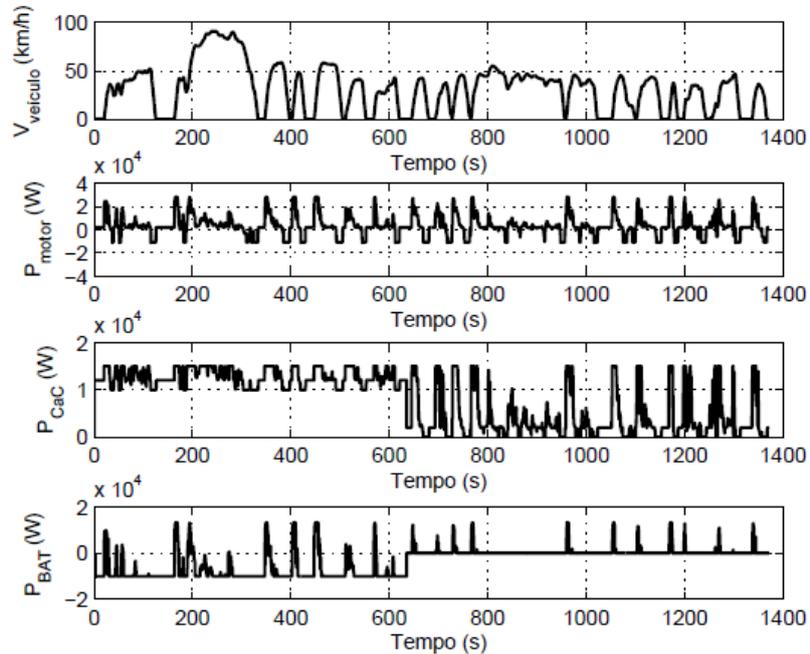


Figura 4. VECaC híbrido sem regeneração com ciclo FUDS.

O estado de carga do banco de baterias para a mesma simulação é apresentado na Figura 5. É observado que o BB deixa de ser carregado ao atingir 60% de sua capacidade ( $SOC_{max}$ ). Nesta simulação, o estado de carga inicial do banco de baterias foi fixado em 50%, que é o limite inferior do intervalo permitido ( $SOC_{min}$ ).

A estratégia de controle foi também empregada considerando ciclos de condução diferentes. A Tabela 5 resume os principais resultados alcançados.

Pode-se observar que a eficiência média da pilha de CaCs, embora ainda menor do que 50%, é maior do que as do VECaC não híbrido para os três ciclos de condução. Este valor não é ainda maior, porque a pilha de CaCs é utilizada com frequência para carregar o BB, o que faz com que opere constantemente com eficiência próxima do valor mínimo permitido. Entretanto, com a inserção do BB, o consumo de hidrogênio diminuiu com relação ao VECaC não híbrido.

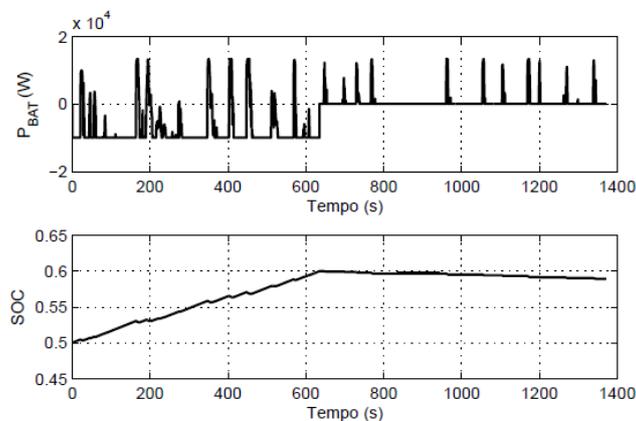


Figura 5. SOC do VECaC híbrido sem regeneração com ciclo FUDS.

**Tabela 5.** Consumo,  $\bar{\eta}_{FC}$  e  $SOC$  para o vecac híbrido sem regeneração.

Ciclo	Consumo de $H_2(kg)$	$\bar{\eta}_{FC}$	$SOC$ médio
FUDS	$12,72 \times 10^{-2}$	48,67%	56,67%
HFET	$10,01 \times 10^{-2}$	44,05%	58,58%
SFTP	$09,84 \times 10^{-2}$	44,02%	54,66%

### 3.4 VECaC híbrido regenerativo

Nesta configuração o algoritmo de controle visa aproveitar energia proveniente de frenagem e manter o  $SOC$  do banco de baterias o mais próximo possível de um valor ideal pré-determinado ( $SOC_{ideal}$ ). Para tal, além de evitar a operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência, e controlar o  $SOC$  do BB entre limites estabelecidos, o controlador penaliza o  $SOC$  em função da diferença entre seu valor atual e o  $SOC_{ideal}$ . Dessa maneira, a deterioração imposta à bateria decorrente de altas correntes de carga e descarga é minimizada. O algoritmo opera o veículo em dois modos distintos: Recarga rápida e recarga normal.

O modo de recarga rápida evita que o BB tenha seu estado de carga diminuído além de  $SOC_{min}$ . Neste modo, a pilha de CaCs provê continuamente a sua potência máxima até que o  $SOC$  atinja o valor ideal pré-determinado. Neste estudo, o  $SOC_{ideal}$  é fixado em 55%, que é o valor médio do intervalo permitido. No modo de recarga normal, a potência solicitada a pilha de CaCs é controlada entre os valores mínimo ( $P_{min}$ ) e máximo ( $P_{max}$ ). Além disso, o  $SOC$  do banco de baterias é mantido entre  $SOC_{min}$  e  $SOC_{max}$  e têm sua flutuação com relação ao  $SOC_{ideal}$  penalizada através do aumento ou da diminuição da solicitação de potência feita ao BB. O modo de recarga normal pode ser descrito através de quatro etapas diferenciadas, a saber:

- Regeneração: O fornecimento de potência por parte da pilha de CaCs é interrompido e o BB é carregado através da frenagem regenerativa. Quando o  $SOC = SOC_{max}$ , a regeneração é interrompida;
- Baixa potência: Evita operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência. Quando pouca potência é demandada ao veículo, a pilha é desligada e o BB fornece a potência necessária;
- Alta potência: A pilha de CaCs fornece sua potência máxima enquanto o BB provê a potência adicional necessária;
- Potência moderada: Quando o  $SOC$  do banco de baterias está acima do valor ideal, o BB é descarregado proporcionalmente a diferença entre o  $SOC$  e o  $SOC_{ideal}$ , tal como exposto na Equação (42). A potência adicional é fornecida pela pilha de CaCs. Quando o  $SOC$  está abaixo do  $SOC$  ideal, a pilha de CaCs fornece a potência para propelir o veículo e um adicional para carregar o BB. Esse adicional é calculado de acordo com a Equação (43).

$$P_{bat} = (P_{motor} - P_{CaC_{max}}) \times \Psi \quad (42)$$

$$P_{bat} = -P_{motor} \times \Psi \quad (43)$$

nas quais

$$\Psi = \frac{\left(\frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2}\right) - SOC}{\left(\frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{2}\right)} \quad (44)$$

Na Figura 6 podem ser observadas a velocidade do veículo e as potências solicitadas a cada uma das fontes para que o mesmo realize o ciclo de condução FUDS utilizando a estratégia de controle descrita nesta seção. O  $SOC$  inicial do banco de baterias foi fixado em 50%. Na Figura 7 é apresentado o estado de carga do BB para a mesma situação.

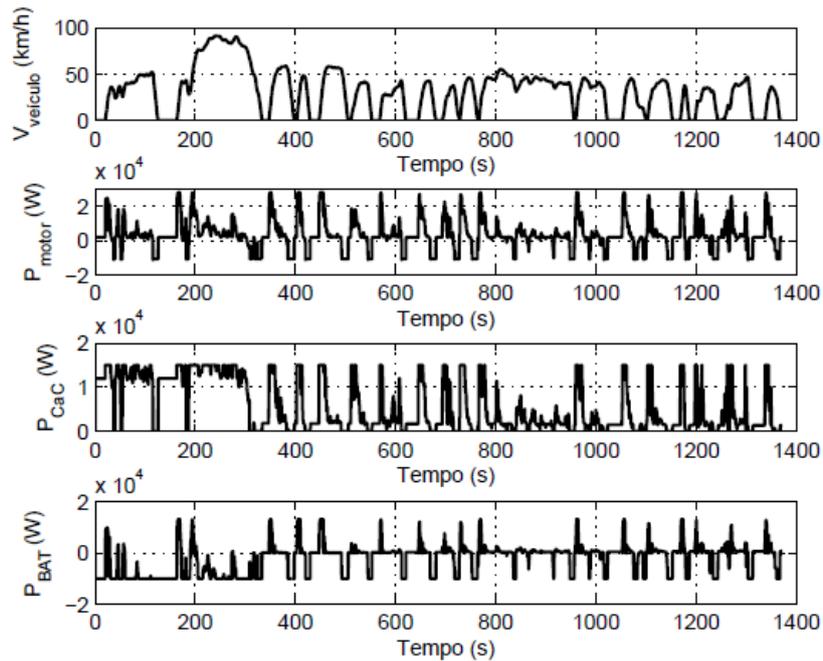


Figura 6. VECaC híbrido regenerativo para o ciclo FUDS.

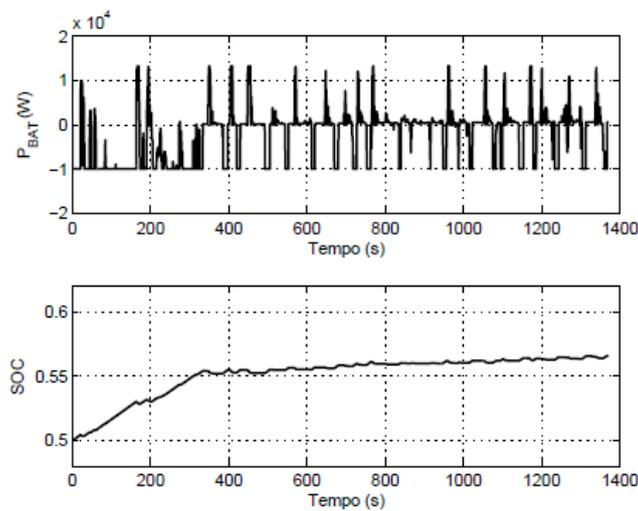


Figura 7. SOC do VECaC híbrido regenerativo para o ciclo FUDS.

O sistema inicia sua operação no modo de recarga rápida, uma vez que o  $SOC$  inicial do BB é o limite mínimo permitido. A operação é mantida nesse modo por aproximadamente 340s, tempo necessário para que o BB alcance 55% de sua carga ( $SOC_{ideal}$ ). Nesse instante, a operação passa para o modo de recarga normal o que faz com que a pilha de CaCs não seja mais acionada para carregar a bateria. A mesma é carregada nos instantes em que o motor de indução opera como gerador a partir da energia mecânica de frenagem. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para os ciclos de condução FUDS, HFET e SFTP.

Tabela 6. Consumo,  $\bar{\eta}_{FC}$  e  $SOC$  para o VECaC híbrido regenerativo.

Ciclo	Consumo de $H_2(kg)$	$\bar{\eta}_{FC}$	$SOC$ médio
FUDS	$07,94 \times 10^{-2}$	55,89%	55,29%
HFET	$04,79 \times 10^{-2}$	55,37%	53,86%
SFTP	$08,35 \times 10^{-2}$	47,08%	54,55%

### 3.5 Comparação com veículos convencionais

Para comparar o consumo dos VECaCs com o de veículos leves movidos por motor de combustão interna pode-se calcular um consumo equivalente de gasolina que representa a massa de hidrogênio consumido somada a energia da bateria gasta pelo VECaC. O cálculo é realizado de acordo com o a Equação (45) (Cho, 2004).

$$C_{eq_{km/l_{gas}}} = k \times \frac{PCI_{gas} \times \rho_{gas} \times D}{\frac{E_{bat}}{\eta_{CaC} \times \eta_{bat}} + (m_{H_2} \times PCI_{H_2})} \quad (45)$$

Na qual  $PCI_{gas}$  e  $PCI_{H_2}$  são os poderes caloríficos inferiores da gasolina e do hidrogênio ( $43,5MJ/kg$  e  $119,950MJ/kg$ ),  $\rho_{gas}$  é a densidade da gasolina ( $755kg/m^3$ ),  $D$  é a distância em metros percorrida pelo veículo,  $E_{bat}$  é a energia consumida pelo BB (KJ),  $\eta_{CaC}$  e  $\eta_{bat}$  são as eficiências médias da pilha de CaCs e do banco de baterias, respectivamente, e  $k = 1000$  representa os fatores de conversão de unidades ( $kJ$  para  $MJ$ ,  $m^3$  para  $l$  e  $m$  para  $km$ ).

A Tabela 7 apresenta a média de consumo equivalente para as configurações de VECaCs tratadas neste trabalho, comparadas a média de consumo de um veículo leve convencional movido exclusivamente por um MCI para três ciclos de condução. A simulação do consumo de veículos convencionais não é parte do escopo deste trabalho, porém uma comparação em ordem de grandeza é útil para balizar o desempenho das diferentes configurações de VECaCs aqui propostas. Desse modo, os valores apresentados na Tabela 7 para o consumo de combustível do veículo leve de passeio propelidos por MCI são os mesmos para todos os ciclos de condução, sendo utilizados apenas como referência para dar ideia do potencial de melhoria alcançável pelos VECaCs.

**Tabela 7.** Consumo equivalente em km/l de gasolina.

Veículo	FUDES	HFET	SFTP
Veículo 1.0 Convencional	12,00	12,00	12,00
VECaC não híbrido	25,45	62,49	36,65
VECaC híbrido sem regeneração	39,07	63,35	34,02
VECaC híbrido regenerativo	39,43	65,95	43,23

Fica evidente a dependência do consumo do veículo com relação ao ciclo de condução realizado. A condução do veículo em estrada (ciclo HFET) implica em consumo menor do que a condução em cidade (FUDES) e/ou a condução agressiva (SFTP). Em todos os casos, entretanto, o consumo do veículo híbrido diminuiu com relação ao não híbrido. Além do menor custo associado à energia da bateria, a inserção da capacidade de regeneração provou ser uma forma de reduzir o consumo. Pode-se verificar que a melhoria é mais acentuada no VECaC híbrido com relação ao não-híbrido para os ciclos FUDES e SFTP, nos quais existe maior quantidade de energia de regeneração.

### 4. Conclusão

Este trabalho apresenta um modelo dinâmico para veículos elétricos híbridos de célula a combustível e estratégias aplicáveis para o gerenciamento de potência entre as suas fontes de energia. Um modelo computacional é detalhado, o qual permite avaliar o comportamento de tais veículos de acordo com diferentes solicitações de potência. O modelo é composto por um banco de baterias, uma pilha de células a combustível e um motor elétrico, além de um controlador PI que representa as reações do motorista, um controlador por modos deslizantes para o motor elétrico e um controlador para o gerenciamento de potência. A implementação computacional é apresentada de acordo com parâmetros que representam um veículo leve de passeio, permitindo a comparação do consumo de energia dos veículos híbridos com veículos de tamanho semelhante equipados com motores de combustão interna. Três configurações são avaliadas: VECaC não híbrido, VECaC híbrido sem regeneração, VECaC híbrido regenerativo. Os resultados comprovam a melhoria no consumo de combustível dos VECaCs com relação a veículos convencionais de MCI e demonstram o melhor desempenho (menor consumo) dos veículos híbridos. O modelo desenvolvido pode ser facilmente adaptado a diferentes tipos de veículos e servir de base para a realização de estudos mais complexos, tais como a inserção da dinâmica de outros subsistemas (sistemas de potência, instrumentos auxiliares, dentre outros), a utilização de outras fontes de geração e/ou armazenamento de energia (supercapacitores, sistemas hidráulicos, etc.) e o desenvolvimento de novas estratégias de controle.

## Referências

- Cho, H. Y., 2004. *A new power control strategy for hybrid fuel cell vehicles*. s.l.:s.n.
- Coren, M. J., 2018. *Nine countries say they'll ban internal combustion engines. So far, it's just words*. [Online] Available at: <https://qz.com/1341155/nine-countries-say-they-will-ban-internal-combustion-engines-none-have-a-law-to-do-so/> [Acesso em Maio 2020].
- Dicks, A. L. & Rand, D. A. J., 2018. *Fuel Cell Systems Explained*. Third ed. s.l.:John Wiley & Sons Ltd.
- Global Carbon Project, 2018. *Global Carbon Atlas*. [Online] Available at: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions> [Acesso em 2018].
- Huang, Y. et al., 2018. A review of power management strategies and component sizing methods for hybrid vehicles. Volume 96, p. 132–144.
- Instituto Nacional de Eficiência Energética, s.d. *Sobre veículos elétricos*. [Online] Available at: [http://www.inee.org.br/veh\\_sobre.asp?Cat=veh](http://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh) [Acesso em 11 Fevereiro 2020].
- Junior, V. N., 2014. Estudo das principais vantagens do uso da frenagem regenerativa em veículos híbridos.
- Laoun, B., Naceur, M. W., Khellaf, A. & Kannan, A. M., 2016. Global sensitivity analysis of proton exchange membrane fuel cell model. 1(42), pp. 9521-9528.
- Larminie, J. & Lowry, J., 2012. *Electric Vehicle Technology Explained*. 2nd ed. s.l.:John Wiley and Sons Ltd.
- Mathworks, 2020. *Matlab and Simulink product families*. [Online].
- N. Mebarki, T. R. Z. M. ., D. R. S. B., 2016. PEM fuel cell/ battery storage system supplying. 41(45), pp. 20993-21005.
- Paganelli, G. et al., 2001. General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles. 22(4), pp. 511-518.
- Sun, C., Sun, F. & He, H., 2015. Investigating adaptive-ECMS with velocity forecast ability for hybrid electric vehicles. Volume 185.
- Vadim Utkin, J. G. J. S., 2009. *Sliding mode control in electromechanical systems*. s.l.:CRC Press.
- Willings, A., 2020. *Petrol and diesel bans: What you need to know*. [Online] Available at: <https://www.pocket-lint.com/cars/news/151630-petrol-and-diesel-bans-what-you-need-to-know> [Acesso em Maio 2020].
- Wong, C. Y. et al., 2019. Additives in proton exchange membranes for low- and high-temperature fuel cell applications: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, March, Volume 44, pp. 6116-6135.
- Yan, W., Pisu, . P., I. Utkin, V. & Rizzoni, G., 2004. Power Flow Control for Hybrid Electric Vehicles. *8th IEEE Workshop on Variable Structure Systems*, pp. 1-6.
- Yin, C. et al., 2019. Fuzzy optimization of energy management for power split hybrid electric vehicle based on particle swarm optimization algorithm. Volume 11, pp. 1-12.
- Zhang, P., Yan, F. & Du, C., 2015. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics. Volume 48, pp. 88-104.
- Zhao, X., Li, Y. & Liu, Z., 2015. Thermal management system modeling of a watercooled proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(7), pp. 3048-3056.
- Zhou, H. et al., 2018. A Rule-Based Energy Management Strategy Based on Dynamic Programming for Hydraulic Hybrid Vehicles.