

MODELAGEM DE UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL PARA ESTUDOS DE GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA

Téo Revoredo (Universidade do estado do Rio de Janeiro) E-mail: teorevored@uerj.br

Resumo: Veículos híbridos de célula a combustível são uma das principais alternativas para o transporte sustentável. Há, entretanto, desafios a serem superados para torná-los comercialmente viáveis. Para suplantá-los e avaliar desempenho, modelos matemáticos e computacionais são um ponto de partida natural, permitindo emular situações de operação diferentes e identificar melhorias aplicáveis. Um fator importante de avaliação é o gerenciamento de potência entre as diferentes fontes de energia. Assim, esse trabalho apresenta um modelo que permite a simulação do desempenho de veículos híbridos e seus subsistemas em função da solicitação de potência realizada pelo motorista, possibilitando avaliar estratégias de controle para a distribuição desta demanda entre as fontes de energia, incluindo a avaliação do consumo e a comparação com veículos convencionais. Sendo a obtenção de modelos um dos maiores gargalos para o desenvolvimento de sistemas de controle, este trabalho visa contribuir no sentido de apresentar um modelo capaz de subsidiar estudos tanto na gestão de potência quanto no controle dos subsistemas, uma vez que tais modelos ou alguns dos seus parâmetros são, muitas vezes, omitidos ou encontram-se espalhados na literatura de referência. O modelo é composto pela dinâmica do veículo, uma pilha de células a combustível, um banco de baterias e um motor elétrico de indução. As reações do motorista são emuladas por um controlador proporcional e integral e o motor elétrico é controlado por modos deslizantes. Resultados de simulação que validam a utilidade do modelo são apresentados, baseados em uma estratégia com regeneração de energia e um ciclo de condução normatizado.

Palavras-chave: Veículos híbridos. Célula a combustível. Gerenciamento de potência.

MODELING OF A FUEL CELL HYBRID ELECTRIC VEHICLE FOR POWER MANAGEMENT STUDIES

Abstract: Fuel cell hybrid electric vehicles are one of the main alternatives for sustainable transportation. However, some challenges must still be surpassed to make them commercially viable. In order to overcome them, and evaluate/estimate performance, mathematical and computational models are a natural starting point, allowing to emulate different operations scenarios and identify applicable improvements. Considering hybrid vehicles, an important factor that must be considered is power management between different sources. Thus, this work presents a mathematical model which provides means to simulate the performance of hybrid electric vehicles and their subsystems as a function of the power requested by the driver, allowing to evaluate control strategies for its distribution between different sources, also including fuel consumption estimation and its comparison with conventional vehicles. Considering that modeling is one of the biggest bottlenecks for the development of control systems, this work aims to contribute towards presenting a model capable of supporting studies both in power management and in the control of subsystems, since such models or some of its parameters are often omitted or are scattered in the reference literature. The model encompasses the vehicle dynamics, a fuel cell stack, a battery and an induction motor. Driver's reactions are emulated by a proportional integral controller and the motor is controlled using sliding modes. Simulation results which validate the models' usefulness are presented, based on a power management strategy encompassing energy recovery and a standardized driving cycle.

Keywords: Hybrid electric vehicles. Fuel cell. Power management.

1. Introdução

Uma das principais características do transporte sustentável é o uso eficaz da energia. Sendo o setor de transporte o principal responsável pelas emissões nos grandes centros urbanos, tecnologias alternativas que impliquem redução de emissões são de grande importância e tendem a contribuir fortemente para a diminuição das mais de 36×10^9 toneladas de gás carbônico que são anualmente despejadas na atmosfera (Global Carbon Project, 2018). Nesse contexto, os veículos elétricos têm papel fundamental. Estes podem ser definidos como aqueles

que utilizam pelo menos um motor elétrico para sua tração. Incluem-se, dentre outros, os veículos elétricos a bateria (VEBs), híbridos (VEHs), de célula a combustível (VECaCs) e trólebus (Instituto Nacional de Eficiência Energética). Tais veículos utilizam uma forma de energia mais eficiente alcançável a partir de diferentes fontes, tendo potencial para impactar fortemente o mercado automotivo, a infraestrutura de transportes terrestres e o meio ambiente em um futuro próximo.

1.1 Veículos elétricos híbridos

Apesar de suas vantagens, os veículos elétricos propulidos por uma única fonte de energia apresentam limitações que dificultam o seu estabelecimento como alternativa aos automóveis atuais, a saber: os VEBs, além de baixa autonomia, necessitam de muito tempo para serem recarregados; os veículos alimentados por energia solar possuem baixa eficiência em lugares com pouca incidência de luz do Sol; os que utilizam supercapacitores têm baixa capacidade de armazenamento de energia e os trólebus esbarram na dificuldade de implantação da infraestrutura necessária para seu uso. Por consequência, o uso de VEHs é uma alternativa mais interessante para o projeto de automóveis de passeio.

Veículos elétricos híbridos são aqueles nos quais duas ou mais fontes diferentes de energia são utilizadas no sistema de propulsão. A combinação mais comum é o emprego de um motor de combustão interna em conjunto com um banco de baterias (BB). Entretanto, 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.

Os VEHs podem ser classificados em três categorias, de acordo com sua arquitetura e maneira pela qual a energia gerada pelas diferentes fontes é transmitida para as rodas (Larminie, et al., 2012). Na configuração série, a força de tração que chega as rodas é proveniente de um ou mais motores elétricos, alimentados pelas fontes de energia. Na configuração em paralelo, o veículo pode ser propulido diretamente pelo motor de combustão interna, por meio de um sistema de engrenagens que transmite a potência gerada pelo mesmo às rodas e/ou através de motores elétricos alimentados por outra(s) fonte(s) de energia, normalmente um banco de baterias. A configuração *split* é uma variante da configuração em paralelo na qual cada um dos eixos do automóvel é alimentado a partir de uma fonte de energia diferente. Outra classificação de VEHs bem difundida os divide entre os que são capazes de manter a carga da bateria entre limites determinados em qualquer situação de condução, e os que não possuem essa capacidade. Os do primeiro tipo são chamados de mantenedores de carga. Os veículos deste tipo não necessitam ser conectados à rede elétrica para que a bateria seja recarregada. Os VEHs do segundo tipo são conhecidos como esgotadores de carga e necessitam ser conectados à rede elétrica periodicamente para recarga.

O primeiro critério avaliado ao se projetar um VEH diz respeito ao seu sistema de propulsão. Nesta etapa, a escolha entre as configurações série, paralelo ou *split* é realizada. Em seguida, o dimensionamento das fontes de energia é feito de acordo com os objetivos delineados para o veículo, tal como ser ou não mantenedor de carga. Entretanto, outros parâmetros são importantes para que um VEH tenha sucesso no mercado, tais como: desempenho, emissões, segurança, custo, durabilidade, conforto, etc.

1.2 Modelagem

Um modelo matemático seguido de uma implementação computacional para avaliação de desempenho de sistemas dinâmicos é um primeiro passo para antever necessidades de projeto e reduzir custos nas etapas de prototipagem e fabricação. Para os VEHs, além da avaliação de parâmetros relacionados ao desempenho de subsistemas, consumo de combustíveis, emissões, durabilidade, etc., outro ponto é crucial: o gerenciamento da potência demandada entre as fontes

de energia disponíveis. Não por acaso, diversos trabalhos na literatura abordam diferentes modelos dinâmicos para veículos elétricos híbridos, de portes e aplicações distintas (Mallouh, et al., 2014), (Wang, et al., 2015) e com propostas diversas para o gerenciamento de potência dos mesmos (Meyer, et al., 2013), (Daniel F. Opila, 2012). A maioria dos trabalhos, entretanto, foca em modelos parciais ou omite a descrição do modelo completo do veículo ou de seus principais parâmetros, o que dificulta uma análise abrangente.

Nesse contexto, este trabalho apresenta um modelo matemático que permite avaliar o comportamento dinâmico de um veículo elétrico híbrido composto por um banco de baterias, uma pilha de células a combustível, um motor elétrico de indução e seu controlador associado, além da dinâmica do veículo em si e de um modelo representativo do comportamento do motorista. O modelo permite avaliar o desempenho dos subsistemas citados, o consumo de combustível (hidrogênio) e o estado de carga da bateria para diferentes solicitações de potência e/ou ciclos de condução, sendo de simples utilização e adaptação a outros cenários (outras fontes de energia, diferentes algoritmos de controle, etc.), representando uma alternativa simples e flexível se comparada a *softwares* comerciais, objetivando contribuir no sentido de subsidiar estudos tanto da gestão de potência, quanto no controle dos subsistemas dos VEHs.

O trabalho é organizado da seguinte forma: as Seções 2 e 3 apresentam a modelagem do banco de baterias e a da pilha de células a combustível, respectivamente. A Seção 4 discorre sobre o motor elétrico e o controlador a ele associado, a Seção 5 apresenta a dinâmica do veículo e do subsistema para representar o motorista e a Seção 6 exibe resultados de simulação, com uma estratégia de gerenciamento de potência simples, que validam a utilização do modelo proposto para avaliação de desempenho do veículo. Na Seção 7 são realizadas considerações finais.

2. Banco de baterias

Baterias são elementos que convertem energia química em energia elétrica. Em baterias recarregáveis, a reação química pode ser revertida por meio da inversão da corrente elétrica fazendo com que a bateria retorne a um determinado estado de carga (SOC). Um conjunto de baterias é denominado banco de baterias, e é um componente importante em veículos elétricos de modo geral, 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).

Tendo como base um tempo de descarga (t) e uma capacidade nominal (C) especificados, pode-se calcular o tempo de descarga real da bateria em função da corrente drenada a partir de uma capacidade de carga de referência, denominada Capacidade de Peukert, dada pela Equação (1):

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

Nesta, I_{bat} é a corrente solicitada à bateria e k é uma constante denominada Coeficiente de Peukert. Seja um intervalo de tempo δt , no qual uma corrente constante, I_{bat} , é solicitada a bateria. A carga removida da mesma é dada pela Equação (2) (Larminie, et al., 2012).

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

Seja δt em segundos, a carga total removida da bateria após n instantes de tempo, Q_n , em Ah, é dada pela Equação (3).

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

A Equação (3) pode ser entendida como um integrador discreto. Em tempo contínuo, com $\delta t \rightarrow 0$, pode-se reescrevê-la 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.

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

Seja a razão entre esta energia e a capacidade 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) é dependente do SOC e do número de células que compõem a bateria, e é calculada por meio da Equação (6) (Larminie, et al., 2012).

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

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

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

3. Pilha de células a combustível

Células a combustível (CaCs) são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em energia elétrica. Elas produzem corrente contínua através da reação química entre um combustível gasoso e um oxidante (C.Y. Wong, 2019). Em uma CaC, 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. Diferentemente de uma bateria, onde 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. 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 o potencial termodinâmico da célula (tensão de circuito aberto), V_{act} é a perda devido a ativação do anodo e do catodo, V_{ohmic} é a perda ôhmica e V_{con} a perda devido ao transporte de massa. A tensão de circuito aberto é o potencial obtido entre os terminais da CaC quando não há carga conectada. Ele 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 (Xingqiang Zhao, 2015):

$$E_{nerst} = \frac{\Delta G}{2 \times F} + \frac{\Delta S}{2 \times F} \times (T - T_{ref}) + \frac{R \times T}{2 \times F} \times \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \times \ln(P_{O_2}) \right] \quad (8)$$

Esta equação é, na verdade, uma versão modificada que leva em consideração mudanças de temperatura com relação à uma condição de referência (25°C). Nesta, ΔG representa a mudança na energia livre de Gibbs, em J/mol, F é a constante de Faraday (96.487 C), ΔS 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.

Na Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, V_{act} é decorrente da lentidão das reações que ocorrem na superfície dos eletrodos, pois uma parte da tensão gerada é perdida de maneira a conduzir a reação química que transfere os elétrons entre os eletrodos. Esta perda é calculada utilizando-se a Equação (9).

$$V_{act} = -\xi_1 - T(\xi_2 + \xi_3 \ln C_{O_2} + \xi_4 \ln i_{FC}) \quad (9)$$

Na qual C_{O_2} é a concentração de oxigênio na interface catalítica do catodo (mol/cm^3), determinado pela Equação (10), i_{FC} é a corrente elétrica que flui através da CaC, e ξ_i são coeficientes de parametrização definidos baseados em equações teóricas que levam em consideração fatores termodinâmicos, cinéticos e eletroquímicos (Xingqiang Zhao, 2015).

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

A perda ôhmica, V_{ohmic} , é a perda mais comum de energia em qualquer circuito elétrico. Nas CaCs, ela é devida à resistência ao transporte de elétrons do catodo para o anodo. V_{ohmic} é diretamente proporcional a corrente elétrica e figura como uma das principais fontes de perda de energia em células a combustível. Ela é calculada por meio da Equação (11), 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, ρ_M é a resistividade da membrana e L a sua espessura.

$$V_{ohmic} = i_{FC} \times (R_M + R_C) = i_{FC} \times \left(\frac{\rho_M \times L}{A_{fc}} + R_C \right) \quad (11)$$

Enquanto A_{fc} e L são parâmetros dimensionais mensuráveis, ρ_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 (12) (Brahim Laoun, 2016) para uma membrana do tipo Nafion, largamente utilizada em células de membrana polimérica.

$$\rho_M = \frac{\left[1 + 0.03 \left(\frac{i_{FC}}{A_{FC}} \right) + \left(\frac{T}{4887.0968} \right)^2 \left(\frac{i_{FC}}{A_{FC}} \right)^{2.5} \right]}{0.0055 \left[\psi - 0.634 - 3 \left(\frac{i_{FC}}{A_{FC}} \right) \right] e^{\left[\frac{T-303}{0.2392T} \right]}} \quad (12)$$

Na qual $0.0055(\psi - 0.634)$ é a resistividade específica da membrana ($\Omega \cdot \text{cm}$) a 30°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°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 ψ 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, respectivamente, e é definida pela equação a seguir:

$$V_{con} = -B \times \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (13)$$

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^2 . Valores típicos para J_{max} em uma célula a combustível de membrana polimérica variam entre 500 e

1500 mA/cm². Basicamente, a perda por transporte de massa acontece quando a célula a combustível está utilizando mais combustível ou oxigênio do que o sistema consegue fornecer.

3.1 Dinâmica

Quando dois materiais diferentes estão em contato, uma transferência de carga de um para o outro acontece. Em uma CaC, elétrons são acumulados na superfície do eletrodo e íons de hidrogênio são atraídos para a superfície do eletrólito. Dessa maneira, juntamente com o oxigênio que é fornecido ao catodo, a seguinte reação acontece:



A quantidade de reações que ocorrem na interface eletrodo/eletrólito 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.

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{i_{FC}}{C} - \frac{V_d}{\tau} \tag{15}$$

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 τ , definida de acordo com (16).

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

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 . 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, das tensão e potência de saída da pilha e das pressões parciais dos gases nos anodo e catodo.

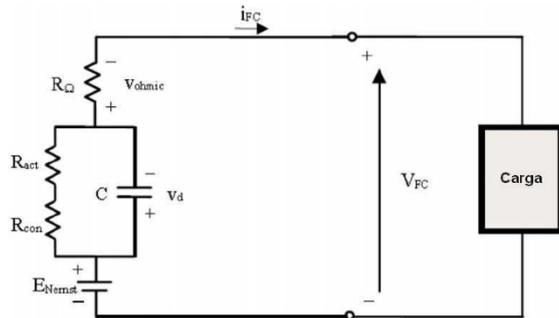


Figura 1 – Circuito elétrico equivalente de uma célula a combustível

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):

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

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

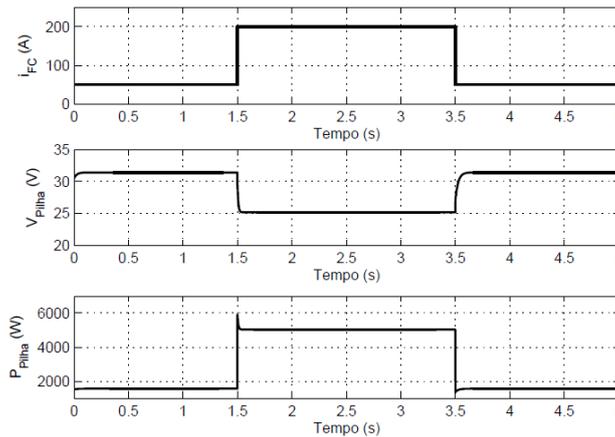


Figura 2 – Tensão e potência da CaC em função da inserção e retirada de carga

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	ϵ_3	7.60×10^{-5}
L	$178\mu\text{m}$	ϵ_4	1.93×10^{-4}
P_{H_2}	1 atm	T	343 K
P_{O_2}	1 atm	ψ	23
B	0.016 Volts	J_{MAX}	$960\text{mA}/\text{cm}_2$
R_C	$0.3\text{m}\Omega$	C	3 F
ϵ_1	-0.948	n	42
ϵ_2	$0.00286 + 0.0002 \ln A + (4.3 \times 10^{-5}) \ln c_{H_2}$		

3.2 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) (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), λ 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.

3.3 Eficiência

O cálculo da eficiência da CaC (η_{FC}) é feito de acordo com a Equação (22), na qual μ_f é o

coeficiente de utilização de combustível.

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

4. Motor Elétrico

Um modelo dinâmico para um motor elétrico de indução, incluindo conversores AC/DC e DC/AC, aplicável ao estudo de veículos híbridos é apresentado em [14] e [15]. Tal modelo é aqui implementado como um subsistema do veículo, com os parâmetros apresentados na Tabela 2, na qual: L_r , L_s , L_h são as indutâncias do rotor, do estator e mútua, respectivamente, R_r , R_s as resistências do rotor e do estator, J é o momento de inércia do rotor do motor, N_r é a quantidade de pares de pólos, R é a resistência da armadura.

Do ponto de vista do controle, o objetivo é fazer o motor seguir um torque de referência, ou seja, 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. Para alcançar este objetivo, o controlador por modos deslizantes proposto por [16] é aqui implementado. O controle é realizado por meio da tensão no estator, sendo suas componentes nas coordenadas u_α e u_β os dois sinais atuantes para fazer o motor seguir o torque de referência. O fluxo é controlado para que não atinja valores muito baixos ou próximos da região de saturação e assume-se que as correntes e a velocidade de rotação do rotor são conhecidas, e o fluxo magnético perfeitamente estimado. Assume-se, adicionalmente, que o torque do mecânico do motor é medido.

Tabela 2 – Parâmetros do motor.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
L_r	$650 \times 10^{-6} H$	R_s	0,035 Ω
L_s	$650 \times 10^{-6} H$	N_r	2
L_h	$610 \times 10^{-6} H$	R	0,01 Ω
R_r	0,015 Ω	J	$4,33 \times 10^{-4} kg.m^2$

5. Dinâmica do veículo

A dinâmica do veículo é determinada utilizando-se a segunda lei de Newton. O sinal de entrada do sistema é o torque proveniente do motor elétrico e a saída (velocidade do veículo) é realimentada e controlada de acordo com a solicitação do motorista, conforme a Equação (23).

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} \left(\frac{\tau_{ref} - \tau_b}{r_{roda}} - \frac{Bv}{r_{roda}^2} - F_r - F_a \right) \quad (23)$$

na qual τ_{ref} é o torque gerado pelo motor elétrico (torque de referência), τ_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 (24) e (25), respectivamente, sendo C_a o coeficiente de arraste aerodinâmico, ρ_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.

$$F_r = C_{rolamento} \times F_n \quad (24)$$

$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho_a A v^2 \quad (25)$$

Os parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 3 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 3, g representa a aceleração da gravidade.

Tabela 3 – Parâmetros do veículo.

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

5.1 Representação do motorista

O motorista é quem impõe a velocidade ao veículo atuando nos pedais do acelerador e do freio. Ele 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. A função de transferência para a dinâmica do veículo, desconsiderando-se o fator quadrático na Equação (23), é dada pela Equação (26):

$$\frac{V(s)}{\tau_{ref}(s)} = r \left(\frac{1}{s + \frac{B}{Mr^2}} \right) \quad (26)$$

A função de transferência do controlador PI é dada pela Equação (27).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (27)$$

Na qual K_p representa o ganho proporcional e T_i o tempo integral. 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 $T_i = 80$.

6. Validação

Para validar a aplicação do modelo dinâmico desenvolvido para o VEH, uma estratégia de gerenciamento de potência simples é aplicada, tal como descrito a seguir. O objetivo é exemplificar a utilidade do modelo aqui proposto na avaliação de desempenho de um VEH, comprovando que o mesmo pode ser utilizado como base para estudos mais abrangentes.

O ciclo de condução desejado pelo motorista pode ser simulado utilizando-se ciclos normatizados que reproduzem situações de condução diversas. Neste trabalho, o ciclo denominado *Federal Urban Driving Schedule* (FUDS), estabelecido pela agência de proteção ambiental norte-americana (EPA), é utilizado. O ciclo representa condições de condução em

idades, com baixas velocidades e muitas situações de aceleração e frenagem e tem as suas principais características resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do ciclo de condução FUDS.

Distância (km)	11,8
Duração (s)	1372
Velocidade média (km/h)	31,4
Velocidade máxima (km/h)	91,2
Quantidade de paradas	18

6.1 Controle e gerenciamento de potência

O controle do veículo pode ser resumido nos seguintes passos: 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 atingir 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. Cabe ressaltar que 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 a com a capacidade das fontes de energia fornecerem a potência necessária.

Além da potência para que o veículo realize o ciclo de condução, as fontes do veículo devem também ser capazes de prover potência para utilização dos sistemas auxiliares tais como ar condicionado, rádio, vidros elétricos, iluminação interna, etc. Nos resultados que seguem, foi adicionado uma potência média de 2kW de maneira a representar a solicitação média de potência dos sistemas auxiliares de um veículo leve (Larminie, et al., 2012).

Em VECaCs híbridos regenerativos é possível aproveitar energia de frenagem. Nesse tipo de veículo, pode-se utilizar tanto a pilha de CaCs quanto o banco de baterias como principal fonte de energia. Nos veículos em que a pilha de CaCs é a fonte principal, a estratégia de gerenciamento de potência consiste em fazer com que a solicitação de potência à pilha de CaCs siga a solicitação do motorista exceto em situações nas quais a eficiência da pilha atinja um valor mínimo determinado, ou durante frenagem. Quando a eficiência da pilha decai a um limite mínimo pré-estabelecido, a solicitação de potência à mesma é limitada ao valor corrente, para evitar que a eficiência diminua ainda mais. A potência adicional que deve ser fornecida ao veículo é obtida do banco de baterias.

O SOC é limitado entre os valores SOC_{min} e SOC_{max} e o BB pode ser carregado por meio do aproveitamento de energia de frenagem ou diretamente pela pilha de células a combustível. Nesse caso, a potência de carga fornecida pela pilha é limitada pela potência máxima que a pilha pode fornecer e pela diferença entre este valor e a potência solicitada pelo motorista.

A Figura 3 apresenta a distribuição de potência quando a estratégia de controle é aplicada em uma simulação na qual o veículo deve seguir o ciclo de condução FUDS. O SOC inicial do BB foi fixado em 50%. O banco de baterias é composto por 12 (doze) baterias do tipo chumbo ácido de 12 V (6 células), semelhantes as utilizadas hoje em dia em veículos leves convencionais. A figura evidencia a distribuição da potência entre as fontes de energia. Pode-se perceber que, sendo o SOC inicial da bateria definido em um valor inferior ao especificado como ideal (55%, nesse exemplo), a bateria é carregada ao longo de aproximadamente 620 segundos, até que atinja este último. A carga é realizada sempre que há energia regenerativa, ou seja, quando o motor elétrico opera como gerador (P_{motor} negativa), ou quando a potência requisitada pelo motor é menor do que a pilha de CaCs pode fornecer. Neste caso, a diferença é utilizada para carregar a bateria. É possível observar, também, que a carga da bateria é

interrompida sempre que a potência que deve ser fornecida ao motor elétrico excede a capacidade da pilha de células a combustível. Nessas situações, o excedente é requisitado ao banco de baterias, desde que o estado de carga não seja inferior ao limite mínimo estabelecido. A partir do momento em que a bateria atinge o SOC ideal, ela passa a não mais ser carregada pela pilha de CaCs, mas apenas pela energia proveniente da frenagem, quando disponível. ‘

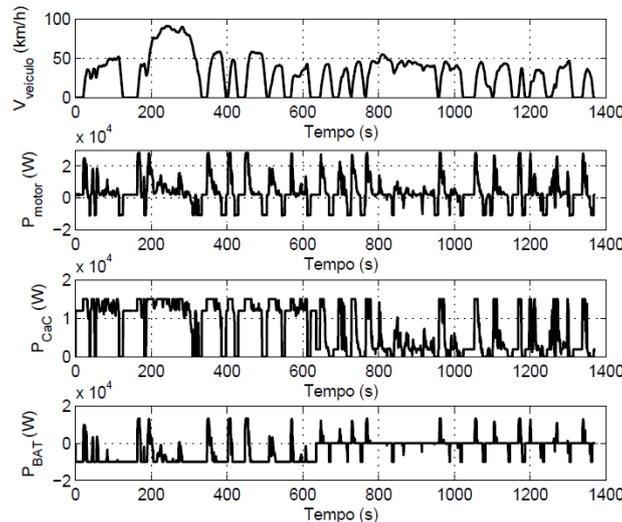


Figura 3 – VECaC híbrido regenerativo com pilha de CaCs como fonte de energia principal.

6.2 Comparação com veículos convencionais

Para comparar o consumo dos VECaCs com o de veículos 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 (28) (Cho, 2004).

$$Ceq_{km} = k \times \frac{PCI_{gas} \times \rho_{gas} \times D}{\frac{E_{bat}}{\eta_{CaC} \times \eta_{bat}} + (m_{H_2} \times PCI_{H_2})} \tag{28}$$

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), respectivamente, ρ_{gas} é a densidade da gasolina (755kg/m³), D é a distância em metros percorrida pelo veículo, E_{bat} é a energia consumida pelo BB (KJ), η_{CaC} e η_{bat} são as eficiências médias da pilha de CaCs e do BB, respectivamente, e $k = 1000$ representa os fatores de conversão de unidades (kJ para MJ , m^3 para l e m para km). Determinado de acordo com (28), o consumo equivalente de gasolina para o VECaCs híbrido regenerativo aqui apresentado é de 39,07 km/l. Considerando que o consumo do veículo utilizado como referência gira em torno de 12 km/l de gasolina, os resultados mostram o menor consumo de combustível para veículos de célula a combustível se comparados a veículos convencionais propelidos através de motor de combustão interna.

7. Conclusões

Este trabalho apresentou a modelagem matemática e a implementação computacional que viabiliza a análise do comportamento dinâmico de um veículo elétrico híbrido de célula a combustível, o qual permite avaliar o desempenho do veículo quando submetido a 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 que realiza o gerenciamento de potência entre as fontes de energia. A implementação computacional

foi feita com parâmetros que definem um veículo leve de passeio, permitindo a comparação do consumo de energia do veículo híbrido com veículos de tamanho semelhante equipados com motores de combustão interna. Os resultados baseados em uma estratégia de gerenciamento de potência que inclui a capacidade de regeneração de energia e um ciclo de condução normatizado validam o modelo proposto para a representação de veículos elétricos de célula a combustível, indicando que este é uma boa base para a investigação de diferentes estratégias de controle e gerenciamento de potência.

Agradecimentos

O autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo auxílio na realização deste trabalho.

Referências

- Brahim Laoun Mohamed W. Naceur, Abdallah Khellaf, Arunachala M. Kannan** Global sensitivity analysis of proton exchange membrane fuel cell model [Revista] // International Journal of Hydrogen Energy. - 2016. - 42 : Vol. 1. - p. 9521-9528.
- C.Y. Wong W.Y. Wong, K. Ramya, M. Khalid, K.S. Loh, W.R.W. Daud, K.L. Lim, R. Walvekar, A.A.H. Kadhum** Additives in proton exchange membranes for low- and high-temperature fuel cell applications: A review [Articelo] // International Journal of Hydrogen Energy. - March 2019. - 12. - Vol. 44. - p. 6116-6135.
- Cho Hyoung Yeon** A new power control strategy for hybrid fuel cell vehicles [Revista]. - 2004.
- Daniel F. Opila Xiaoyong Wang, Ryan McGee, R. Brent Gillespie, Jeffrey A. Cook, Jessy W. Grizzle** An Energy Management Controller to Optimally Trade Off Fuel Economy and Drivability for Hybrid Vehicles [Articelo] // IEEE Transactions on Control Systems Technology. - 1 Novembro 2012. - Vol. 20. - p. 1490-1505.
- Global Carbon Project** Global Carbon Atlas [Online]. - 2018. - 2018. - <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.
- Instituto Nacional de Eficiência Energética** Sobre veículos elétricos [Online]. - 11 Fevereiro 2020. - http://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh.
- Junior Vicente Nunes** Estudo das principais vantagens do uso da frenagem regenerativa em veículos híbridos [Revista]. - São Caetano do Sul : [s.n.], 2014.
- Larminie James e Lowry John** Electric Vehicle Technology Explained [Libro]. - [s.l.] : John Wiley and Sons Ltd, 2012. - 2nd.
- Mallouh Mohammed Abu [et al.]** Model development and analysis of a mid-sized hybrid fuel cell/battery vehicle with a representative driving cycle [Articelo] // Journal of Power Sources. - 2014. - Vol. 260. - p. 62-71.
- Meyer R. T. [et al.]** Hybrid model predictive power management of a fuel cell-battery vehicle [Articelo] // Asian Journal of Control. - Março 2013. - Vol. 15. - p. 363-379.
- N. Mebarki T. Rekioua, Z. Mokrani, D. Rekioua, S. Bacha** PEM fuel cell/ battery storage system supplying [Articelo]. - 2016. - 45 : Vol. 41. - p. 20993-21005.
- Rand Andrew L. Dicks David A. J.** Fuel Cell Systems Explained [Libro]. - [s.l.] : John Wiley & Sons Ltd, 2018. - Third.
- Utkin Vadim I.** Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives [Revista] // TIE. - 1993. - 40 : Vol. 1. - p. 23-36.
- Vadim Utkin Juergen Guldner, Jingxin Shi** Sliding mode control in electromechanical systems [Libro]. - [s.l.] : CRC Press, 2009.
- Wang J. [et al.]** Hybrid Electric Vehicle Modeling Accuracy Verification and Global Optimal Control Algorithm Research [Articelo] // International Journal of Automotive Technology. - 2015. - Vol. 16. - p. 513-524.
- Xingqiang Zhao Yankun Li, Zhixiang Liu** Thermal management system modeling of a watercooled proton exchange membrane fuel cell [Revista] // International Journal of Hydrogen Energy. - 2015. - 7 : Vol. 40. - p. 3048-3056.
- Yan Wenguang [et al.]** Power Flow Control for Hybrid Electric Vehicles [Revista] // 8th IEEE Workshop on Variable Structure Systems. - 2004. - p. 1-6.