



ESTRATÉGIA DE MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO EQUIVALENTE APLICADA AO GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL

TÉO CERQUEIRA REVOREDO

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Rua São Francisco Xavier nº 524, Sala 5001-E, Maracanã, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

(Recibido 3 de abril de 2018, revisado 15 de abril de 2019, para publicación 31 de mayo de 2019)

Resumo – Veículos movidos através da queima de combustíveis fósseis são a grande maioria da frota mundial atual, e contribuem por aproximadamente 13% da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre. A par do problema e da necessidade de solucioná-lo, muitos países já anunciaram metas para reduzir ou eliminar o uso de veículos movidos por derivados de petróleo nas próximas décadas, e os principais fabricantes de automóveis vêm pesquisando e desenvolvendo automóveis que utilizam fontes alternativas de energia. Dentre as tecnologias que despontam estão os veículos elétricos híbridos movidos a hidrogênio. Entretanto, a sua utilização em larga escala ainda demanda muita pesquisa e desenvolvimento. Nesse contexto, este trabalho apresenta um modelo dinâmico para um veículo elétrico híbrido de célula a combustível e discute estratégias para o gerenciamento de potência entre as suas fontes de energia. Especial atenção é dada à uma estratégia de minimização do consumo equivalente. Resultados de implementações computacionais são apresentados, que comprovam o menor consumo dos veículos elétricos híbridos de célula a combustível com relação aos convencionais propelidos por motores de combustão interna, bem como o melhor desempenho obtido pela técnica de minimização de consumo. O modelo desenvolvido pode ser facilmente adaptado a diferentes tipos de automóveis e servir de base para a realização de estudos mais amplos.

Palavras-chave – Veículos híbridos, célula a combustível, gerenciamento de potência, estratégia de minimização do consumo equivalente.

1. INTRODUÇÃO

A quantidade de veículos nas ruas do mundo é hoje a maior da história. Desses, a maior parte é ainda propelida por motores que queimam combustíveis fósseis, os quais contribuem fortemente nas mais de 36×10^9 toneladas de gás carbônico que são anualmente despejadas na atmosfera [1]. Desse modo, a busca por soluções para preservar o planeta Terra para as gerações futuras passa necessariamente pelo projeto de veículos que favoreçam a redução da poluição atmosférica. Nesse contexto, veículos propelidos por fontes sustentáveis de energia são o tema central. Não por acaso, os principais fabricantes do mundo vêm pesquisando e desenvolvendo veículos que utilizam fontes alternativas de energia e vários países já anunciaram metas para reduzir o problema: A Alemanha se comprometeu a banir os veículos alimentados por combustíveis fósseis até 2030, A Inglaterra irá interromper a venda de novos veículos movidos a derivados do petróleo a partir 2040 e, na Noruega e na Índia, apenas veículos totalmente elétricos serão comercializados a partir de 2015 e 2030, respectivamente.

A busca por fontes de energia sustentáveis para equipar os veículos terrestres tem levado pesquisadores a investigar desde energia solar e gases comprimidos até combustíveis a base de algas e álcool. Entre as tecnologias que despontam estão os veículos elétricos [2] e os movidos a hidrogênio. As principais fabricantes de automóveis já têm versões comerciais de veículos desse tipo, embora o seu estabelecimento como real sucessor dos atuais e a sua utilização em larga escala ainda demandem muita pesquisa e desenvolvimento.

Além de veículos com uma única fonte de energia alternativa, uma composição recorrente e útil é a utilização de mais de uma fonte em um mesmo automóvel. Nesse caso, os mesmos são denominados híbridos

(VEHs), e são classificados em três categorias de acordo com a sua arquitetura [3], [4], [5]: Na configuração série, a força de tração que chega as rodas é transmitida por um ou mais motores elétricos. Na configuração em paralelo, o veículo pode ser propelido diretamente pelo motor de combustão interna, através de um sistema de engrenagens e/ou por intermédio de motores elétricos alimentados por outra(s) fonte(s). Na configuração split cada um dos eixos do automóvel é alimentado por uma fonte de energia diferente.

Outra classificação bem difundida divide os VEHs entre mantenedores ou esgotadores de carga. Os primeiros são capazes de manter a carga da bateria entre limites determinados em qualquer situação de condução, e os demais não possuem essa capacidade e precisam ser conectados à rede elétrica periodicamente para recarregar a bateria.

O uso de fontes de energia distintas em um mesmo automóvel requer uma estratégia de gerenciamento de potência que divida a solicitação de potência entre as fontes e confira ao veículo um desempenho adequado [6], [7]. A estratégia de gerenciamento de potência pode ser realizada por diferentes abordagens, agrupadas em três categorias, a saber: Técnicas heurísticas; Métodos estáticos de otimização e Métodos dinâmicos de otimização. As técnicas heurísticas são bem exploradas na literatura [8], [9], [10] e têm a seu favor a facilidade e o baixo custo de implementação, embora geralmente não explorem de maneira completa veículos complexos. 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, utilizando mapas de eficiência. Portanto, são métodos de otimização instantânea de acordo com as variáveis do sistema em cada instante de tempo. O método mais difundido desta classe é denominado estratégia de minimização do consumo equivalente (ECMS, do inglês *Equivalent Consumption Minimization Strategy*). Um exemplo de aplicação dessa técnica em um VEH propelido por um motor de combustão interna (MCI) e um Banco de Baterias (BB) pode ser encontrado em [11]. Os métodos dinâmicos de otimização consideram a dinâmica do sistema e a otimização passa a ser considerada de acordo com um horizonte de tempo, ao invés de instantes específicos. Embora tenha a capacidade de otimização global, esses métodos tem as desvantagens de serem dependentes do ciclo de condução e não podem ser implementados em tempo real. Um exemplo de aplicação é encontrado em [12] e [13], onde o gerenciamento de energia para um caminhão híbrido com configuração em paralelo é feito.

Nesse contexto, esse trabalho apresenta a modelagem de um veículo leve de passeio propelido por um banco de baterias em conjunto com uma pilha de células à combustível e desenvolve estratégias para o gerenciamento da potência solicitada ao veículo para diferentes condições de condução. O foco do trabalho é a implementação de um algoritmo de minimização do consumo equivalente, sendo o resultado comparado com outras estratégias de controle heurísticas.

O trabalho é organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta de maneira resumida o modelo do veículo, composto por um banco de baterias, uma pilha de CaCs, um motor elétrico de indução e o controlador a ele associado, a dinâmica do veículo e um emulador das reações do motorista. Na Seção 3 é discutida uma estratégia de controle empregada para o gerenciamento da potência de um veículo elétrico regenerativo baseada em regras e apresentados resultados de simulação que refletem o seu desempenho. A Seção 4 apresenta a técnica de minimização do consumo equivalente (ECMS), e é seguida pelas Seções 5 e 6 que descrevem o procedimento de otimização e a função de penalização empregada em detalhes. Na Seção 7 são apresentados resultados do uso da técnica ECMS e na Seção 8 são realizadas considerações finais sobre o trabalho.

2. MODELO DO VECaC

2.1. Banco de Baterias

Pode-se calcular o tempo de descarga de uma bateria em função da corrente drenada pela carga e do cálculo de uma capacidade de carga de referência, denominada Capacidade de Peukert, dada pela Equação (1) [3], na qual t é o tempo de descarga, C a capacidade nominal da bateria, I_{bat} é a corrente elétrica requerida e k é uma constante denominada Coeficiente de Peukert.

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

Seja um intervalo de tempo δt , em segundos, no qual uma corrente constante, I_{bat} , é solicitada a bateria. A carga removida após n intervalos de tempo, Q_n , em Ah, é dada pela Equação (2) [3].

$$Q_n = Q_{n-1} + \frac{\delta t \times [I_{bat}]^k}{3600} \quad (2)$$

Em tempo contínuo, com $\delta t \rightarrow 0$, pode-se reescrever esta equação na forma:

$$Q(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} [I_{bat}(t)]^k dt \quad (3)$$

A Equação (3) fornece a quantidade de carga (energia) que é retirada da bateria em um determinado intervalo de tempo. Considerando a razão entre esta energia e a capacidade original da bateria, o estado de carga (SOC) é calculado através da subtração deste valor do estado inicial (100%), como segue:

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

A tensão de circuito aberto (E) depende do SOC e do número de células que compõem a bateria (n), e é determinada através da Equação (5) [3].

$$E = n \times [2 + 0.15(SOC)] \quad (5)$$

Utilizando-se a lei de Ohm, pode-se determinar a tensão entre os terminais da bateria de acordo com a Equação 6, na qual R_{int} denota a sua resistência interna.

$$V = E - R_{int}I = E - \left(n \times \frac{0.022}{I_{10}}\right) I \quad (6)$$

O dimensionamento do banco de baterias pode ser realizado considerando critérios de desempenho baseados em veículos existentes. Por exemplo: Seja um VEB equivalente a um veículo leve de passeio com motor de 1000 cilindradas movido à gasolina. O consumo médio de combustível deste último é aproximadamente 12 km/l. Sendo a energia específica da gasolina 12 kWh/kg e considerando eficiência de 10% para o conjunto motor de combustão interna e engrenagens, tem-se 1,2 kWh por quilograma de combustível transmitido às rodas. Para uma autonomia de 120km, seriam necessários 10 litros de gasolina para que o automóvel convencional alcançasse o objetivo, o que equivale à aproximadamente 8,03 kg do combustível em questão, considerando uma densidade de 803 kg/m³. Essa quantidade de combustível transmite às rodas 9,636 kWh. Para um VEB, essa energia deve ser fornecida pelo banco de baterias e pode ser determinada pela divisão deste valor pela eficiência do motor elétrico. Sendo esta de 70%, o BB precisaria prover aproximadamente 13,766 kWh. Para baterias do tipo chumbo ácido, isso implica em algo em torno de 393 kg.

2.2. Pilha de células a combustível

A tensão de uma célula a combustível pode ser definida como [14], [15] :

$$V_{FC} = E_{nerst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (7)$$

Na qual E_{nerst} é o potencial termodinâmico da célula (voltagem 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. E_{nerst} é calculado como segue:

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

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 (7), V_{act} representa a parte da tensão gerada pela célula que é perdida para desempenhar a reação química que transfere os elétrons entre os eletrodos e é calculada através da Equação (9).

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

Na qual C_{O_2} é a concentração de oxigênio na interface catalítica do catodo (mol/cm³), i_{FC} é a corrente elétrica que flui através da CaC, e ξ_i são coeficientes de parametrização cujos valores são definidos baseados em equações teóricas que consideram fatores termodinâmicos, cinéticos e eletroquímicos [16].

A perda ôhmica, V_{ohmic} , é devida a resistência ao transporte de elétrons do catodo para o anodo e figura como uma das principais fontes de perda de energia em CaCs. A perda ôhmica é calculada através da Equação (10), na qual R_M e R_C são as resistências equivalente da membrana e a resistência a transferência de prótons através da membrana, respectivamente, A_{fc} é a área da célula a combustível, ρ_M é a resistividade da membrana e L a sua espessura.

$$V_{ohmic} = i_{FC} \times (R_M + R_C) = i_{FC} \times \left(\frac{\rho_M \times L}{A_{fc}} + R_C \right) \quad (10)$$

Enquanto A_{fc} e L são parâmetros dimensionais mensuráveis, ρ_M é função do tipo e da umidificação da membrana da CaC, da temperatura de operação e da densidade de corrente [16].

Ainda com relação à Equação (7), V_{con} é resultado da diminuição da concentração de oxigênio e/ou hidrogênio no catodo e no anodo, respectivamente, e é definida de acordo com a equação a seguir.

$$V_{con} = -B \times \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (11)$$

na qual B (Volts) é um coeficiente de parametrização que depende da célula e de seu estado de operação e J e J_{max} são as densidades atual e limite de corrente (mA/cm²).

A quantidade de reações químicas que ocorrem na interface eletrodo/eletrolito depende da densidade de elétrons e íons de hidrogênio nas superfícies de ambos. 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 se dissipe ou aumente. Esse atraso pode ser equacionado como segue.

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{i_{FC}}{C} - \frac{V_d}{\tau} \quad (12)$$

na qual V_d representa a voltagem dinâmica da célula a combustível, equivalente a voltagem sobre uma capacitância elétrica C , com uma constante de tempo τ , definida de acordo com a Equação (13). Nesta, R_a é a resistência equivalente e a soma $V_{act} + V_{con}$ é igual a V_d na Equação (12).

$$\tau = C \times R_a = C \times \left(\frac{V_{act} + V_{con}}{i_{FC}} \right) \quad (13)$$

A tensão e a potência da pilha de CaCs, V_{pilha} e P_{pilha} , respectivamente, são encontradas através da multiplicação da tensão (V_{FC}) e da potência (P_{CaC}) de uma célula pelo número de células que compõem a pilha (n). A tabela 1 apresenta valores de referência para uma pilha de CaCs do tipo membrana polimérica (PEM, do inglês *Proton Exchange Membrane*) tal como a utilizada nesse trabalho.

A vazão de hidrogênio consumido é calculada em função da massa molar (M_{H_2} , em g/mol) do hidrogênio e da corrente elétrica que flui através da célula (i_{FC}), de acordo com a Equação (14) [1]. Para encontrar o consumo de uma pilha de células a combustível basta multiplicar a Equação (14) pelo número de células da pilha (n).

Tabela 1. Parâmetros da pilha de células a combustível.

| Parâmetro | Valor |
|-----------------|---|
| Afc | 232cm^2 |
| L | $178\mu\text{m}$ |
| PH_2 | 1 atm |
| PO_2 | 1 atm |
| B | 0.016 Volts |
| R_C | $0.3\text{m}\Omega$ |
| ε_1 | -0.948 |
| ε_2 | $0.00286 + 0.0002 \ln A + (4.3 \times 10^{-5}) \ln c_{H_2}$ |
| ε_3 | 7.60×10^{-5} |
| ε_4 | 1.93×10^{-4} |
| T | 343 K |
| ψ | 23 |
| J_{MAX} | 960mA/cm_2 |
| C | 3 F |
| n | 42 |

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = M_{H_2} \times \frac{i_{FC}}{2F} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (14)$$

A eficiência de uma CaC (η_{FC}) pode ser definida como a relação entre sua tensão de operação e a tensão que seria gerada caso a mesma estivesse operando sem perdas, considerando também o coeficiente de utilização de combustível (μ_f), que é a relação entre a quantidade de combustível reagente e a quantidade de combustível total alimentada à CaC. Portanto, o cálculo da eficiência da CaC é feito de acordo com a Equação (15).

$$\eta_{FC} = \mu_f \times \frac{V_{FC}}{1.48} \times 100\% \quad (15)$$

2.3. Motor elétrico

Um modelo dinâmico para um motor elétrico de indução aplicável ao estudo de veículos híbridos é apresentado em [2] e [3]. As equações dinâmicas, dadas em coordenadas (α, β) , são apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= \beta\eta\psi_\alpha + \beta\omega\psi_\beta - \gamma i_\alpha + \frac{1}{\sigma L_s} u_\alpha \\ \frac{di_\beta}{dt} &= \beta\eta\psi_\beta - \beta\omega\psi_\alpha - \gamma i_\beta + \frac{1}{\sigma L_s} u_\beta \\ \frac{d\psi_\alpha}{dt} &= -\eta\psi_\alpha - \omega\psi_\beta + \eta L_h i_\alpha \\ \frac{d\psi_\beta}{dt} &= -\eta\psi_\beta + \omega\psi_\alpha + \eta L_h i_\beta \\ T &= \frac{3N_r L_h}{2L_r} (i_\beta \psi_\alpha - i_\alpha \psi_\beta) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (T - T_l) \end{aligned} \quad (16)$$

nas quais:

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

$$\sigma = 1 - \frac{L_h^2}{L_S L_r}; \gamma = \frac{R_S + \frac{L_h^2}{L_r} R_r}{\sigma L_S} \quad (17)$$

e i_α, i_β são as componentes da corrente no estator nas coordenadas (α, β) , ψ_α, ψ_β são as componentes do fluxo magnético no rotor nas coordenadas (α, β) , u_α, u_β são as componentes da voltagem no estator nas coordenadas (α, β) , 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, ω = 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 pólos.

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. A corrente é obtida através da Equação (18) [3].

$$i = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (18)$$

Uma vez modelada a dinâmica e o controlador para o motor, o passo seguinte será distribuir a solicitação de potência entre a pilha de CaCs e o BB. Essa tarefa é realizada pelo controlador do veículo. As potências elétrica e mecânica do motor elétrico são calculadas de acordo com as Equações (19) e (20), respectivamente, onde u é a tensão elétrica fornecida ao motor.

$$P_{el} = u \times i \quad (19)$$

$$P_{mec} = T \times \omega \quad (20)$$

Sejam as seguintes equações de erro [3]:

$$S_T = T - T^* \quad (21)$$

$$S_\psi = c(\psi - \psi^*) + (\dot{\psi} - \dot{\psi}^*) \quad (22)$$

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

$$S = \begin{bmatrix} S_T \\ S_\psi \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} -\psi_\beta & \psi_\alpha \\ \psi_\alpha & \psi_\beta \\ \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} & \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

\dot{S} pode ser encontrada através da Equação 1, e pode ser escrita como:

$$\dot{S} = f_1(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) + c_1 D \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (24)$$

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 [4]:

$$S^* = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = D^{-1} S \quad (25)$$

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

$$S^* = \dot{D}^{-1} S + D^{-1} \dot{S} = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) + c_1 \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (26)$$

na qual $f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)$ é função contínua e limitada. Multiplicando-se os dois lados da Equação (26) por S^* , tem-se:

$$S^* \dot{S}^* = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) S^* + c_1 u S^* \quad (27)$$

Selecionando a lei de controle tal como:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= -u_0 \text{sign}(S_1) \\ u_\beta &= -u_0 \text{sign}(S_2) \end{aligned} \quad (28)$$

e substituindo-se u na Equação (27), tem-se:

$$S^* \dot{S}^* = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) S^* - c_1 u_0 |S^*| \quad (29)$$

ou ainda:

$$S^* \dot{S}^* \leq -c_1 u_0 |S^*| \quad (30)$$

uma vez que $f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)$ é limitada, e é possível encontrar $u_0 \geq |f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)|$. Deste modo, 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.

A tabela 2 [2] apresenta os parâmetros do motor elétrico utilizados como referência para as simulações realizadas nesse trabalho.

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 [2]. Ademais, para a implementação do controlador é necessário converter as tensões no estator, u_α e u_β , para tensões de fase, u_a , u_b e u_c , o que pode ser realizado através da transformação linear a seguir [2]:

$$[u_a u_b u_c]^T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^T [u_\alpha u_\beta]^T \quad (31)$$

2.4. Dinâmica do veículo

O sinal de entrada para a dinâmica do veículo é o torque proveniente do motor elétrico e a saída (velocidade do veículo) é realimentada e controlada de acordo com a solicitação do motorista. A Equação (32) apresenta esta dinâmica [5].

Tabela 2. Parâmetros do motor elétrico.

| Parâmetro | Valor |
|-----------|------------------------------|
| L_r | $650 \times 10^{-6} H$ |
| L_s | $650 \times 10^{-6} H$ |
| L_h | $610 \times 10^{-6} H$ |
| R_r | $0,015 \Omega$ |
| R_r | $0,035 \Omega$ |
| N_r | 2 |
| R | $0,01 \Omega$ |
| r | $0,01 \Omega$ |
| C | 100F |
| J | $4,33 \times 10^{-4} kg.m^2$ |
| u_0 | 50V |

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} \left(\frac{\tau_{ref} - \tau_b}{r_{roda}} - \frac{Bv}{r_{roda}^2} - F_r - F_a \right) \quad (32)$$

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. F_r e F_a são dadas pelas Equações (33) e (34), respectivamente, sendo C_d 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.

$$F_r = C_{rolamento} \times F_n \quad (33)$$

$$F_a = \frac{1}{2} C_d \rho_a A v^2 \quad (34)$$

Os parâmetros utilizados nas simulações aqui apresentadas são listados na tabela 1 e foram, em sua maioria, obtidos do programa ADVISOR (simulador de veículos avançado, do inglês, *advanced vehicle simulator*), um programa 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, quantidades adicionais de massa foram utilizadas para os diferentes tipos de VECaCs em função do peso aproximado das fontes de energia. Na tabela 3, o termo g representa a aceleração da gravidade.

Tabela 3. Parâmetros do veículo.

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

2.5. Representação do Motorista

O motorista é quem impõe a velocidade ao veículo através da atuação nos pedais do acelerador e do freio. Ele fecha a malha de realimentação, medindo a velocidade do veículo e comparando com uma velocidade de referência. Esse comportamento pode ser modelado por um controlador proporcional e integral (PI) que irá atuar através do sinal de torque de referência para o motor elétrico [6]. A função de transferência do controlador PI é dada pela Equação (35), na qual K_p representa o ganho proporcional e T_i o tempo integral.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (35)$$

3. GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA BASEADO EM REGRAS

Os VECaCs podem ser classificados em três categorias [7]: os não-híbridos, os híbridos sem regeneração e os híbridos regenerativos.

Em VECaCs híbridos com regeneração, o BB permite o aproveitamento de parte da energia que seria desperdiçada durante frenagem. Essa é a principal vantagem deste tipo de veículo e o motivo pelo qual são mais difundidos [7], [8], [6].

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 irá seguir a solicitação do motorista (exceto durante frenagem), o que pode implicar em frequente funcionamento 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 banco de baterias 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 4.

Tabela 4. 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.

Cabe ressaltar que o sinal de referência (torque) transmitido ao motor elétrico pode não ser igual à solicitação do motorista. Este sinal poderá variar de acordo com a capacidade do motor elétrico em gerar o referido torque e a com a capacidade das fontes de energia fornecerem a potência necessária.

Além da potência para realizar 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 de 2 kW em cada instante de tempo para representar a solicitação média de potência dos sistemas auxiliares de um veículo leve [9].

3.2. 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 a bateria decorrente de altas correntes de carga e descarga é minimizada. O algoritmo é baseado em [7] e 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 energia proveniente do freio regenerativo. 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 banco de baterias provê a potência adicional necessária para propelir o veículo;
- 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 (36). A potência adicional necessária é fornecida pela pilha de CaCs. Quando o SOC do banco de baterias está abaixo do SOC ideal, a pilha de CaCs fornece a potência necessária para propelir o veículo além de um adicional para carregar o BB. Esse adicional é calculado de maneira semelhante à situação de descarga, tal como exposto na Equação (37).

$$P_{bat} = (P_{motor} - P_{CaC_{max}}) \times \Psi \quad (36)$$

$$P_{bat} = -P_{motor} \times \Psi \quad (37)$$

nas quais:

$$\Psi = \frac{\left(\frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2}\right) - SOC}{\left(\frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{2}\right)} \quad (38)$$

A Fig. 1 ilustra a lógica de controle. Nesta, $modo = 0$ indica modo de recarga rápida e $modo = 1$ indica modo de recarga normal. $f(SOC)$ representa o quociente das Equações (36) e (37).

A tabela 5 apresenta os resultados obtidos com a utilização da estratégia de controle descrita nesta seção para os ciclos de condução FUDS, HFET e SFTP.

Tabela 5. Consumo, $\bar{\eta}_{FC}$ e SOC para o VECaC híbrido regenerativo.

| Ciclo | Consumo de $H_2(kg)$ | Eficiência média ($\bar{\eta}_{FC}$) | 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% |

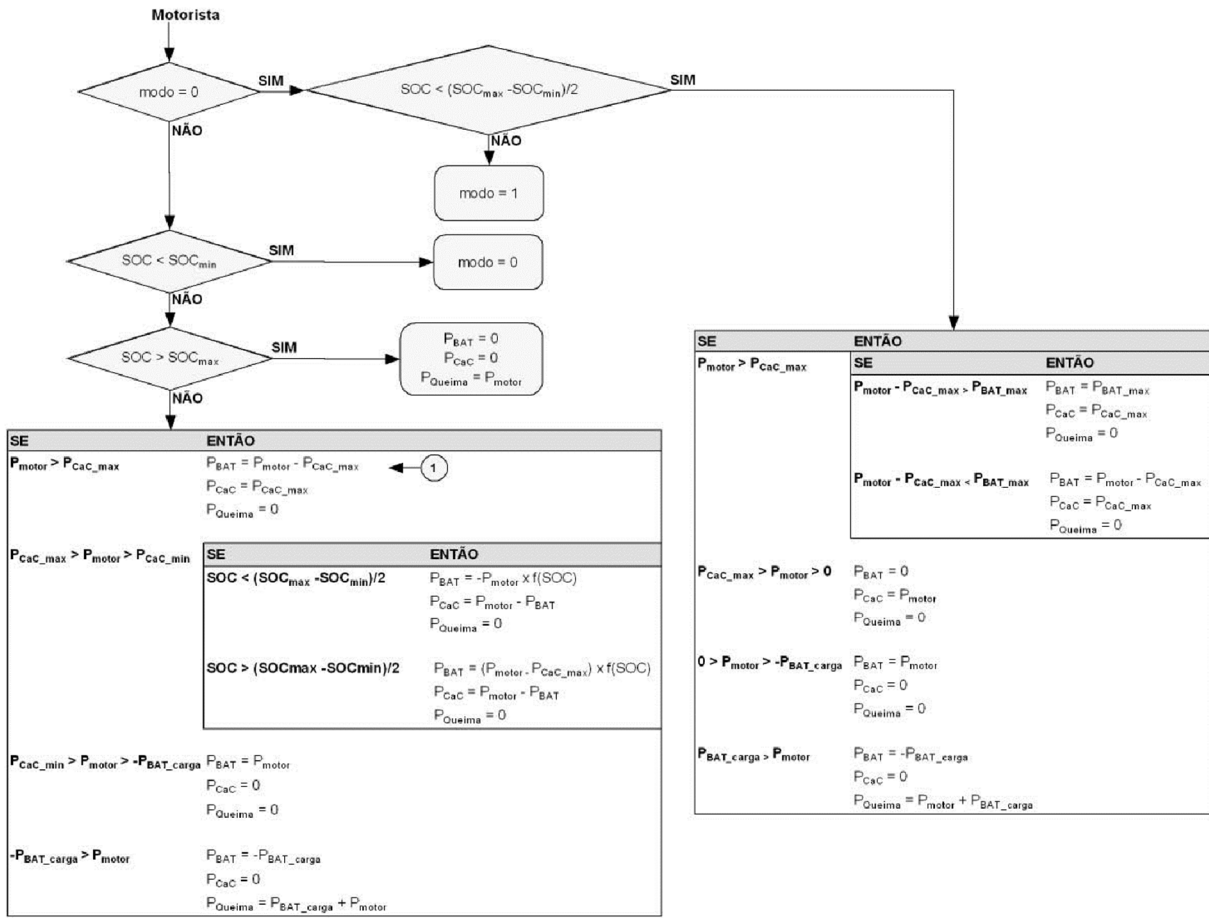


Fig. 1. Lógica de controle para veículos híbridos com penalidade para SOC e operação da pilha de CaCs fora de regiões de baixa eficiência.

4. ESTRATÉGIA DE MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO EQUIVALENTE

A principal ideia que norteia a aplicação da técnica ECMS para o gerenciamento de potência em VEHs, é a redução de um problema de otimização global para um problema de otimização instantânea, através da introdução de uma função de custo dependente apenas das variáveis do sistema em cada instante de tempo [10]. A definição desta função de custo requer um fator de equivalência que possibilite a comparação da energia elétrica com a energia do combustível utilizado pelo veículo.

Conforme discutido anteriormente, o gerenciamento de potência em veículos híbridos consiste na determinação da quantidade de potência que deve ser solicitada a cada uma das fontes de energia de maneira a satisfazer a solicitação do motorista e as restrições existentes no sistema. Além disso, almeja-se que o controlador seja capaz de realizar esta tarefa de maneira a alcançar o menor consumo de combustível possível. Este é um objetivo global, uma vez que a quantidade de combustível a ser minimizada é integral ao longo do tempo (ciclo de condução), enquanto as ações de controle são locais (realizadas em cada instante de tempo).

Matematicamente, o problema pode ser formulado para um veículo de célula a combustível como segue:

$$J = \int_0^{t_f} \dot{m}_{H_2} dt$$

$$\{P_{CaC}^{otim}(t), P_{BAT}^{otim}(t)\} = \arg \min_{\{P_{CaC}(t), P_{BAT}(t)\}} J \quad t = 0 \dots t_f \quad (39)$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$\begin{aligned} P_{motor}(t) &= P_{CaC}(t) + P_{BAT}(t) \\ SOC_{min} &\leq SOC(t) \leq SOC_{max} \forall t \\ 0 &\leq P_{CaC}(t) \leq P_{CaC,max} \\ P_{BAT,min} &\leq P_{BAT}(t) \leq P_{BAT,max} \end{aligned} \quad (40)$$

Na qual J é a função de custo, \dot{m}_{H_2} é o consumo de hidrogênio, P_{CaC} e P_{BAT} são as potências requisitadas a pilha de CaCs e ao banco de baterias, respectivamente, P_{CaC}^{otim} e P_{BAT}^{otim} são os valores ótimos para P_{CaC} e P_{BAT} , P_{motor} é a potência necessária ao motor elétrico para que a solicitação do motorista seja satisfeita ou a potência fornecida pelo ME durante frenagem regenerativa, SOC é o estado de carga do banco de baterias, SOC_{min} e SOC_{max} são os limites inferior e superior permitidos ao SOC , $P_{BAT,max}$, $P_{BAT,min}$ são os valores máximo e mínimo permitidos para P_{BAT} , e $P_{CaC,max}$ a máxima potência fornecida pela pilha de CaCs.

Este problema pode ser resolvido através da aplicação de programação dinâmica, entretanto para tal é necessário o conhecimento prévio do ciclo de condução [5], [6], [11], [10]. Uma abordagem alternativa consiste em substituir o critério global por um critério local, reduzindo o problema a uma otimização instantânea. Este critério pode ser formulado como segue:

No instante t :

$$\begin{aligned} J &= J(P_{CaC}(t), P_{BAT}(t)) \\ \{P_{CaC}^{otim}(t), P_{BAT}^{otim}(t)\} &= \arg \min_{\{P_{CaC}(t), P_{BAT}(t)\}} J \end{aligned} \quad (41)$$

Sujeito as restrições:

$$\begin{aligned} P_{motor}(t) &= P_{CaC}(t) + P_{BAT}(t) \\ SOC_{min} &\leq SOC(t) \leq SOC_{max} \forall t \\ 0 &\leq P_{CaC}(t) \leq P_{CaC,max} \\ P_{BAT,min} &\leq P_{BAT}(t) \leq P_{BAT,max} \end{aligned} \quad (42)$$

Devido à restrição de manutenção da carga da bateria (manutenção do SOC entre limites pré-estabelecidos), a função de custo deve levar em consideração, além do consumo de combustível (hidrogênio), as variações na quantidade de energia elétrica armazenada. Para tal, pode-se avaliar a função de custo em cada instante como sendo a soma do consumo de combustível ($\dot{m}_{CaC}(\cdot)$) com um consumo equivalente relacionado a utilização da bateria, tal como segue:

$$J = \dot{m}_{CaC}(P_{CaC}(t)) + \zeta(P_{BAT}(t)) \quad (43)$$

na qual $\zeta(P_{BAT}(t))$ representa o consumo de combustível equivalente a utilização da energia elétrica. Esta função é dependente de todas as condições de operação que levam a conversão da energia do combustível em energia elétrica e vice-versa, que pode ocorrer tanto no passado quanto no futuro. Por esse motivo, a função $\zeta(P_{BAT}(t))$ não pode ser avaliada exatamente.

Para que seja possível aplicar o critério local, é necessário que um fator de conversão entre a energia do combustível e a energia elétrica seja determinado. Existem algumas abordagens diferentes na literatura para a determinação deste fator. Estas abordagens podem ser encontradas em [12], [13] e [10].

Nesse trabalho, um fator de conversão simplificado será utilizado, tal como o apresentado em [14]:

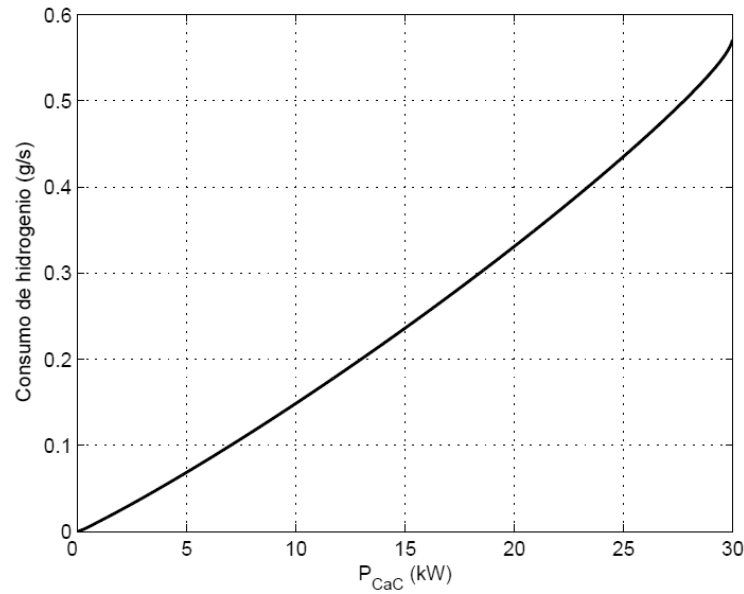


Fig. 2. Consumo de H₂ (g/s) de uma célula a combustível de 200 células em função da potência solicitada (kW).

$$\zeta(P_{BAT}(t)) = \frac{P_{BAT}}{\alpha_e PCI_{H_2}} \quad (44)$$

Na qual PCI_{H_2} é o poder calorífico inferior do hidrogênio e α_e é o custo médio da eletricidade (custo médio da conversão de energia do combustível em eletricidade e vice-versa).

O consumo de hidrogênio da pilha de CaCs em função da potência solicitada possui a forma apresentada na Fig. 2. A figura foi obtida em simulação para uma pilha de CaCs de 200 células.

Portanto, o consumo de hidrogênio em função da potência solicitada a CaC pode ser facilmente modelado por uma função polinomial. Na realidade, $\dot{m}_{CaC}(\cdot)$ possui comportamento semelhante a uma função linear de P_{CaC} no que diz respeito ao procedimento de minimização realizado em cada instante de tempo. Isso faz com que o problema de otimização seja simples e rápido de ser resolvido. A próxima seção discute esse fato.

5. PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO

Seja a função de custo:

$$J(x_1, x_2) = f(x_1) + f(x_2) = \alpha x_1 + \beta x_2, \alpha, \beta \in \Re \quad (45)$$

O objetivo do procedimento de otimização é encontrar o par $[x_1, x_2]$ que minimiza $J(x_1, x_2)$. Seja a restrição $r(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = K$. As Fig. 3 e 4 apresentam gráficos de $J(x)$ e $r(x)$ para diferentes valores de α e β .

O custo mínimo alcançável para um determinado valor de $r(x)$ será o ponto onde a reta tangencia $J(x_1, x_2)$. Portanto, para $\alpha > \beta$, o custo mínimo será alcançado ao utilizar o maior valor possível para x_2 e, para $\alpha < \beta$, o custo mínimo implica na utilização do maior valor possível para x_1 . O par $[x_1, x_2]$ que fornece o menor custo para as restrições mostradas nas Fig. 3 e 4 estão indicados nas mesmas.

O gerenciamento de potência em VECaCs através do método ECMS implica em um procedimento de otimização tal como descrito acima, pois o consumo de hidrogênio por parte da pilha de CaCs é aproximadamente linear, o que implica em uma função de custo também linear.

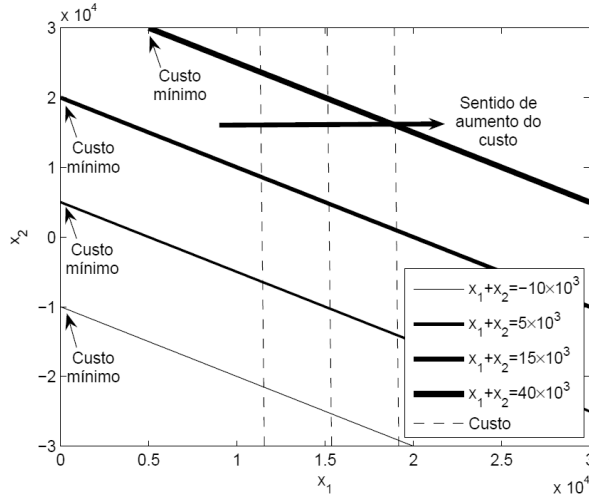


Fig. 3. Funções de custo para diferentes valores de $\alpha > \beta$ e restrições do tipo $x_1 + x_2 = K$.

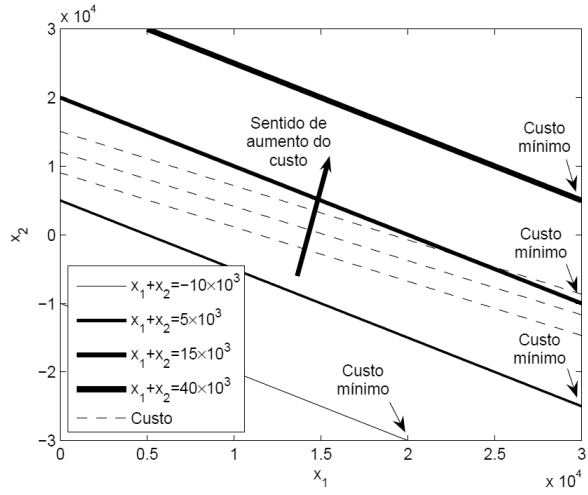


Fig. 4. Funções de custo para diferentes valores de $\alpha < \beta$ e restrições do tipo $x_1 + x_2 = K$.

Dessa maneira, seja $x_1 = P_{CaC}$, $x_2 = P_{BAT}$ e K a potência solicitada pelo motorista, a implementação da estratégia ECMS implica em dois modos de operação distintos, a saber: se $\alpha > \beta$, a pilha de CaCs é utilizada como fonte principal de potência e, se $\alpha < \beta$, a bateria é utilizada como principal fonte.

No primeiro caso, a pilha de CaCs irá fornecer a máxima potência possível. Caso a potência solicitada seja maior do que $P_{CaC,max}$, a bateria fornecerá a diferença e, caso a potência solicitada seja menor do que $P_{CaC,max}$, a bateria será carregada através da pilha de CaCs.

Quando $\alpha < \beta$, a bateria funciona como principal fonte de potência, satisfazendo a solicitação do motorista por completo até o limite de sua capacidade ($P_{BAT,max}$). Nos casos em que a potência solicitada é maior do que este limite, a Pilha de CaCs fornece a diferença.

Cabe ressaltar que uma restrição do tipo $r(x) = x_1 + x_2 = K$, onde K é negativo significa a operação do motor de indução como gerador, disponibilizando potência gerada através de frenagem regenerativa. Neste caso esta potência será absorvida pelo banco de baterias, desde que o estado de carga do mesmo esteja dentro dos limites especificados.

6. FUNÇÃO DE PENALIZAÇÃO

A função de custo apresentada até o momento não garante o controle do SOC do banco de baterias. Para que isso seja possível, a função de custo é complementada com uma função de penalização, $f(SOC)$, tal como o exposto abaixo [14], [10]:

$$J(P_{CaC}(t), P_{BAT}(t), SOC) = \dot{m}_{FC}(P_{CaC}(t)) + f(SOC) \times \zeta(P_{BAT}(t)) \quad (46)$$

A forma da função de penalização pode ser obtida através da normalização do estado de carga do banco de baterias, tal como segue [10]:

$$x_{SOC}(t) = \frac{SOC(t) - \frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2}}{\frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{2}} \quad \forall t \quad (47)$$

Dessa maneira, o controle do SOC do banco de baterias entre os limites SOC_{max} e SOC_{min} é equivalente ao controle de $x_{SOC}(t)$ entre os valores 1 e -1. O valor ideal para o estado de carga normalizado é zero.

Com esta notação, se $x_{SOC}(t) > 0$, o custo equivalente deve ser ponderado de maneira que o banco de baterias seja utilizado preferencialmente com relação a pilha de células a combustível. Caso $x_{SOC}(t) < 0$,

a pilha de CaCs deve ser utilizada preferencialmente, e toda energia de regeneração possível deve ser armazenada no banco de baterias. A maneira mais simples de obter este comportamento é através da utilização da seguinte função de penalização [10]:

$$f(SOC) = 1 - x_{soc}(t) = \frac{\frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2} - SOC(t)}{\frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{2}} \quad (48)$$

Dessa maneira, o *SOC* do banco de baterias será penalizado com relação a desvios do valor ideal, mesmo que estes sejam pequenos. Quando a função de penalização assumir valor maior do que 1, a pilha de CaCs será utilizada preferencialmente e o banco de baterias irá funcionar como fonte de potência auxiliar, podendo ser carregado caso haja potência da pilha de CaCs disponível ou através de regeneração. Quando a função de penalização assumir valor menor do que 1 a bateria será utilizada como fonte principal de potência e a pilha de CaCs assumirá o papel de fonte auxiliar.

Uma forma de permitir que o *SOC* possa variar em um intervalo maior ao redor do valor ideal, é introduzir uma função de penalização não linear tal como apresentado abaixo [10]:

$$f(SOC) = 1 - x_{soc}^n(t) \quad n = 2k + 1, k \in \mathbb{N} \quad (49)$$

Com essa forma, a função de penalização introduz uma realimentação proporcional do *SOC* do banco de baterias de maneira que o processo de minimização do custo equivalente considere o desvio do *SOC* atual com relação ao valor desejado. Quanto maior o grau do termo polinomial, maior será a liberdade de variação do *SOC* do banco de baterias. A Fig. 5 mostra a função de penalização para diferentes valores de *n*.

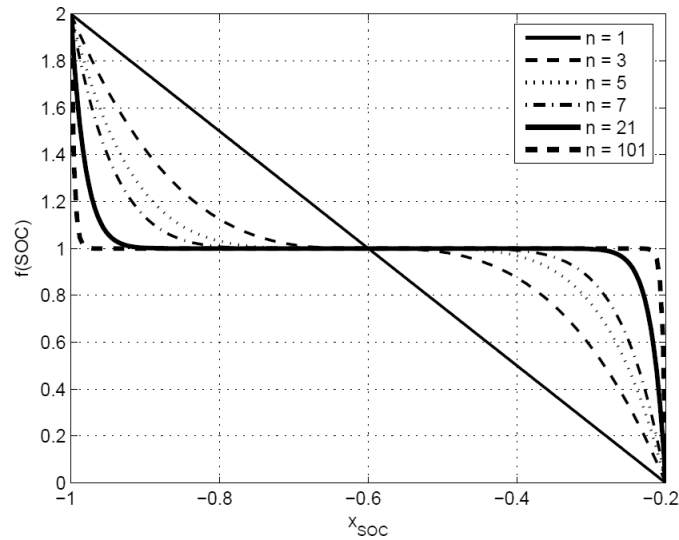


Fig. 5. Função de penalização para diferentes valores do termo polinomial.

Para valores grandes de *n* a função de penalização assume valor aproximadamente igual a 1 para a maior parte do domínio, o que significa que desvios do *SOC* do banco de baterias com relação ao nível ideal são penalizados por valores desprezíveis neste intervalo. Por consequência, o *SOC* poderá distanciar-se mais do valor ideal e as fontes de energia serão ligadas e desligadas um menor número de vezes.

A Fig. 6 apresenta a evolução do *SOC* do banco de baterias para simulações com emprego de diferentes valores de *n*. As simulações foram realizadas utilizando os primeiros 100 segundos do ciclo de condução FUDS.

O estado de carga inicial do banco de baterias foi fixado em 53%, por conveniência, em ambas simulações, sendo $SOC_{ideal} = 55\%$ o ponto médio do intervalo permitido. É verificado que quando $f(SOC)$ não linear é empregada, o *SOC* do banco de baterias varia mais ao redor do valor ideal do que na simulação com função de penalização linear.

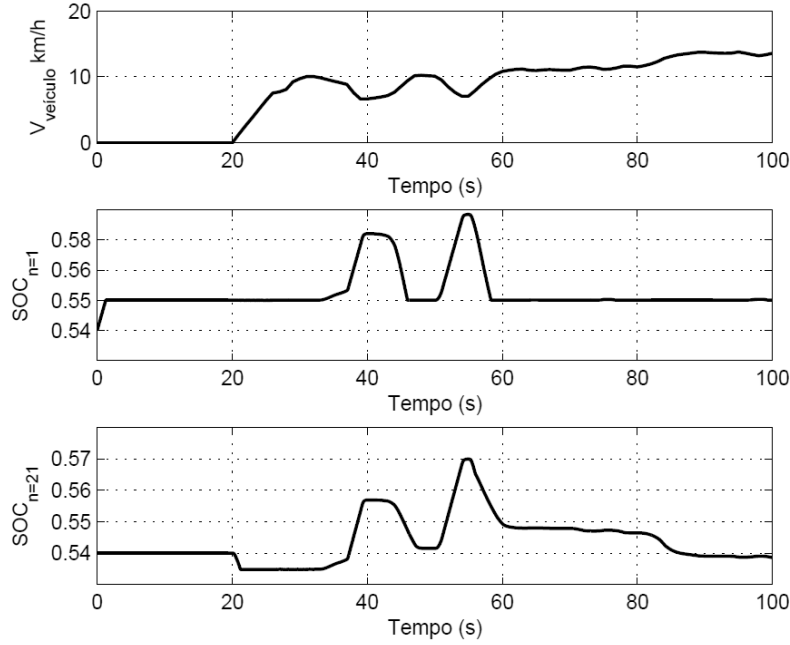


Fig. 6. Velocidade do veículo e SOC para simulações com $n=1$ e $n=21$ em $f(SOC) = 1 - x_{SOC}^n(t)$.

Entretanto, a utilização de realimentação proporcional não garante que o erro em regime convergirá para zero. Tal como em controladores PID, uma ação de controle integral pode ser adicionada a função de penalização de maneira a fazer com que desvios prolongados do SOC com relação ao valor ideal sejam mais penalizados do que desvios breves [10]. Um peso pode ser adicionado de maneira a ponderar a influência do termo integral com relação ao proporcional. A função de penalização pode, portanto, ser reescrita tal como apresentado na Equação (50).

$$f(SOC) = 1 - x_{SOC}^n(t) - \mu \int_0^t x_{SOC}(\tau) d\tau \quad n = 2k + 1, k \in \mathbb{N} \quad (50)$$

Na Equação (50), μ é o peso imposto ao termo integral.

7. RESULTADOS

Com a finalidade de avaliar o desempenho da técnica ECMS e compará-la com a lógica apresentada na Seção 3.2, aqui denominada Lógica 1, foram realizadas simulações para os ciclos de condução normatizados FUDS, HFET e SFTP. A Fig. 7 apresenta a distribuição de potência obtida em simulação para que o veículo realize o ciclo de condução FUDS. O estado inicial do banco de baterias é 50% (SOC_{min}).

Como parâmetro de comparação, foi calculado o consumo equivalente, em km/l de gasolina, para todas as situações avaliadas, de acordo com a Equação (51), na qual PCI_{gas} e PCI_{H_2} são os poderes caloríficos inferiores da gasolina e do hidrogênio ($43,5 MJ/kg$ e $119,950 MJ/kg$), ρ_{gas} é a densidade da gasolina ($755 kg/m^3$), D é a distância em metros percorrida pelo veículo, E_{bat} é a energia consumida pelo BB (KJ), $\bar{\eta}_{CaC}$ e $\bar{\eta}_{bat}$ 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).

$$Ceq_{km/l_{gas}} = k \times \frac{PCI_{gas} \times \rho_{gas} \times D}{\frac{E_{bat}}{\bar{\eta}_{CaC} \times \bar{\eta}_{bat}} + (m_{H_2} \times PCI_{H_2})} \quad (51)$$

A tabela 6 e a Fig. 7 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 6. Consumo equivalente em km/l de gasolina obtidos em simulação para a lógica de controle da Seção 3.2 e para o emprego da técnica ECMS e ganho associado.

| Ciclo | Consumo Lógica 1 | Consumo ECMS | Ganho |
|-------|------------------|--------------|--------|
| FUDS | 39,43 | 44,15 | 11,97% |
| HFET | 65,95 | 81,26 | 23,20% |
| SFTP | 43,23 | 45,78 | 05,88% |

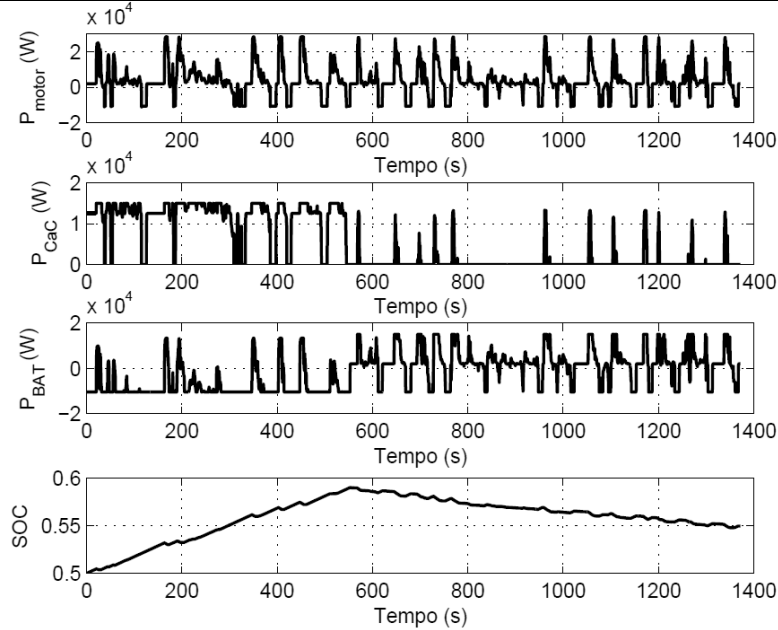


Fig. 7. Potência necessária ao motor elétrico, potência requisitada ao banco de baterias, potência requisitada a pilha de CaCs e SOC do banco de baterias para realização do ciclo de condução FUDS.

O uso da técnica de ECMS levou à redução do consumo de combustível para os três ciclos de condução considerados se comparada à Lógica 1, o que demonstra a utilidade do algoritmo de minimização proposto para aplicação em diferentes condições de condução. Ademais, considerando que o consumo médio de um veículo leve de passeio movido à gasolina é algo em torno de 12 km/l, os resultados alcançados comprovam o menor consumo dos veículos elétricos híbridos movidos por células a combustível.

8. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou 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. Como foco principal, um algoritmo para a minimização do consumo foi desenvolvido e o seu desempenho comparado à uma lógica baseada em regras. Um modelo computacional composto por um banco de baterias, uma pilha de células a combustível e um motor elétrico, além de um controlador PI para representar as reações do motorista, um controlador por modos deslizantes para o motor elétrico e um controlador para o gerenciamento de potência foi implementado, utilizando parâmetros que representam um veículo leve de passeio. O consumo equivalente dos VEHs, em km/l foi calculado, permitindo a comparação do consumo de energia entre as diferentes técnicas de gerenciamento de potência e, também, com o consumo médio de veículos convencionais. Os resultados comprovam o melhor desempenho dos VEHs com relação aos veículos movidos à gasolina, bem como o menor consumo obtido através do emprego da técnica ECMS. 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, etc.), a utilização de outras fontes de potência e o desenvolvimento de novas estratégias de controle.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo auxílio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Global Carbon Atlas, "Global Carbon Project," [Online]. Available: www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions8. [Accessed 2018]
- [2] Associação Brasileira do Veículo Elétrico, Estatuto da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2006)
- [3] Larminie, J., Lowry, J., *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley and Sons Ltd (2003)
- [4] Friedman, D., *A New Road: The Technology and Potential of Hybrid Vehicles*, Union of Concerned Scientists, Janeiro (2003)
- [5] Jalil, N., Kheir, N.A., Salman, M., "A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle", *ACC*, 689-693, Junho 1997
- [6] Mallouh, M.A., Abdelhafez, E., Salah, M., Hamdan, M., Surgenor, B., Youssef, Y., "Model development and analysis of a mid-sized hybrid fuel cell/battery vehicle with a representative driving cycle", *Journal of Power Sources*, 260, 62-71 (2014)
- [7] Meyer, R.T., DeCarlo, R.A., Meckl, P.H., Doktorcik, C., Pekarek, S., "Hybrid model predictive power management of a fuel cell-battery vehicle", *Asian Journal of Control*, 15, 363-379 (2013)
- [8] Baumann, B.M., Washington, G., Glenn, B.C., Rizzoni, G., "Mechatronic Design and Control of Hybrid Electric Vehicles", *IEEE transactions on Mechatronics*, 58-72 (2000)
- [9] Schouten, N.J., Salman, M.A., Kheir, N.A., "Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10, 460-468 (2002)
- [10] Cho, H.Y., Gao, W., Ginn, H.L., "A new power control strategy for hybrid fuel cell vehicles", *Power Electronics in Transportation*, 154-166 (2004)
- [11] Paganelli, G., Ercole, G., Brahma, A., Guezennec, Y., Rizzoni, G., "General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles", *Society of Automotive Engineers of Japan*, 22(4), 511-518 (2001)
- [12] Lin, C., Kang, J.-M., Grizzle, J.W., Peng, H., "Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck", *ACC*, 4, 2878-2883 (2001)
- [13] Lin, C., Peng, H., Grizzle, J.W., "Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck", *TCST*, 11(6), 839-849 (2003)
- [14] I.S.A.I.C. EGG Technical Services, Fuel Cell Handbook, P.O. Box 880, Morgantown, West Virginia 26507-0880: U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory (2002)
- [15] Maxoulis, C.N., Tsinoglou, D.N., Koltsakis, G.C., "Modeling of automotive fuel cell operation in driving cycles", *ECM*, 45, 559-573 (2004)
- [16] Mann, R.F., Amphlett, J.C., Hooper, M.A.I., Jensen, H.M., Peppley, B.A., Roberge, P.R., "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 86, 173-180 (1999)
- [17] Pukrushpan, J.T., Peng, H., Stefanopoulou, A.G., "Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow mode", *Proceedings of 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress AND Exposition*, 1-12, Novembro 2002

- [18] Utkin, V., Shi, J., Guldner, J., *Sliding mode control in electromechanical systems*, Philadelphia, USA: Taylor and Francis Inc, 1999.
- [19] Yan, W., Pisu, P., Utkin, V.I., Rizzoni, G., "Power Flow Control for Hybrid Electric Vehicles", *8th IEEE Workshop on Variable Structure Systems*, 1-6, (2004)
- [20] Utkin, V.I., "Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives", *TIE*, **1**(40), 23-36, Fevereiro 1993
- [21] Schell, A., Peng, H., Tran, D., Stamos, E., Lin, C.-C., Joong Kim, M., "Modelling and control strategy development for fuel cell electric vehicles", *Annual Reviews in Control*, **29**(1), 159-168 (2005)
- [22] Akella, S., Sivashankar, N., Gopalswamy, S., "Model-Based Systems Analysis of a Hybrid Fuel Cell Vehicle Configuration," *ACC*, no. Junho, 1777-1782 (2001)
- [23] Musardo, C., Staccia, B., *Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles*, Politecnico di Milano (2003)
- [24] Lin, C., Peng, H., Grizzle, J.W., "A Stochastic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles", *ACC*, **5**, 4710-4715 (2004)
- [25] Sciarretta, A., Back, M., Guzzella, L., "Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Transactions on control systems technology*, **12**(3), 352-363 (2004)
- [26] Guezennec, Y., Choi, T.-Y., Paganelli, G., Rizzoni, G., "Supervisory Control of Fuel Cell Vehicles and its Link to Overall System Efficiency and Low-Level Control Requirements", *ACC*, no. Junho. 2055-2061 (2003)

EQUIVALENT CONSUMPTION MINIMIZATION STRATEGY APPLIED TO POWER MANAGEMENT OF FUEL CELL HYBRID ELECTRIC VEHICLES

Abstract – Vehicles propelled by burning fossil fuels are the vast majority of the world's current fleet, and contribute to approximately 13% of greenhouse gas emissions into the Earth's atmosphere. Aware of the problem and the need to solve it, many countries have announced goals to reduce or eliminate the use of petroleum derivatives fueled vehicles in the coming decades, and major auto manufacturers have been researching and developing vehicles propelled by alternative energy sources. Among the main technologies figure fuel cell hybrid electric vehicles. However, its large-scale use still requires a lot of research and development. In such context, this paper presents a dynamical model for a fuel cell hybrid electric vehicle and discusses power management strategies for it. Special attention is given to an equivalent consumption minimization strategy. Results of computational implementations are presented, which demonstrate the lower consumption of fuel cell hybrid electric vehicles compared to conventional automobiles driven by internal combustion engines, as well as the best performance obtained by the minimization technique. The developed model can easily be adapted to different types of vehicles and can serve as a basis for further studies.

Keywords – Hybrid electric vehicles, fuel cell, power management, Equivalent consumption minimization strategy.

