

METODOLOGIA PARA DIMENSIONAR MÚLTIPLAS FONTES DE SUPRIMENTO DE ENERGIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

André Augusto Ferreira e José Antenor Pomilio
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP
Departamento de Sistemas e Controle de Energia - Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica
CEP 13083-970 – C. P. 6101 – Campinas – SP – Brasil
e-mail: {andre, antenor}@dsce.fee.unicamp.br

Ennio Peres da Silva e Diego Vaz Pontes Cambra
Instituto de Física Gleb Wataghin – UNICAMP
Departamento de Física Aplicada - Laboratório de Hidrogênio
CEP 13083-970 – C. P. 6039 – Campinas – SP – Brasil
e-mail: lh2ennio@ifi.unicamp.br, ogeidbr@gmail.com

Resumo – Em resposta à necessidade de maior confiabilidade e durabilidade do sistema de suprimento de energia e melhor desempenho do sistema de propulsão, os modernos veículos elétricos combinam diferentes fontes de energia em termos de densidade de energia e de densidade de potência. Em geral, uma fonte de transferência rápida de energia é associada à fonte primária para amortecer variações bruscas de demanda de potência das cargas elétricas do veículo. Com efeito, é possível aumentar a vida útil e a compactação da fonte primária, e ainda melhorar o desempenho do veículo nas fases de aceleração e frenagem regenerativa.

Este artigo propõe uma metodologia para dimensionar o sistema de suprimento de energia composto por célula a combustível, bateria e supercapacitor, com base na curva de estimativa de demanda de potência requerida pelo mecanismo de tração elétrica do veículo para percorrer um determinado perfil de velocidade.

Palavras-Chave – supercapacitor, bateria, célula a combustível, veículo elétrico, dimensionamento, ciclo de condução.

I. INTRODUÇÃO

Em princípio, as células a combustível (CaC) poderiam substituir plenamente as baterias (BT) para propulsar os modernos veículos elétricos (VE), em decorrência da grande quantidade de energia, por concentração de massa ou de volume, disponível para elevar a autonomia de percurso do veículo, sem comprometer o desempenho e espaço interno dos VE. No entanto, a tecnologia atual das CaC apresenta lenta transferência de energia, elevado custo relativo por watt e pouca eficiência em situações de baixa demanda de potência.

Com efeito, alguma outra fonte de energia deve ser usada para transferir rapidamente potência para mecanismo de tração elétrica. Assim, a CaC não precisa ser dimensionada para a potência de pico, mas somente para a potência média. Com isso, além de uma CaC mais compacta e de menor custo, a vida útil da CaC pode ser prolongada.

A bateria possui capacidade de energia suficiente para movimentar VE leves em baixas velocidades como, por exemplo, em trajetos urbanos, ou fornecer potência adicional necessária por longos períodos de velocidade alta como, por exemplo, em estradas [1].

No entanto, variações bruscas de demanda da carga produzem considerável perda de potência que podem comprometer o desempenho e vida útil tanto da BT, quanto da CaC. E ainda, a CaC e a BT apresentam um lento processo eletroquímico para realizar a conversão de energia química em eletricidade. A solução usual emprega o supercapacitor (SC) para melhorar a resposta transitória do sistema de suprimento durante variações bruscas de potência [2] e [3].

De acordo com o diagrama de Ragone, mostrado na Fig. 1, o SC apresenta maior densidade de potência que a BT e a CaC, ou seja, é mais rápido para transferir energia. Embora o capacitor convencional apresente maior densidade de potência, ele não acumula energia suficiente, em termos de massa e volume, para minimizar o impacto das variações bruscas de potência em um VE.

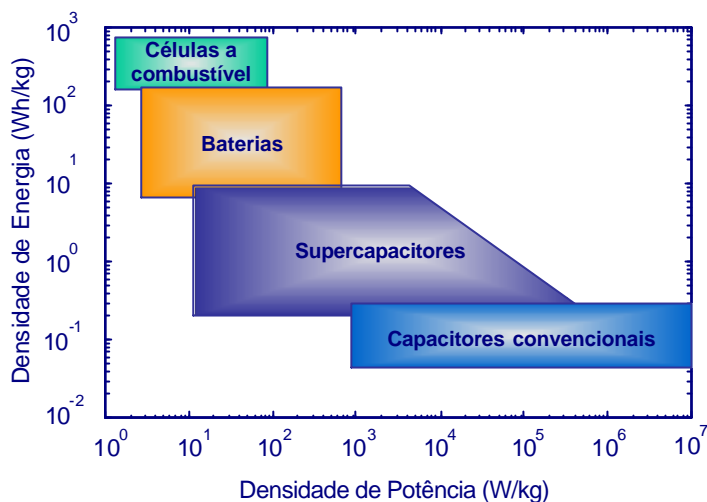


Fig. 1. Diagrama de Ragone: densidade de energia versus densidade de potência.

Deste modo, a combinação de uma fonte de elevada densidade de energia (CaC) com uma fonte de elevada densidade de potência (SC), possibilita aliar uma grande autonomia de percurso com um bom desempenho dinâmico nas fases de aceleração e de desaceleração do veículo. Uma fonte secundária de energia (BT) é empregada para melhorar o comportamento do veículo nas fases de subida e de frenagem regenerativa.

As três fontes de suprimento de energia (CaC, BT e SC) são interconectadas ao mecanismo de tração elétrica por intermédio de um conversor eletrônico com múltiplas entradas, denominado MIPEC, mostrado no esboço esquemático da Fig. 2 [3]. Um sistema supervisorio coordena a alocação dos recursos disponibilizados pelas três fontes de suprimento de energia, a partir do controle do MIPEC [4].

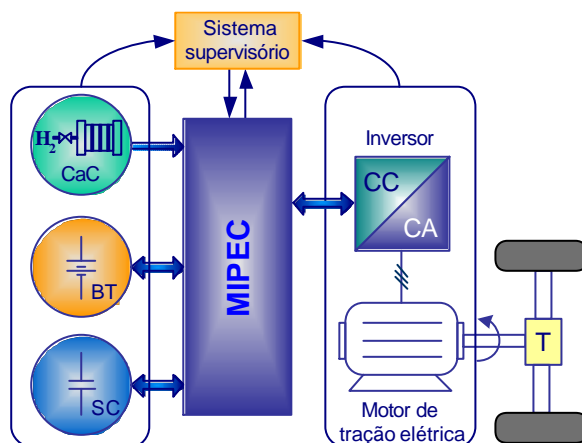


Fig. 2. Esboço esquemático do sistema de propulsão do veículo elétrico.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia para dimensionar as três fontes de suprimento (CaC, BT e SC), com base na curva de estimativa de demanda de potência requerida pelo mecanismo de tração elétrica necessária para o veículo percorrer um trajeto específico de perfil de velocidade, observando as restrições de operação das fontes de suprimento de energia e as limitações nos processos de condicionamento da energia gerada pela CaC e acumulada pela BT e pelo SC.

II. VEGA

O primeiro protótipo nacional de veículo terrestre com célula a combustível teve seus primeiros testes e exposição ao público realizadas em abril de 2004. Este protótipo, denominado de VEGA II e mostrado na Fig. 3, foi desenvolvido em uma parceria do Laboratório de Hidrogênio com o Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético, ambos da UNICAMP; em que se destaca o imprescindível apoio financeiro do Ministério de Minas e Energia.



Fig. 3: VEGA II - primeiro veículo elétrico brasileiro movido a célula a combustível.

O sistema de suprimento deste veículo é composto por células a combustível e baterias de chumbo-ácido, enquanto que a tração elétrica é realizada por um motor de indução, acionado por um inversor industrial.

A proposta atual, que visa melhorar o desempenho do veículo em termos do desempenho e da eficiência energética, o que requer uma estratégia mais elaborada para a propulsão do veículo. A primeira etapa é incluir módulos supercapacitores ao sistema de suprimento, o que possibilitará melhor desempenho dinâmico nas fases de aceleração e maior economia de combustível, em virtude da maior regeneração de potência nas fases de frenagem do veículo.

Como benefício secundário, provavelmente haverá o prolongamento da vida útil da célula a combustível e da bateria, uma vez que somente o supercapacitor será submetido a variações rápidas de potência.

III. ESTIMATIVA DA DEMANDA DE POTÊNCIA PARA A TRAÇÃO ELÉTRICA DO VEÍCULO

A estimativa da demanda de potência do mecanismo da tração elétrica de um veículo pode ser obtida a partir do cálculo das forças que atuam sobre ele [1], [5] e [6]. Por simplicidade, será considerado somente o movimento unidimensional do veículo. Na Fig. 4 estão esboçadas as forças de resistência ao movimento do veículo para subir um aclive: força de resistência ao rolamento (F_{rr}), força de arrasto aerodinâmico (F_{aa}) e força de resistência ao aclive ($m \cdot g \cdot \sin \alpha$).

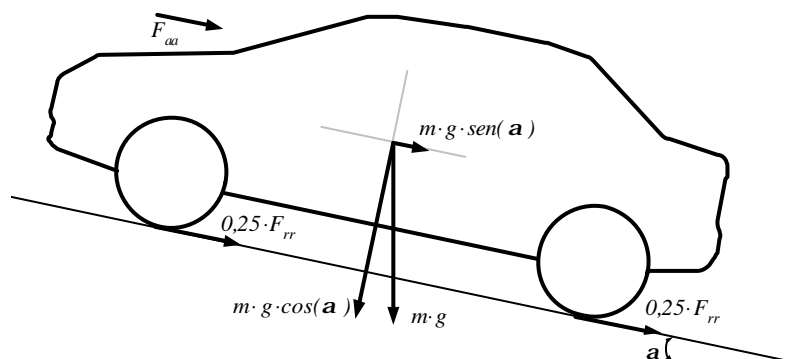


Fig. 4: Forças de resistência atuantes sobre um veículo subindo um aclive.

De acordo com a segunda Lei de Newton, a força resultante (F_R) no veículo é dada por:

$$F_R = F_T - m \cdot g \cdot \text{sen}(\mathbf{a}) - F_{rr} - F_{aa} \quad (1)$$

ou seja,

$$m \cdot \frac{dV(t)}{dt} = F_T - m \cdot g \cdot \text{sen}(\mathbf{a}) - m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\mathbf{a}) - \frac{1}{2} \cdot \mathbf{r} \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V(t) + V_w)^2 \quad (2)$$

em que:

- F_T é a força necessária para a tração do veículo;
- m é a massa do veículo (1800 kg para o VEGA);
- V é a velocidade do veículo;
- V_w é a velocidade do vento;
- g é a constante de aceleração da gravidade (9,8 m/s²);
- \mathbf{a} é o ângulo de inclinação da pista;
- f_r é o coeficiente de resistência dos pneus (0,013 para pistas de asfalto ou concreto);
- \mathbf{r} é a densidade do ar (1,2 kg/m³ a 1 atm e 25 °C);
- A_f é a área frontal do veículo (2,4 m² para o VEGA);
- C_D é o coeficiente de penetração aerodinâmica (0,4 para o VEGA).

A estimativa da demanda de potência requisitada pelo mecanismo de tração elétrica (P_m) é dada pelo produto entre a velocidade e a força necessária para a tração do veículo, ou seja,

$$P_m(t) = \left[m \cdot \frac{dV(t)}{dt} + m \cdot g \cdot \text{sen}(\mathbf{a}) + m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\mathbf{a}) + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{r} \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V(t) + V_w)^2 \right] \cdot V(t) \quad (3)$$

A demanda de potência do veículo varia proporcionalmente com a velocidade instantânea, conforme a equação (3). As curvas de ciclo de condução descrevem os perfis de velocidade que usualmente são empregadas para verificar o desempenho do veículo em termos de emissão de gases poluente e economia de combustível. Neste trabalho, as curvas de ciclo de condução são usadas para estimar a demanda de potência do mecanismo de tração elétrica.

Por exemplo, o ciclo de condução europeu NEDC (“*New European Driving Cycle*”), mostrado no gráfico superior da Fig. 5, consiste da repetição, por quatro vezes, do ciclo de condução urbano europeu (ECE 15) concatenado com o ciclo de condução europeu extra-urbano (EUDC). Admitindo um trajeto de estrada plano ($\mathbf{a} = 0$) e velocidade do vento é desprezível, a curva de estimativa de demanda de potência é mostrada no gráfico inferior da mesma figura.

A demanda máxima de potência do mecanismo de tração elétrica para o ciclo de condução europeu NEDC, em um trajeto plano, é de aproximadamente 21,2 kW. Deste modo, o motor elétrico atual do VEGA, 30 cavalos (22,4 kW), é capaz de fornecer a potência necessária para movimentar o veículo, de acordo com o ciclo de condução europeu NEDC, em uma estrada plana. É evidente que se a aceleração do veículo fosse muito maior, o motor não seria capaz de atender à demanda total de potência requerida. E ainda, em uma subida, o desempenho do veículo seria penalizado em termos da aceleração e/ou da velocidade máxima. Por outro lado, em uma descida o veículo poderia alcançar velocidades e acelerações mais altas.

Para determinar a demanda total de potência do mecanismo de tração elétrica, é imprescindível computar o rendimento do motor elétrico e do inversor eletrônico (ver Fig. 2). O rendimento típico de um motor trifásico elétrico é superior a 90 %, ou seja, a potência do inversor deve ser de aproximadamente 25 kW. Já o rendimento do inversor pode ser superior a 95 %, ou seja, a demanda máxima de potência do mecanismo de tração elétrica do veículo pode alcançar 26 kW.

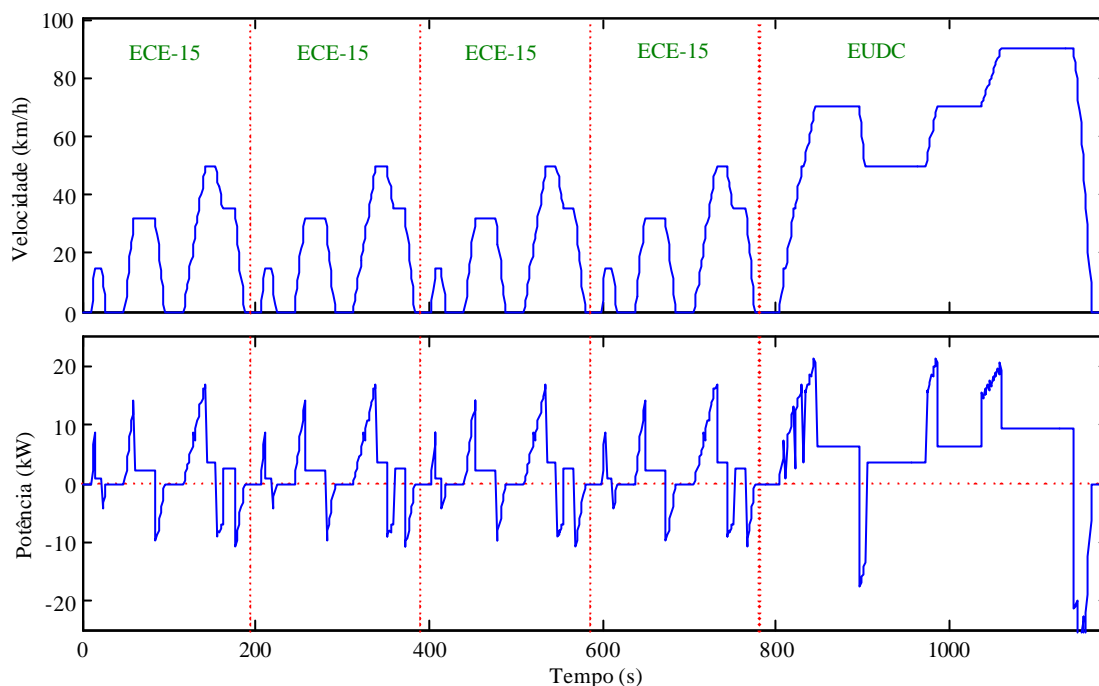


Fig. 5: Novo ciclo de condução europeu (NEDC), gráfico superior, e estimativa de demanda de potência para um percurso plano, gráfico inferior.

IV. TENSÃO DE OPERAÇÃO DAS FONTES E CONDICIONAMENTO DA ENERGIA

As tensões de operação típica dos motores elétricos trifásicos são 127 V, 220 V e 380 V. Quanto maior a tensão de operação, menor será a demanda de corrente dos cabos elétricos e, em consequência, menor o seu peso e volume no interior do veículo. No entanto, uma maior tensão de operação do motor elétrico implica em uma tensão mais elevada do barramento CC do inversor eletrônico. Conseqüentemente, a tensão de operação do sistema de suprimento de energia do veículo também precisa ser mais elevada, o que resulta em maior tensão de operação das fontes ou o emprego de conversores CC-CC com elevado ganho estático de tensão.

Valores comerciais típicos das fontes de energia são de algumas dezenas de volts. Por exemplo, os módulos supercapacitores possuem uma tensão de 42 V. Estruturas de conversão CC-CC com elevado ganho de tensão estático podem resultar em baixo rendimento, grande volume e elevada emissão de interferência eletromagnética.

Em veículos elétricos pesados como, por exemplo, ônibus e caminhões, a demanda máxima de potência pode alcançar várias centenas de kW. Deste modo, é mais apropriado trabalhar com tensões mais elevadas.

Em veículos elétricos leves, a demanda máxima de potência pode atingir até uma centena de kW. Neste caso, a configuração típica utiliza motores de 220V, o que resulta em uma tensão do barramento CC do mecanismo de tração elétrica na faixa de 300 V. O VEGA, por exemplo, utiliza atualmente um motor de indução trifásico, refrigerado a ar, de 30 CV, 60 Hz, 3520 RPM e 220 V, o que implica em manter a tensão do barramento CC em 320 V para assegurar o acionamento adequado do motor elétrico a partir do inversor.

Conectar as fontes diretamente ao barramento CC do inversor não é a melhor opção, pois não permite o controle individual das fontes e requer tensões de operação significativamente elevadas. Em um sistema de suprimento composto por CaC, BT e SC, a solução mais apropriada é utilizar o conversor eletrônico com múltiplas entradas (MIPEC). Na Fig. 6 é mostrado o circuito esquemático de um MIPEC que consiste no arranjo paralelo entre as fontes a partir de três conversores elevadores de tensão, dois bidirecionais e um unidirecional em corrente (chave S_2 sempre desligada), que compartilham o mesmo barramento de saída [7].

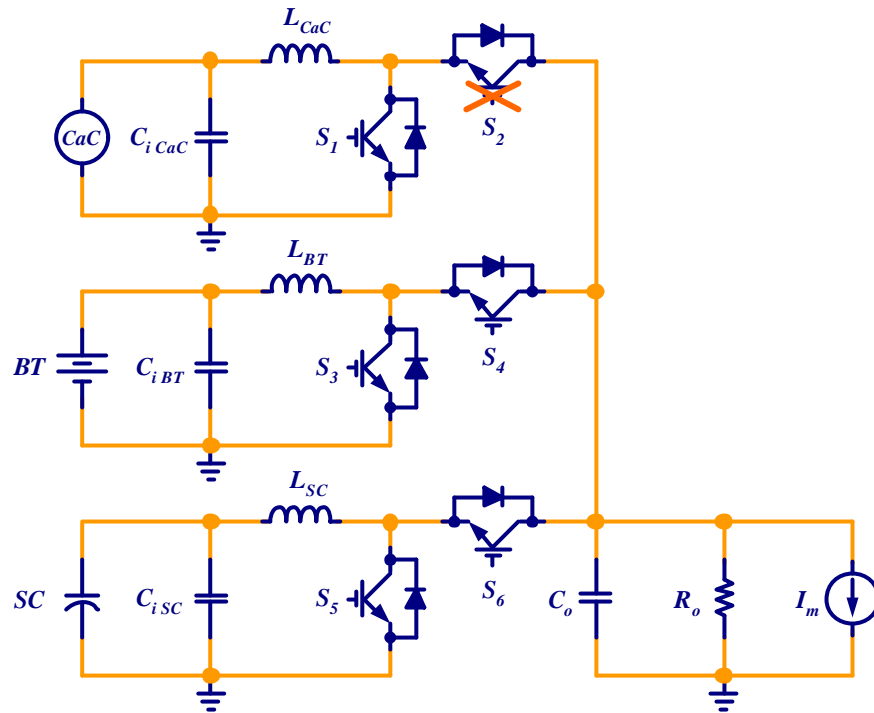


Fig. 6: Circuito esquemático do conversor eletrônico com múltiplas entradas.

Neste circuito esquemático, as cargas girantes (motor elétrico) são representadas por uma fonte de corrente (I_m), enquanto que as demais cargas, como as de iluminação, são representadas por uma resistência (R_o).

No sistema de gestão de energia do MIPEC proposto em [7], o subconversor do supercapacitor controla diretamente a tensão de saída, enquanto que os subconversores da bateria e da célula a combustível são controlados em corrente, com taxa de variação limitada [3], para fornecer a potência requerida pela carga. As referências de corrente dos controladores em corrente dos subconversores da BT e da CaC são ajustadas por um controlador nebuloso.

Em outras palavras, as três fontes cumprem diferentes papéis na estratégia de gestão de energia elaborada: a célula a combustível fornece a demanda média de potência da carga e a bateria complementa a potência gerada para prover a demanda total da carga, ambos com taxa de variação de corrente limitada a fim de preservar a vida útil destes dispositivos de conversão de energia química em eletricidade. O supercapacitor atua no regime transitório a partir do controle da tensão de saída do subconversor associado a ele, isto é, mantém a tensão de saída do MIPEC estável, principalmente durante eventos transitórios de variação brusca de demanda potência.

O ganho estático de tensão (M) do conversor elevador de tensão, representa a razão entre a tensão de entrada (V_i) pela de saída (V_o). As perdas de potência no conversor são predominantemente devido à resistência interna das fontes (R_i). É possível mostrar que o ganho estático de tensão do conversor elevador de tensão é dado por:

$$M(\mathbf{d}) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_o \cdot (1 - \mathbf{d}) \cdot V_o}{V_o \cdot [R_i + R_o \cdot (1 - \mathbf{d})^2] + R_i \cdot R_o \cdot I_m}, \quad (4)$$

em que δ representa a razão cíclica, isto é, a fração do período em que o transistor, conectado ao indutor e ao terminal da fonte, permanece ligado.

A equação do rendimento do conversor elevador de tensão, considerando somente as perdas ôhmicas na fonte, é dada por:

$$h(d) = \frac{R_o \cdot (1-d)^2 \cdot V_o}{V_o \cdot [R_i + R_o \cdot (1-d)^2] + R_i \cdot R_o \cdot I_m} \quad (5)$$

A partir da curva tensão corrente (V-I) das fontes de conversão de energia química em eletricidade, é possível estimar a resistência interna dos dispositivos na região de polarização ôhmica, uma vez que não serão submetidos a variações bruscas de demanda de potência. Como as fontes são tipicamente associadas em série para alcançar tensões mais elevadas, é necessário multiplicar o valor da resistência interna de cada módulo pelo número de módulos para encontrar o valor total da resistência interna da fonte.

Admitindo o valor arbitrário de $0,35 \Omega$ de resistência interna dos dois dispositivos de conversão de energia química em eletricidade (CaC e BT) e $0,08 \Omega$ o valor arbitrário de resistência interna do supercapacitor e que a demanda de corrente seja de 50 A , as curvas de ganho estático de tensão e rendimento do conversor elevador de tensão são mostradas na Fig. 7.

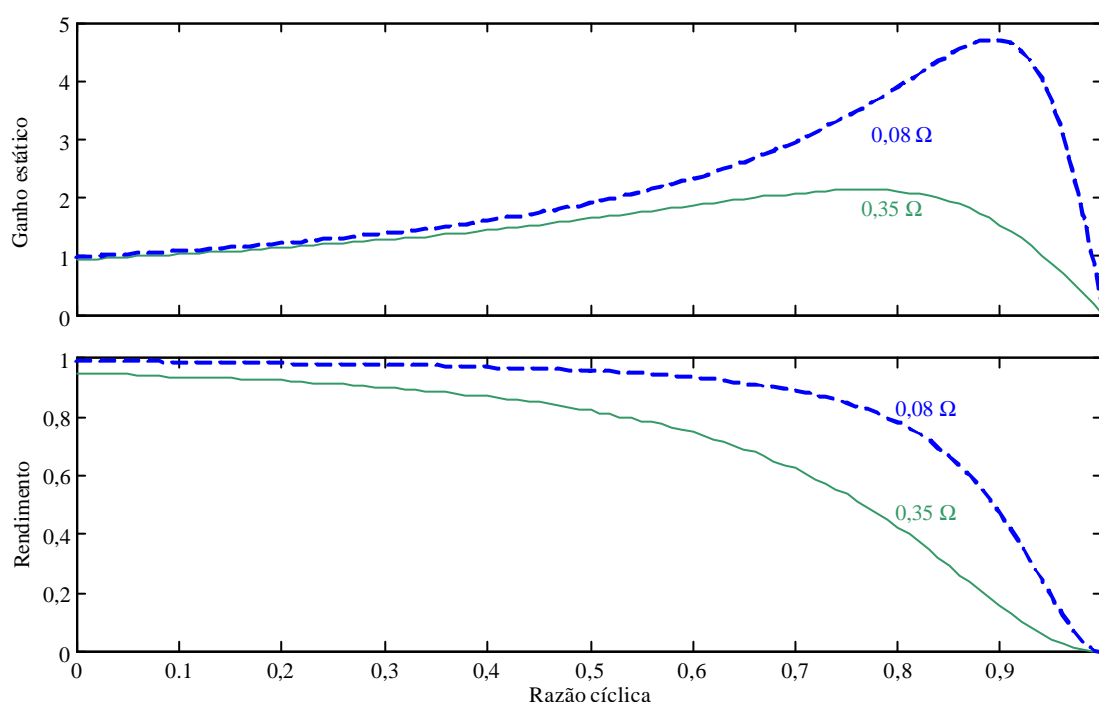


Fig. 7: Ganho estático de tensão e rendimento do conversor elevador de tensão considerando diferentes valores de resistência interna das fontes e demanda de corrente da carga de 50 A .

É possível constatar que o ganho estático de tensão do conversor associado às fontes de conversão de energia (CaC e BT) não deve ser superior a 2, devido às significativas perdas ôhmicas na resistência interna dessas fontes. Quando o ganho estático é 2, a razão cíclica do conversor, que apresenta resistência interna da fonte de $0,35 \Omega$, é de $0,67$ e o rendimento é de aproximadamente 67% . Neste caso, como a tensão de saída é 320 V e o ganho estático de tensão é igual a 2, a tensão de entrada é de 160 V .

O supercapacitor, em virtude da sua pequena resistência interna, apresenta maior rendimento e pode operar em uma faixa de tensão mais ampla, uma vez que valores de razão cíclica acima do valor máximo de ganho estático não são seguras do ponto de vista do controle do conversor.

Deste modo, a tensão mínima de operação das fontes de conversão é de aproximadamente 150 V , enquanto que a tensão mínima de operação do supercapacitor é de aproximadamente 70 V .

V. DIMENSIONAMENTO DAS FONTES DE SUPRIMENTO DE ENERGIA

A. Dimensionamento da potência das fontes de conversão de energia química em eletricidade

A demanda média de potência em um veículo elétrico é tipicamente em torno de 25 % a 30 % da sua demanda máxima de potência. Este valor sugere que uma célula a combustível mais compacta pode ser empregada, desde que uma ou mais fontes complementem a potência gerada, para suprir a demanda total da carga.

Deste modo, considerando o rendimento do motor elétrico (h_{motor}), do inversor (h_{inv}) e do MIPEC (h_{MIPEC}) e da célula a combustível (h_{CaC}), a sua potência (P_{CaC}) deve ser de:

$$P_{CaC} = \frac{P_{média}}{h_{motor} \cdot h_{inv} \cdot h_{MIPEC} \cdot h_{CaC}}. \quad (6)$$

Como a bateria deve complementar a potência gerada pela fonte primária, sua potência (P_{BT}) deve ser de:

$$P_{BT} = \frac{P_{total} - P_{média}}{h_{motor} \cdot h_{inv} \cdot h_{MIPEC} \cdot h_{BT}}, \quad (7)$$

em que, P_{total} e $P_{média}$ correspondem à potência máxima e média requerida pelo veículo elétrico.

Admitindo demanda média de potência da fonte é 25 % da demanda máxima de potência (22,4 kW), que o rendimento do motor elétrico é de 90%, do inversor e do MIPEC de 95 % e da célula a combustível e da bateria de 70 %, então a potência mínima da CaC deve ser de 10 kW, enquanto que a potência mínima da bateria (P_{BT}) deve ser de 30 kW.

B. Estimativa da potência transferida pelas fontes

De acordo com a estratégia elaborada em [4], o funcionamento da CaC é determinado principalmente pela demanda da carga e o estado de energia dos dispositivos acumuladores. Neste trabalho, será adotado o seguinte procedimento simplificado: sempre que a demanda de potência (P_m) for superior a um determinado limite (P_{lim}), a referência de corrente da célula a combustível (I_{CaC}^*) será máxima, e quando negativa (desaceleração do veículo), a referência de corrente da CaC será mínima, ou seja,

$$\begin{cases} I_{CaC}^* = I_{max\ CaC}, & \text{se } P_m \geq P_{lim} \\ I_{CaC}^* = I_{min\ CaC}, & \text{se } P_m < 0 \end{cases}. \quad (8)$$

O circuito esquemático equivalente do fluxo de potência do sistema de propulsão do veículo elétrico é mostrado na Fig. 8. As fontes de suprimento de energia são representadas por uma fonte de tensão em série com a sua resistência interna, enquanto a demanda de potência da carga é designada por P_m .

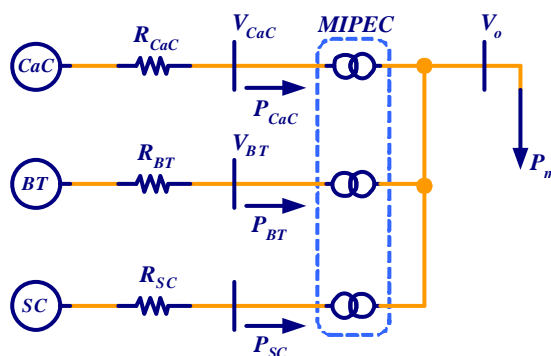


Fig. 8: Diagrama esquemático equivalente do fluxo de potência da CaC, BT e tração elétrica do veículo.

A bateria é responsável por complementar a potência gerada pela CaC, para atender a demanda requerida pela carga, e manter o estado de energia do supercapacitor adequado. Deste modo, como a potência média do supercapacitor deve ser nula, é possível escrever que a referência de potência da BT como:

$$P_{BT}^* = P_m - P_{CaC} + \sum P_{SC}, \quad (9)$$

No entanto, como a taxa de variação de corrente das fontes de conversão de energia é limitada, o SC deve amortecer variações bruscas de corrente da carga. Este objetivo é alcançado utilizando o supercapacitor para manter a tensão de saída do MIPEC constante, isto é, a potência transferida pelo supercapacitor corresponde ao complemento da potência fornecida pelas fontes de conversão de energia em relação à potência requerida pela carga, ou seja,

$$P_{SC} = P_m - P_{BT} - P_{CaC}, \quad (10)$$

sabendo-se que:

$$\begin{cases} P_{CaC} = V_{CaC} \cdot I_{CaC} = (E_{CaC} - R_{CaC} \cdot I_{CaC}) \cdot I_{CaC} \\ P_{BT} = V_{BT} \cdot I_{BT} = (E_{BT} - R_{BT} \cdot I_{BT}) \cdot I_{BT} \end{cases}, \quad (11)$$

em que, V_{CaC} e V_{BT} são as tensões terminais, I_{CaC} e I_{BT} são as correntes terminais, R_{CaC} e R_{BT} são as resistências internas e E_{CaC} e E_{BT} são as tensões internas da CaC e da BT, respectivamente.

Considerando que a tensão mínima de operação das duas fontes de conversão de energia é de 160 V, tem-se uma corrente máxima de 62,5 A para a célula a combustível e 187,5 A para a bateria, pois suas potências nominais são especificadas em 10 kW e 30 kW, respectivamente.

Em baterias de chumbo-ácido é adequado que a corrente de recarga seja limitada em um valor abaixo de 30% da sua capacidade. Uma vez que a corrente máxima da BT deve ser de 187,5 A, sua capacidade deve ser superior a 190 Ah. Portanto, para este valor de capacidade da BT, a sua corrente máxima de recarga deve ser 57 A. E ainda, admitindo que a corrente mínima da CaC é 15 % do seu valor máximo, é possível escrever:

$$\begin{cases} I_{\min CaC} \leq I_{CaC} \leq I_{\max CaC} \\ -0,3 \cdot I_{\max BT} \leq I_{BT} \leq I_{\max BT} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 10A \leq I_{CaC} \leq 62,5A \\ -57A \leq I_{BT} \leq 187,5A \end{cases}. \quad (12)$$

A definição dos limites da taxa de variação (derivada) de corrente não são usualmente fornecidas pelos fabricantes de células a combustível e de baterias. No entanto, o ensaio da resposta transitória das fontes a uma pequena perturbação em degrau de demanda de corrente possibilita identificar a constante de tempo da fonte, ou seja, pode-se utilizar esta medida como limite da taxa de variação de corrente. Com efeito, para preservar o desempenho e a vida útil das fontes de conversão de energia química em eletricidade, são impostas as seguintes restrições arbitrárias de taxa de variação de corrente:

$$\begin{cases} -15 A/s \leq \frac{dI_{CaC}}{dt} \leq 10 A/s \\ -50 A/s \leq \frac{dI_{BT}}{dt} \leq 25 A/s \end{cases}. \quad (13)$$

Aplicando a formulação proposta, os gráficos da estimativa de potência terminal e de energia transferidas pelo supercapacitor para complementar a potência fornecida pelas fontes de conversão de energia para atender as variações bruscas de demanda de potência, do mecanismo de tração elétrica do veículo, que ocorrem durante o percurso do novo ciclo de condução europeu

NEDC (Fig. 5), considerando o rendimento dos processos de conversão do motor, do inversor e do MIPEC, são mostradas na Fig. 9.

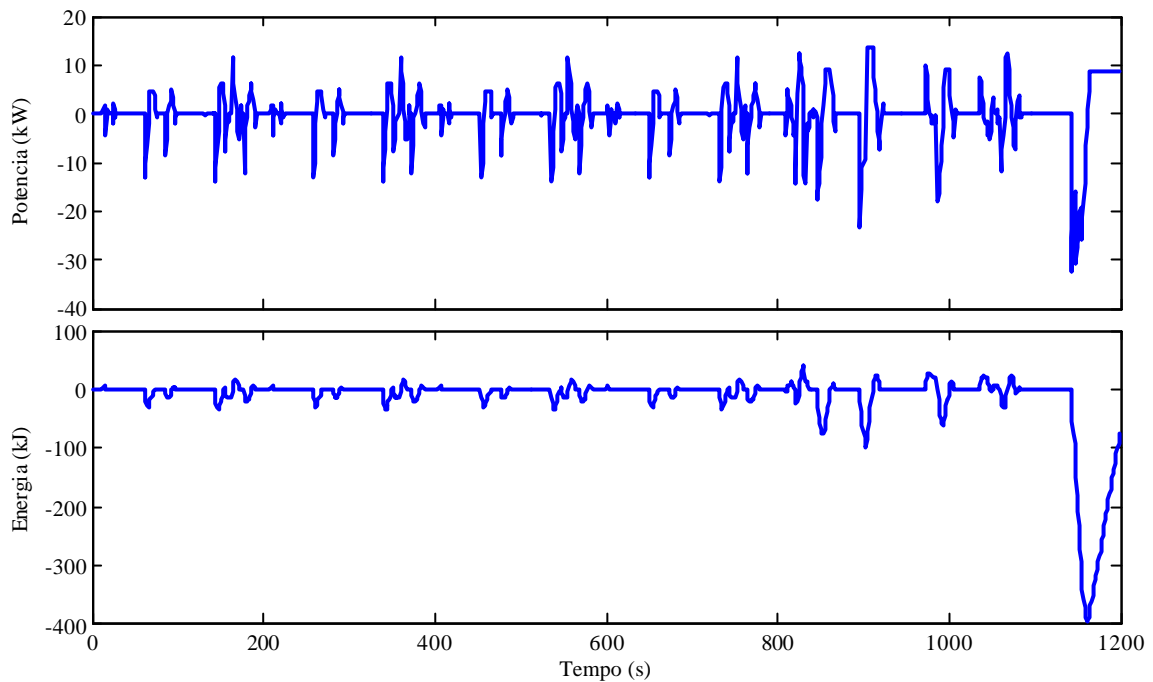


Fig. 9: Estimativa de potência e energia transferida pelo supercapacitor.

As curvas da estimativa das potências terminais fornecidas pela célula a combustível e bateria são mostradas no gráfico superior da Fig. 10. No gráfico inferior da mesma figura é mostrada a curva da energia transferida pela bateria durante o percurso do ciclo de condução.

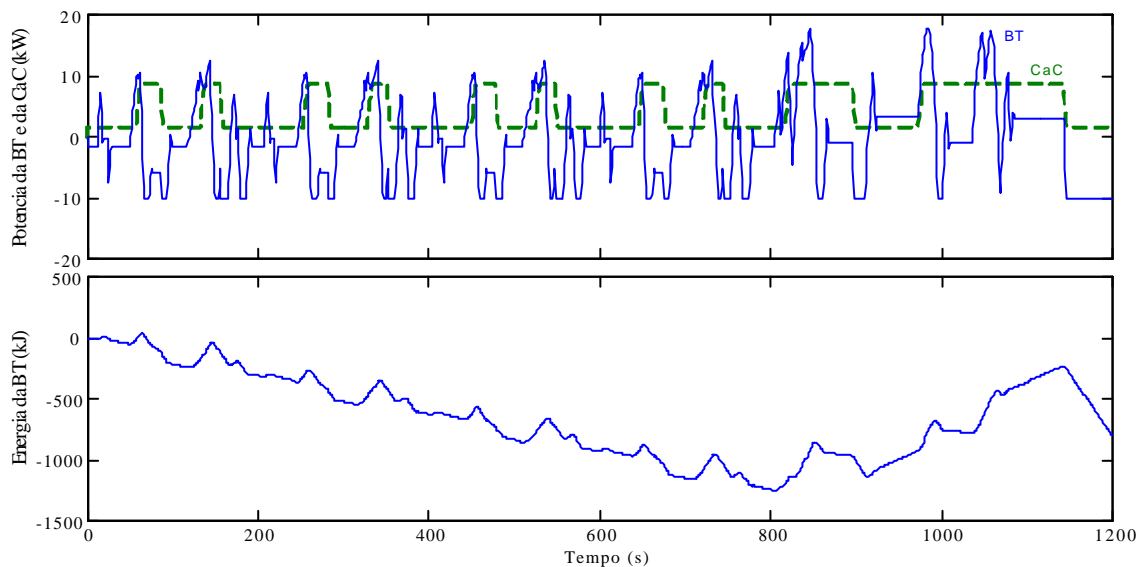


Fig. 10: Estimativa das potências fornecidas pela CaC e pela BT e da energia transferida pela BT.

Cabe destacar que as tensões (internas) das fontes de conversão de energia e as suas resistências internas são de 160 V e 0,35 Ω , respectivamente. E ainda, o gráfico de energia das fontes acumuladoras corresponde à integração numérica da potência transferida.

C. Especificações do supercapacitor

O supercapacitor apresenta um comportamento típico análogo ao do capacitor eletrolítico convencional. Valores de tensões acima de valor especificado pelo fabricante podem resultar na eletrólise do eletrólito, ou seja, pode ocasionar a sua destruição devido à formação de gases dentro do componente.

Nem toda a energia disponível no supercapacitor é aproveitada, pois o conversor eletrônico a ele acoplado apresenta um valor de tensão mínima de operação, em virtude da elevada perda de rendimento do conversor com elevado ganho estático de tensão. Com efeito, a energia útil do SC corresponde à diferença entre as suas quantidades de energia máxima e mínima.

Uma vez que o limite de corrente do supercapacitor é bastante elevado, a principal informação para seu dimensionamento da sua capacitância é a quantidade de energia útil que deve ser capaz de transferir [8].

A partir dos gráficos mostrados na Fig. 9 é possível constatar que a potência e a energia máxima fornecida pelo supercapacitor são de 13,4 kW e 40 kJ, enquanto que a potência e a energia máxima absorvida são de 32 kW e 394 kJ, respectivamente.

Dimensionar o supercapacitor para a condição de regeneração máxima de energia, ou potência, pouco contribui para melhorar expressivamente o desempenho dinâmico do veículo, ou melhor, é mais apropriado dimensionar o supercapacitor para a situação de fornecimento máximo de energia, o que assegura obter melhor resposta dinâmica do veículo durante a aceleração sem aumentar o custo de aquisição dos módulos supercapacitores em demasia.

A quantidade de capacitância do supercapacitor (C_{SC}) é determinada em termos da energia útil (W_{SC}) e das suas tensões de operação mínima (V_{minSC}) e máxima (V_{maxSC}). Como a tensão de operação do supercapacitor deve corresponder à situação de energia média entre as tensões máxima e mínima, para que possa absorver ou fornecer energia, é possível escrever:

$$C = 2 \cdot \frac{2 \cdot W_{SC}}{V_{max SC}^2 - V_{min SC}^2}, \quad (12)$$

em que,

$$W_{SC} = \int_0^t P_{SC}(t) \cdot dt. \quad (13)$$

Em termos da tensão mínima de operação do supercapacitor é necessário verificar o ganho estático de tensão e o valor correspondente de rendimento do conversor, mostrados na Fig. 7. Observando a curva de $0,08 \Omega$ de resistência interna da fonte, é possível constatar que um ganho estático de tensão igual a 4 (isto é, 80 V de tensão interna do supercapacitor) há um rendimento de aproximadamente 77 % do conversor, incluindo a resistência interna da fonte, para uma corrente de carga de 50 A. Cabe destacar que o rendimento do conversor será maior para valores menores demanda de corrente de carga.

A potência máxima fornecida pelo SC é de 13,4 kW, como pode ser constatado na Fig. 9. Deste modo, a tensão mínima de 80 V resulta em uma corrente máxima de 168 A, que é um valor razoável. Notar que para esta faixa de potência, a corrente da carga do conversor é de aproximadamente 40 A. E ainda, o supercapacitor opera a maior parte do tempo com valores pequenos de transferência de potência. Portanto, o rendimento do processo de transferência de energia do supercapacitor deve ser mais elevado.

A tensão típica de operação de módulos supercapacitores comerciais é de 42 V. Deste modo, a tensão máxima de operação dos módulos supercapacitores associados em série deve ser um valor múltiplo da tensão de operação de cada módulo e, obviamente, superior a tensão mínima de operação.

A associação em série de três módulos supercapacitores resulta em uma tensão máxima de operação do SC de 126 V. Sabendo-se que a quantidade de energia do SC deve ser no mínimo de 40 kJ e a tensão mínima de operação é de 80 V, a capacitância total do SC deve ser de 17 F, de acordo com a equação (12), ou seja, é necessário empregar 3 módulos supercapacitores de 50 F e 42 V cada, associados em série.

D. Especificações das fontes de conversão de energia

As potências da célula a combustível e bateria foram definidas, no item A desta seção, em 10 kW e 30 kW, respectivamente. Parte da potência gerada pela CaC e transferida pela BT são dissipadas em suas respectivas resistências internas. É possível constatar na curva de potência gerada pela CaC, no gráfico superior da Fig. 10, que somente 8,6 kW são efetivamente entregues nos terminais da CaC quando a potência transferida por ela é máxima, ou seja, o rendimento elétrico da CaC, nesta situação, é de 86 %.

A potência média requerida pelo mecanismo de tração elétrica, incluindo as perdas nos processos de conversão de energia, é de 3,5 kW, enquanto que a potência média fornecida pela CaC é de 4,2 kW, durante todo o trajeto do percurso do ciclo de condução europeu NEDC. Com efeito, no final do trajeto a energia acumulada na BT é de 800 kJ, como pode ser observado no gráfico inferior da Fig. 10, pois toda a energia em excesso é acumulada por ela. Lembrar que a potência média do SC é nula.

Em termos das especificações da célula a combustível, é necessário que sua potência seja superior a 10 kW e a tensão de operação, em circuito aberto, seja maior que 160 V. Como a tensão típica de operação da célula a combustível é de 48 V, são necessários 4 módulos de 2,5 kW conectados em série.

Em termos das especificações do banco de baterias, é necessário que ela seja capaz de absorver até 1,25 MJ e sua tensão também deve ser superior a 160V. Em baterias de chumbo-ácido, a tensão de operação típica de veículos automotores de combustão interna é de 12 V, ou seja, é necessário um banco de 14 baterias conectas em série. Deste modo, a capacidade das baterias de chumbo-ácido poderia ser de, no mínimo, 2,1 Ah. No entanto, a capacidade deste tipo de baterias precisa ser dimensionada de acordo com sua máxima corrente. A corrente máxima fornecida pelas baterias deve ser de 187,5 A, de acordo com o item B desta seção. Deste modo, torna-se necessário o emprego de um banco de 14 baterias de 12 V e 200 Ah conectas em série.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo propôs uma metodologia para dimensionar múltiplas fontes de suprimento de energia (célula a combustível, banco de baterias e supercapacitor) para aplicações em veículos elétricos. Em particular, pretende-se utilizar o procedimento descrito para aprimorar o dimensionamento das fontes de conversão de energia e incluir o supercapacitor no VEGA II.

A primeira etapa para dimensionar as fontes foi estimar a demanda de potência do mecanismo de tração elétrica do veículo. Um perfil de velocidade possibilita ajustar algumas especificações do veículo como, por exemplo, aceleração máxima. No entanto, por simplicidade, foi utilizado o novo ciclo de condução europeu NEDC, que descreve o perfil típico de velocidade de trajetos urbanos de cidades como Roma ou Paris concatenado com um ciclo de condução extra-urbano.

A segunda etapa descreveu uma topologia de conversor eletrônico com múltiplas entradas para combinar as três fontes de suprimento e, principalmente, a limitação da faixa de operação em tensão a ser imposta à fonte em decorrência do comprometimento do controle e do rendimento do conversor.

Na terceira e última etapa, foi descrito um procedimento para dimensionar as fontes de acordo com a estimativa de potência fornecida individualmente, considerando as restrições em termos do valor máximo e taxa de variação de corrente das fontes de conversão de energia e as características comerciais das fontes disponíveis no mercado atualmente.

Os resultados para o dimensionamento do supercapacitor e da célula a combustível mostraram-se satisfatórios. No entanto, baterias de chumbo-ácido revelaram-se inadequadas para aplicações em veículos elétricos, devido à enorme capacidade em energia que deve possuir para atender a corrente requisitada em seus terminais e não comprometer a sua vida útil.

A próxima etapa do projeto para atualizar o sistema de suprimento de energia do VEGA II consiste em incorporar os módulos supercapacitores e implementar o MIPEC para coordenar a gestão de energia do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo imprescindível suporte financeiro a este projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi, “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design”, Boca Raton, FL: CRC Press, ISBN: 0-8493-3154-4, Dec. 2004.
- [2] Honda, “Honda's Revolutionary Fuel Cell Vehicle”. Disponível em: <<http://world.honda.com/FuelCell/FCX/>>. Acesso em: 17 de agosto de 2006.
- [3] L. Solero, A. Liddozzi, J. A. Pomilio, “Design of Multiple-Input Power Converter for Hybrid Vehicles,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 5, pp. 1007-1016, September 2005.
- [4] A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, G. Spiazzi, L. A. Silva. “Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System”. No prelo. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007.
- [5] E. A. Gurgel, “Veículo elétrico com sistema energético híbrido: célula de combustível / baterias eletroquímicas”, Campinas, 1998. 139 p. . Tese de doutorado em Engenharia Elétrica – Departamento de Eletrônica e Microeletrônica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- [6] R. Bosh, “Automotive Handbook”, Bentley Publishers, ISBN-13: 978-0-8376-1243-0, 6th edition, Jun. 2000.
- [7] A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, G. Spiazzi, L. A. Silva. “DC-DC Converter Solutions for Modern Electric Vehicle Power Supply Systems”. Aceito para publicação em: Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2007, Blumenau. 9^o COBEP, 2007.
- [8] P. Barrade, A. Rufer, “Considerations on the efficiency of a supercapacitive tank”, MAGLEV 2002 : International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 3-5 September, Lausanne, Switzerland.

DADOS BIOGRÁFICOS

André Augusto Ferreira é engenheiro eletricista formado pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2000), mestre (2002) e doutor (2007) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência e em Qualidade de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: fontes chaveadas, gestão de múltiplas fontes de suprimento, supercapacitores, veículos elétricos e variações de tensão de curta duração. É pós-doutorando no Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas desde fevereiro de 2007, em que trabalha para o aperfeiçoamento do sistema de suprimento de energia do veículo experimental (VEGA) do Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP.

José Antenor Pomilio é engenheiro eletricista, mestre e doutor em Eng. Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. De 1988 a 1991 foi chefe do grupo de eletrônica de potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou estágios de pós-doutoramento junto à Universidade de Pádua e à Terceira Universidade de Roma, ambas na Itália. Foi presidente da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência – SOBRAEP e membro do comitê administrativo da IEEE Power Electronics Society. É editor associado da Transactions on Power Electronics (IEEE) e de Controle e Automação (SBA). É professor da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp desde 1984.

Ennio Peres da Silva possui graduação em Física pela Universidade de São Paulo (1977), mestrado em Física pela Universidade Estadual de Campinas (1981) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (1989). Atualmente é coordenador do Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP (LH2), secretário executivo do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) e professor da Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência nas áreas de Física e Engenharia Mecânica, com ênfase em aproveitamento de fontes renováveis de energia, geração distribuída e em sistemas isolados, atuando principalmente nos seguintes temas: hidrogênio, células a combustível, energia, energia elétrica e fontes renováveis.

Diego Vaz Pontes Cambra é graduando em Física pela Universidade Estadual de Campinas e é integrante LH2 Jr (Grupo de Estudos do Laboratório de Hidrogênio - UNICAMP), em que estuda a incorporação de módulos supercapacitores ao sistema de suprimento de energia do VEGA II.