

ANÁLISE E PROJETO DE UM SUBSISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DISTRIBUÍDO DE ARQUITETURA EMPILHADA PARA CUBESAT

Everson Mattos¹, Antonio M. S. S. Andrade²,
Nelson J. Schuch¹, Mário L. da S. Martins², José R. Pinheiro²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa Maria – RS, Brasil

²Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, Brasil

e-mail: everson.mattos@gmail.com, mariolsm@email.com

Resumo – Um Subsistema Elétrico de Potência (Electrical Power Subsystem - EPS) para pico-satélites é um conjunto de hardware e software, que supre as demandas de energia durante toda a vida útil do satélite. Há diversas classificações para as arquiteturas de EPS. Este trabalho apresenta uma análise e discussão geral das principais arquiteturas de EPS para CubeSats e uma nova arquitetura com base no Sistema de Energia Distribuída (Distributed Power System - DPS), utilizando para isso o conceito de conversores CC-CC empilhados. A topologia proposta garante que o rastreamento do pico de potência (Maximum Power Point Tracking - MPPT) seja realizado concomitantemente com a regulação da tensão do barramento. Com isso, a energia destinada ao barramento CC é processada apenas uma vez a partir do arranjo fotovoltaico. Além disso, devido à conexão paralela da entrada, essa arquitetura permite o redirecionamento de energia à bateria, reduzindo o tempo de carga e assegurando que a bateria estará plenamente carregada para os intervalos de eclipse do satélite. Também, serão apresentados os resultados experimentais que comprovam o funcionamento da arquitetura proposta.

Palavras-chave – Arquitetura Empilhada, Conversor CC-CC, CubeSat, Sistema Distribuído, Subsistema Elétrico de Potência.

DESIGN AND ANALYSIS OF A DISTRIBUTED STACKED ELECTRICAL POWER SUBSYSTEM TO CUBESAT

Abstract – An Electrical Power Subsystem (EPS) for pico-satellites is a set of hardware and software that supplies energy demands throughout the lifetime of the satellite. There are several classifications for EPS architectures. This work presents an analysis and general discussion of the main EPS architectures for CubeSats and a new architecture based on the Distributed Energy System (DPS) using the concept of stacked DC-DC converters. The proposed topology ensures that maximum power point tracking (MPPT) is performed concomitantly with the bus voltage regulation. With this, the energy destined for the DC bus is processed only once from the photovoltaic array. In addition, due to the

parallel connection of the input, this architecture allows the redirection of energy to the battery, reducing the time of charge and ensuring that the battery will be fully charged during the eclipse intervals of the satellite. Also, the experimental results that prove the operation of the proposed architecture will be presented.

Keywords – CubeSat, DC-DC Converters, Distributed System, Electrical Power Subsystem, Stacked Architecture.

I. INTRODUÇÃO

Um CubeSat é a designação dada a um pico-satélite com dimensão padronizada e peso limitado [1]. Essa classificação de satélite foi desenvolvida com cunho didático, multidisciplinar, conjuntamente entre a universidade de Stanford e a universidade politécnica da Califórnia em 1999. Atualmente o padrão CubeSat propicia uma plataforma de desenvolvimento acessível às universidades e às empresas de pequeno porte, para desenvolverem pesquisa e tecnologia aeroespaciais, a custo reduzido, tanto de projeto quanto de lançamento [2]. Um dos fatores que contribuem para a redução do custo é utilização de componentes essencialmente de mercado (*Commercial-Off-The-Shelf* - COTS), no projeto do CubeSat.

Um CubeSat é composto por diversos subsistemas, os principais são: o controle de atitude (*Attitude Control Subsystem* - ACS), o subsistema de comunicação (*Communication Subsystem* - CS), o computador de bordo (*On Board Computer* - OBC), as cargas úteis (*Payload* - PL) e o subsistema elétrico de potência (*Electrical Power Subsystem* - EPS). O EPS do CubeSat gera energia a partir de células fotovoltaicas (FV), processa e regula a energia, em diferentes níveis, suprindo os subsistemas e garantindo energia para a execução da missão do satélite [3], [4]. O EPS, também, armazena energia para os períodos de pico de demanda ou para operação no período de eclipse. Os EPS's podem ser classificados com relação à distribuição de energia em: arquitetura concentrada e distribuída [5], [6]. A Figura 1 (a) representa um sistema centralizado, com múltiplas saídas independentes, onde a energia de cada fonte independente já está condicionada para uso de cada um dos subsistemas do CubeSat. E a Figura 1 (b) representa um subsistema distribuído dotado de um único barramento CC que leva energia para todas as cargas e subsistemas. Neste caso, os subsistemas devem possuir localmente um conversor que

Artigo submetido em 06/12/2016. Primeira revisão em 27/01/2017. Aceito para publicação em 03/04/2017 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

condicione a energia para o uso, normalmente chamado de conversor de ponto de carga (*Point-of-Load - PoL*).

Há inúmeras vantagens no uso da arquitetura distribuída, as principais são: redução do ruído irradiado, melhor distribuição térmica, maior flexibilidade e reaproveitamento de projeto do EPS [6], [7]. A redução de ruído irradiado dá-se ao incluir um conversor regulador (PoL), próximo a carga, reduzindo assim os laços de corrente e o acoplamento do barramento CC. A redução de ilhas de calor dá-se devido a melhor distribuição dos conversores CC-CC, que são as principais fontes de geração de calor do EPS. A flexibilização do projeto torna-se possível pois naturalmente a estrutura distribuída necessita gerar apenas uma tensão e corrente (potência) compatíveis com a demanda do CubeSat. Assim, o uso de componentes adequados, ou a inclusão de módulos em paralelo, permite atender a diversos projetos de EPS.

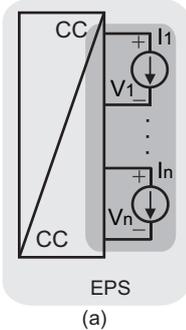
Neste trabalho uma nova arquitetura de EPS é proposta e analisada. Essa arquitetura utiliza os conceitos de sistemas distribuídos. A característica principal dessa arquitetura é o empilhamento da saída de um conversor com a bateria. Isso permite melhorar a confiabilidade, reduzir o tempo de carga da bateria, e aumentar a eficiência. Este artigo está organizado da seguinte forma. A seção II mostra uma revisão dos subsistemas EPS, a seção III apresenta análises estáticas da arquitetura proposta, a seção IV apresenta o sistema de controle utilizado, as funções de transferência e os controladores. Por fim, a seção V mostra os resultados experimentais.

II. ARQUITETURA DOS SUBSISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA (EPS)

Os EPS's de arquitetura distribuída possuem quatro blocos funcionais básicos, conforme pode ser visualizado na Figura 2 (f): fonte primária; fonte secundária; sistema de distribuição de energia; e sistema de regulação e controle de potência [5]. A fonte primária usualmente é composta de um arranjo fotovoltaico (FV), que converte a radiação solar em energia elétrica. Ela é responsável por gerar a energia elétrica para o pico-satélite durante o período de sol. A fonte de energia primária limita a quantidade de energia disponível para a missão do satélite. Já, as restrições mecânicas (volume e peso) e o custo limitam a capacidade instalada da fonte primária.

A fonte secundária consiste em um sistema de

Sistema Centralizado



Sistema Distribuído

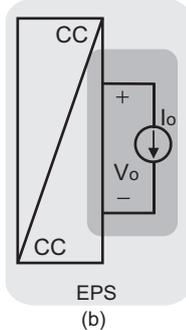


Fig. 1. Classificação quanto a distribuição de energia para EPS: (a) concentrado; (b) distribuído.

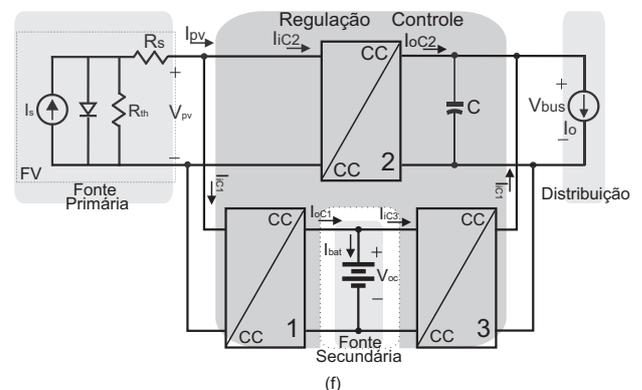
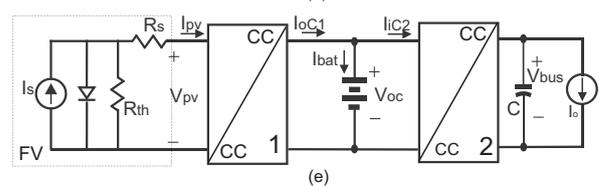
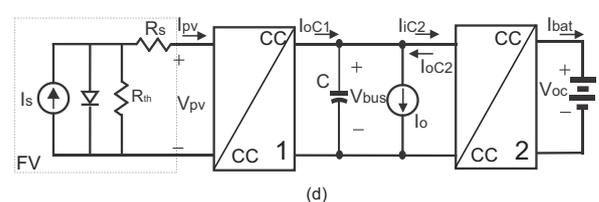
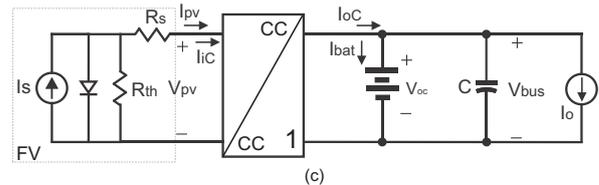
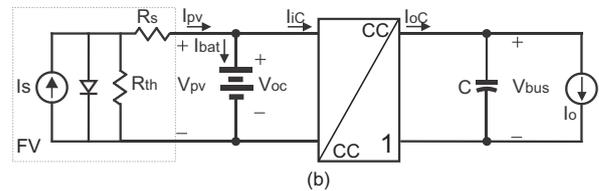
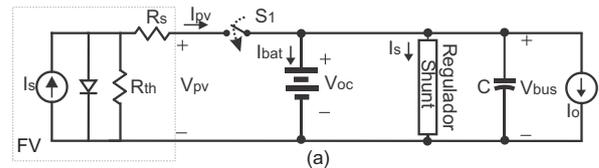


Fig. 2. Principais arquiteturas de EPS: (a) EPS do tipo DET; (b) EPS do tipo DET com barramento regulado; (c) EPS com MPPT; (d) EPS com MPPT e controle de carga e descarga da bateria; (e) EPS do tipo Cascata; (f) EPS com MPPT, regulador de barramento e controle de carga e descarga da bateria.

armazenamento de energia. O armazenamento de energia é necessário uma vez que qualquer satélite que utiliza energia fotovoltaica, como fonte primária, deve armazenar energia para suprir os subsistemas durante os períodos de pico de demanda ou de eclipse (T_e). O armazenamento de energia normalmente ocorre em baterias recarregáveis, que são dispostas em série para aumentar a tensão ou em paralelo para aumentar a corrente de saída.

O EPS de arquitetura concentrada normalmente apresenta mais de uma tensão e corrente adequadas ao uso dos

subsistemas do satélite. Por outro lado, O EPS de arquitetura distribuída é caracterizado por apresentar apenas um barramento CC comum e por utilizar conversores locais (PoL) que adequam a energia para os subsistemas. À regulação e ao controle de potência são atribuídas as seguintes tarefas: controle da energia gerada no arranjo fotovoltaico; regulação da tensão do barramento CC para os subsistemas e controle do estado de carga das baterias. Há duas principais arquiteturas de regulação e controle de potência: as que fazem o rastreamento do ponto de máxima potência (Maximum Peack Power Traking - MPPT) e as que fazem transferência de energia direta (Diret Energy Transfer - DET).

As Figuras 2 (a) e (b) apresentam arquiteturas do tipo DET, onde a bateria é conectada diretamente ao FV. A arquitetura da Figura 2 (a) propicia uma solução simples e de baixo custo para o EPS. Todavia, não permite retirar a máxima potência do FV. Não é possível realizar o controle da corrente de carga para a bateria, assim, um regulador *shunt* deve ser conectado no barramento CC para proteger a bateria de sobrecarga. A corrente de carga da bateria depende da diferença de tensão entre o arranjo fotovoltaico e o estado de carga da bateria. As correntes dos subsistemas do CubeSat alteram o valor da corrente de carga da bateria, assim, são consideradas distúrbios de potência. Também não há regulação do barramento CC para os subsistemas. Esta última restrição pode ser superada com a adição de um conversor regulador entre a bateria e barramento CC como mostra a Figura 2 (b). Nesta arquitetura as correntes dos subsistemas do CubeSat são desacopladas da corrente da bateria devido ao conversor regulador de barramento CC, entretanto, as demais restrições supracitadas persistem.

Nas arquiteturas com MPPT vistas nas Figuras 2 (c)-(f), há no mínimo um conversor CC-CC, que executa o algoritmo de MPPT. O algoritmo impõe uma determinada razão cíclica ao conversor, forçando-o a adequar a sua impedância de entrada à impedância de saída do FV. Isso para rastrear o ponto de máxima transferência de potência. O algoritmo de MPPT monitora a potência e a tensão, perturbando a tensão ou a corrente e incrementando ou decrementando a perturbação de acordo com a variação da potência. Independentemente do método de carga da bateria, a tensão de saída do conversor CC-CC, que realiza o MPPT, não é regulada. Na arquitetura da Figura 2 (c) a carga da bateria é obtida pelo conversor que realiza o MPPT, todavia, os subsistemas conectados ao barramento CC funcionam como distúrbios de potência, limitando o valor da corrente de carga da bateria. Nessa arquitetura não há conversor regulador do barramento CC para os subsistemas.

Para realizar a regulação do barramento CC (V_{bus}), um segundo conversor CC-CC deve ser empregado, como mostram as Figuras 2 (d), 2 (e) e 2 (f). Na Figura 2 (d) a carga da bateria pode ser controlada de zero até o valor da corrente de MPPT, entretanto, o barramento CC para os subsistemas não é regulado. Esta limitação é superada na arquitetura da Figura 2 (e). Nas Figuras 2 (e) e 2 (f), o FV é conectado ao barramento de distribuição através de um conversor de único estágio, permitindo assim maior eficiência, quando comparado com topologias que utilizam conversores bidirecionais, como por exemplo a arquitetura da Figura 2 (d). Na Figura

2(f), o conversor bidirecional foi substituído por conversores unidirecionais, um carregador realizando MPPT e o outro regulando o barramento CC para os subsistemas do CubeSat. A arquitetura da Figura 2 (f), assegura que a energia gerada no FV seja processada por apenas um conversor independente de sua aplicação. O que aumenta a eficiência quando comparado com arquiteturas que utilizam dois conversores para processar a energia, como por exemplo a arquitetura da Figura 2 (e). Por outro lado, há o aumento do tamanho, do peso e do custo do EPS.

A. Arquitetura Proposta

Dentre as arquiteturas que realizam MPPT, e realizam a carga da bateria no menor tempo possível, a arquitetura da Figura 2 (f) destaca-se das demais, pois, permite que tanto a corrente de carga da bateria, quanto a tensão do barramento CC, V_{bus} , sejam completamente reguladas. Todavia, considerando apenas o rendimento na transferência de energia, a topologia da 2 (a) destaca-se, pois, considera-se que não há perdas na transmissão da energia gerada.

As arquiteturas da Figura 2 são Subsistemas de Distribuição de Potências CC (DC-DPS). Os DPS normalmente empregam técnicas de projetos modulares e são caracterizados pela existência de um barramento comum que supre as demandas dos subsistemas. As principais vantagens dos DPS são: a distribuição térmica mais homogênea, a redução do tamanho do módulo, a modularidade, a redundância, a regulação de ponto-de-carga (PoL) e a estrutura flexível e reutilizável de layout. Todas essas vantagens proporcionam um projeto padronizado e reaproveitável.

A aplicação da configuração empilhada aditiva do DPS para os sistemas de potência do CubeSat pode ser visualizada na Figura 3. As arquiteturas de DPS são derivadas da combinação de cinco estruturas básicas: paralela, série, divisão de fonte, divisão de carga e módulos empilhados [6]. As conexões paralelas são empregadas para garantir a padronização e redundância da arquitetura, em detrimento da redução das perdas na distribuição de energia. Já o empilhamento de conversores permite combinar as saídas dos conversores individuais para obtenção de diferentes níveis de tensão.

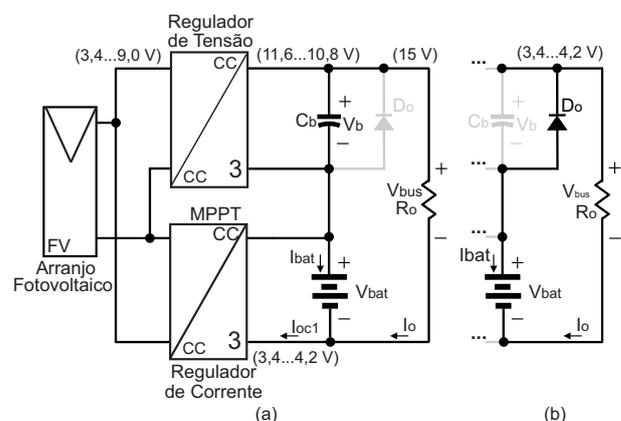


Fig. 3. DPS proposto, empilhamento aditivo das saídas: (a) arquitetura para o período de Sol; (b) arquitetura para o período de eclipse.

A configuração de empilhamento aditiva, por exemplo, fornece tensão de saída mais elevada do que a dos conversores individuais e assim, reduz a corrente, logo, as perdas por condução, melhorando a eficiência do sistema. Na Figura 3 é apresentado um diagrama de blocos do DPS proposto onde, um conversor realiza o controle da tensão V_{bus} e o outro conversor realiza dupla função, a de busca do ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico e a do controle da corrente de carga da bateria.

Na configuração empilhada, a saída do conversor carregador de bateria e a do conversor regulador da tensão do barramento CC estão conectadas em série formando uma pilha de capacitores de saída. Assim, a tensão do barramento CC é realmente a soma da saída de ambos os conversores e, portanto, é sempre maior que a tensão do arranjo fotovoltaico. Desta forma, o regulador de tensão do barramento deve ser um conversor elevador de tensão, por simplicidade, o conversor *boost* não isolado foi escolhido.

Para permitir diversas configurações de FV e bateria, ou seja, flexibilizar a organização tanto do FV quanto da bateria, um conversor abaixador/elevador foi escolhido com dupla função, a de controlar a carga da bateria e a de realizar o MPPT. Novamente pela simplicidade, foi escolhido o conversor *buck-boost*, que controla a corrente de carga da bateria através de uma malha de controle, empregando um compensador proporcional-integral-derivativo (PID).

A referência de corrente de carga da bateria é fornecida pelo algoritmo de MPPT. Esse algoritmo é responsável por rastrear a máxima potência do arranjo fotovoltaico e assim permitir o redirecionamento de energia. Conseqüentemente, ocorre a redução no tempo de carga das baterias, otimizando-o. Para fornecer essa capacidade de rastreamento, o algoritmo Perturba & Observa (P&O) foi implementado. Esse algoritmo é um método direto para encontrar o ponto de máxima potência [8], [9]. Para a implementação proposta, a variável perturbada é a corrente de carga da bateria (I_{bat}). As variáveis observadas são a potência e a tensão do FV.

III. ANÁLISE DOS CONVERSORES DO EPS DE ARQUITETURA EMPILHADA

Para simplificar as análises dos conversores empilhados, considerando um período de chaveamento, as seguintes considerações são feitas:

- Os conversores operam em regime permanente;
- Todos os semicondutores são considerados ideais;
- Os capacitores são grandes o suficiente garantindo assim que suas tensões sejam constantes;
- A tensão de entrada é considerada constante.

A. Conversores Reguladores do Barramento CC para os Subsistemas

A Figura 4 ilustra o *boost* formando a configuração empilhada com o conversor *buck-boost* carregador de baterias. Nessa aplicação, o conversor *boost* regula a tensão do barramento CC (V_{bus}). O conversor *boost* é bastante difundido na literatura, assim, a descrição detalhada do seu funcionamento encontra-se em livros como por exemplo [10]-[12]. Portanto, nesse artigo serão apresentadas somente as equações principais.

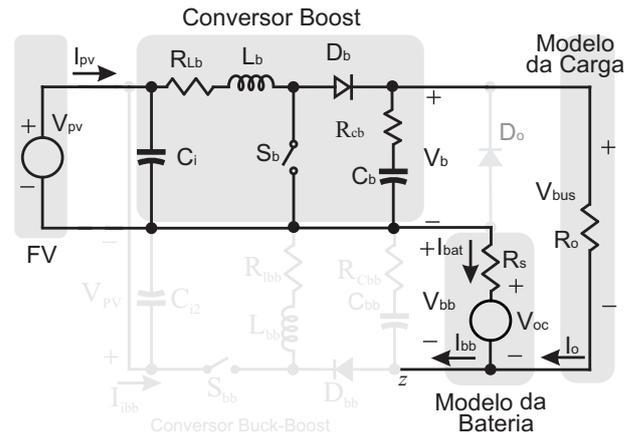


Fig. 4. Conversor regulador do barramento CC para os subsistemas.

A Figura 5 ilustra a característica estática do conversor *boost* operando como regulador de tensão. O gráfico da Figura 5 foi obtido usando o princípio do balanço de energia no indutor L_b para se obter o ganho estático do conversor *boost*. No modo de condução contínua (MCC), o ganho estático é dado por:

$$M_{MCC} = \frac{1}{1-D}. \quad (1)$$

Quando a corrente do indutor diminui e toca o eixo das abscisas impõe ao conversor o modo de operação *boundary* ou fronteira (BCM). A fronteira entre os modos de condução contínua e descontínua, considerando a tensão de saída constante (V_b), é descrita por:

$$M_{BCM} = \sqrt{\frac{27D(1-D)^2}{4I_{on}}}. \quad (2)$$

Quando a corrente no indutor diminui o suficiente, torna-se descontínua e o conversor passa a operar no modo de condução descontínua (MCD). Nesse caso, considerando-se a tensão de saída regulada (V_b constante), o ganho em MCD, para o

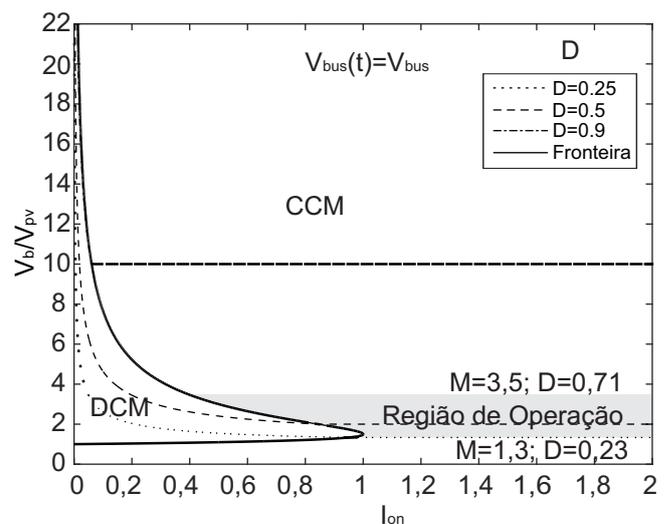


Fig. 5. Característica estática do conversor *boost* como regulador de tensão e definição da região de operação.

conversor *boost* é dado por:

$$M_{DCM} = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{D^2}{27 I_{on}}} \quad (3)$$

De acordo com (1)-(3), verifica-se que os modos de operação do conversor dependem da corrente de saída (I_o), da razão cíclica (D) e do valor da indutância do indutor do conversor *boost* (L_b). Considerando-se a variação da tensão do arranjo fotovoltaico devido a translação do satélite, o ganho estático do conversor *boost* pode transitar de um valor mínimo até um valor máximo, dependendo da razão cíclica.

A razão cíclica máxima admissível é limitada pelas perdas de condução do conversor *boost*. Da mesma forma, para uma determinada razão cíclica, a operação no modo MCC fornece valores de corrente RMS menores no indutor e, conseqüentemente, perdas de condução menores. Assim, a região de operação é escolhida de acordo com a Figura 5.

B. Conversor Carregador de Baterias e MPPT

O circuito apresentado na Figura 6 mostra o conversor *buck-boost* de arquitetura empilhada. A partir do princípio do balanço de energia no indutor L_{bb} do conversor *buck-boost*, encontra-se o ganho estático do conversor, que pode ser reescrito conforme:

$$D_{CCM} = \frac{M}{1+M} \quad (4)$$

A fronteira entre os modos MCC e MCD é dada por:

$$D_{BCM} = \sqrt{I_{in}} \quad (5)$$

onde I_{in} é a corrente de entrada normalizada, dada por:

$$I_{in} = 4(1-D)D \quad (6)$$

Assim, realizando uma análise similar a do conversor *boost*, a razão cíclica para o MCD é dada por:

$$D_{MCD} = \sqrt[3]{\frac{I_{in}}{1 + \frac{1}{M_{DCM}}}} \quad (7)$$

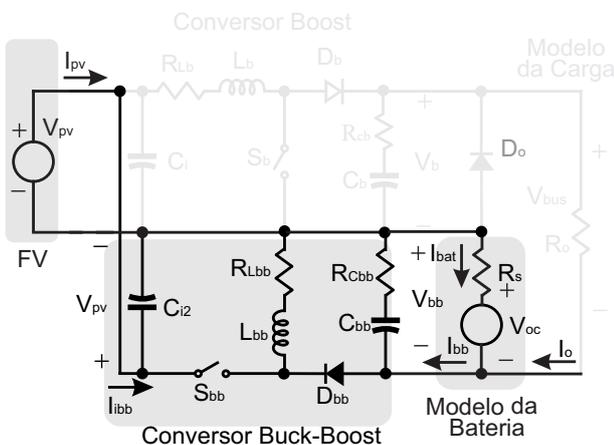


Fig. 6. Conversor regulador da corrente de carga da bateria.

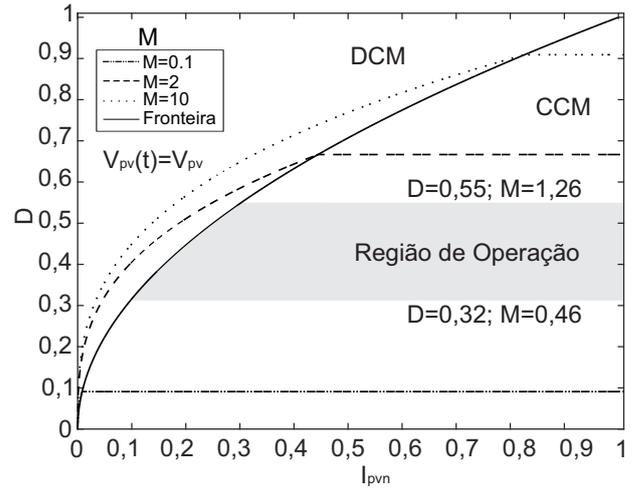


Fig. 7. Característica estática do conversor *buck-boost* como regulador de tensão e definição da região de operação.

A Figura 7 apresenta as características da razão cíclica versus a corrente de entrada normalizada e a tensão e a corrente dos FVs normalizada de acordo com as Equações (4)-(6). As características do FV e do ganho estático do conversor *buck-boost* proporcionam uma região de operação de projetos do conversor.

IV. CONTROLE DOS CONVERSORES DA AQUITETURA PROPOSTA

Nesta seção é apresentado o projeto do sistema de controle para os conversores do EPS. A Figura 8 mostra o diagrama esquemático do sistema de controle projetado. A planta foi discretizada utilizando segurador de ordem zero (Zero order Holder - ZoH). Foi incluído um atraso de implementação na planta discretizada e realizada a transformação conforme, convertendo a planta para o plano $\bar{\omega}$. No plano $\bar{\omega}$, o projeto dos controladores foi realizado usando as técnicas de projeto no domínio da frequência. Foi utilizado, para sintonia dos polos e zeros dos controladores, avanço e atraso de fase. Foi adotado como especificação para o projeto dos controladores um sobressinal máximo de 10%, um coeficiente de amortecimento de 0,7 e uma margem de fase de 60° . Por fim, usando novamente (ZoH), os controladores foram discretizados.

A. Controle de Tensão do Conversor Boost

O sistema de controle da tensão do barramento CC para as cargas do cubesat é composto de uma malha de realimentação simples, onde $C_{V_{bus}}(s)$ é o compensador, V_m é o ganho do modulador por largura de pulso (pwm), $H_v(s)$ é o ganho do sistema de instrumentação de tensão e $G_{V_{bus}}(s)$ é a planta. Como a referência de tensão é fixa, um controlador proporcional-integral (PI), em princípio, seria suficiente. Entretanto, para se atingir a margem de fase próxima a 60° é necessário a inclusão de um controlador proporcional-derivativo (PD). Logo um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) foi escolhido para controle da tensão do barramento CC distribuído para as cargas do CubeSat. A função de transferência de malha aberta que será usada para

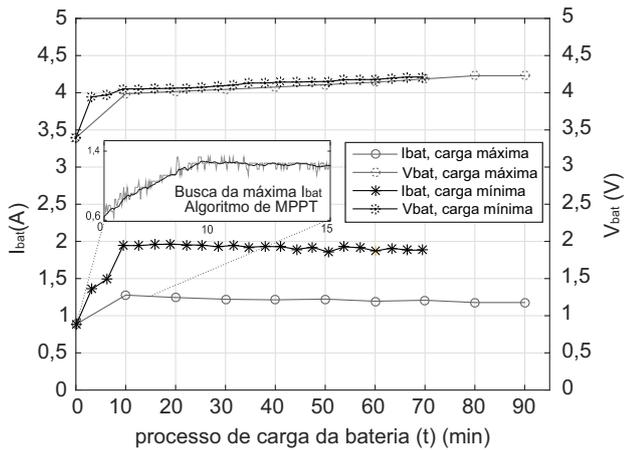


Fig. 9. Corrente e tensão na bateria com carga mínima e máxima do CubeSat.

bateria em intervalos regularmente espaçados de 10 minutos aproximadamente, encontrando, assim, o gráfico de carga máxima (50Ω), onde, os círculos representam as amostras obtidas. A Figura 9 mostra, também, a variação da corrente de carga da bateria nos minutos iniciais, onde ocorre a busca do ponto de máxima potência, traduzida na busca da máxima corrente de carga para a bateria

Na condição de carga máxima, o conversor *buck-boost* entrega à bateria a corrente de aproximadamente 1,2 A. Nessa situação, a potência disponível tanto para o conversor *boost* quanto para o conversor *buck-boost* é de 4,5 W. O algoritmo de P&O está ativo, mas, a corrente de carga da bateria não é a máxima, pois, o CubeSat está com carga máxima, ou seja, todos os subsistemas estão ativos.

Para o processo de carga onde a corrente é regulada em 1,9 A, a amostragem foi realizada a cada 3 minutos, as amostras são representadas por asteriscos. Nesse caso, a potência utilizada pelos subsistemas do CubeSat é mínima (1,125 W). A potência não utilizada pelos subsistemas do Cubesat é redirecionada para a carga da bateria. Isso se traduz na elevação da corrente de carga da bateria para aproximadamente 1,9 A, e na redução do tempo de carga em aproximadamente 20 minutos.

As Figuras 10 (a) até (d) mostram a tensão no barramento CC para os subsistemas, a corrente de carga dos subsistemas do CubeSat, a tensão na bateria e a corrente de carga da bateria, respectivamente, quando o sistema está operando no ponto (X), indicado na Figura 14.

A Figura 11 mostra que o sistema está buscando o ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico, e que permanece operando próximo a ele durante os intervalos de carga da bateria, tanto para situação de carga máxima como para mínima. A variação da corrente do conversor *buck-boost* (controle da corrente de carga da bateria) depende exclusivamente do algoritmo de busca do ponto de máxima potência. Contudo, é possível verificar o funcionamento do algoritmo de MPPT verificando que os valores da potência de saída estão sempre próximas a 9 W, considerando a soma da potência de cada conversor. Considerando ainda o rendimento de aproximadamente 0,8, percebe-se que o arranjo fotovoltaico está operando na máxima potência de 11,25 W, conforme mostra a Figura 11.

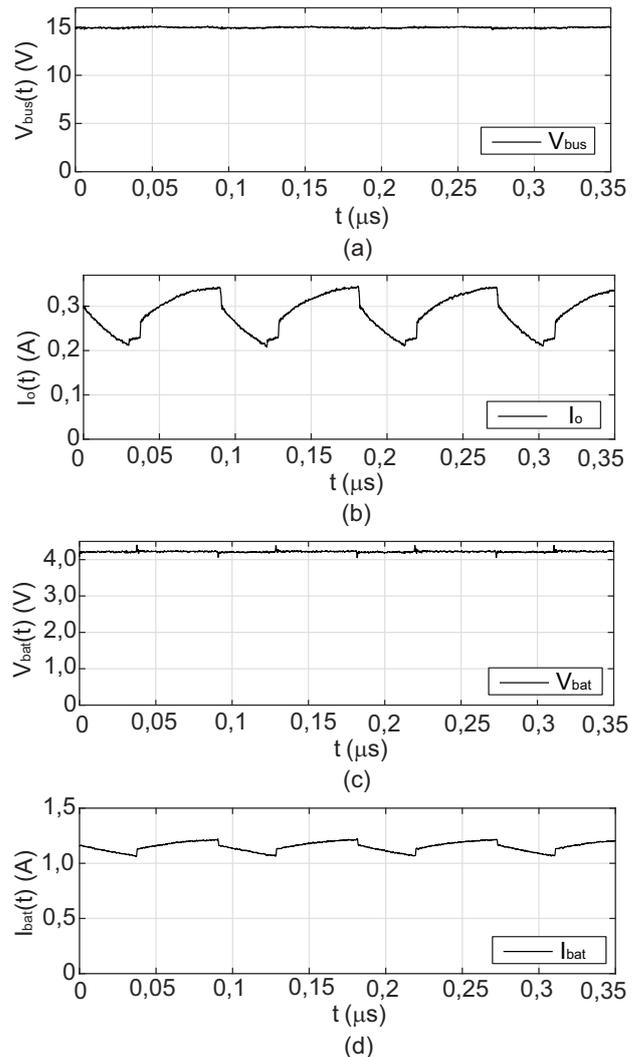


Fig. 10. Correntes e tensões nos conversores no ponto (x) da Figura 14 (operação com carga nominal e bateria carregada): (a), (b) para o conversor *boost*; (c) e (d) para o conversor *buck-boost*.

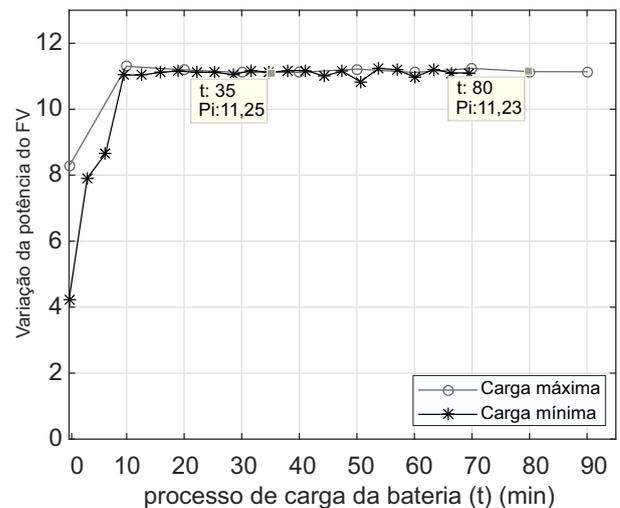


Fig. 11. Potência do arranjo fotovoltaico para carga máxima e mínima do CubeSat.

As Figuras 12 e 13 mostram o funcionamento dos compensadores perante uma variação de carga de 50%. Na Figura 12 observa-se que o subsinal, devido a variação da carga de (50% para 100%), foi de aproximadamente 0,3 V, que está compreendido dentro da faixa do erro em regime permanente de 2%, logo, o tempo de acomodação pode ser desconsiderado.

Na Figura 13 observa-se que o subsinal, devido a variação da carga de (50% para 100%), foi de aproximadamente 0,2 A e o tempo de acomodação foi de aproximadamente 0,7 segundos. Os resultados estão de acordo com os requisitos de projeto dos controladores. Por fim, a Figura 14 mostra o gráfico do rendimento do EPS de arquitetura empilhada para diversas configurações de carga do CubeSat. Ou seja, quando há desconexão parcial ou total de alguns subsistemas. Onde, 50 Ω é a carga máxima permitida no conversor *boost* e 200 Ω é a carga mínima do CubeSat.

VII. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi proposta uma arquitetura de EPS cujos conversores regulador de tensão do barramento e

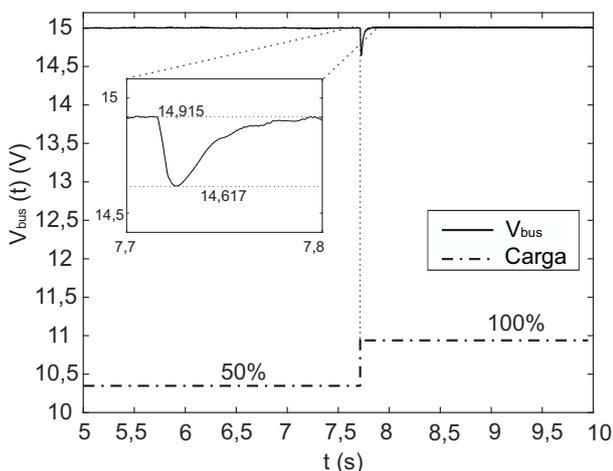


Fig. 12. Resultado experimental do controlador do conversor *boost*.

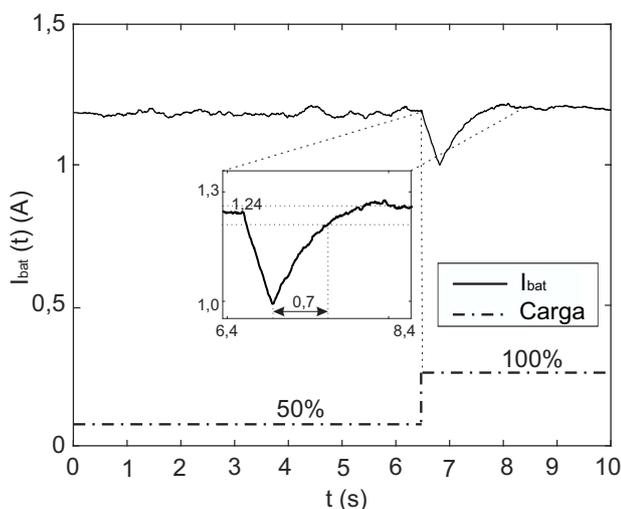


Fig. 13. Resultado experimental do controlador do conversor *buck-boost*.

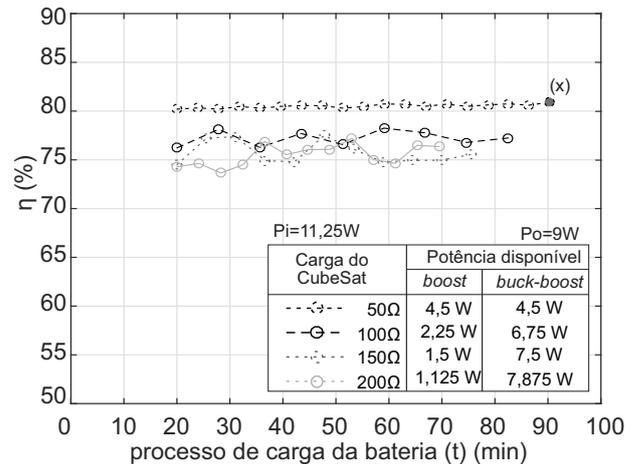


Fig. 14. Rendimento do conversor de arquitetura empilhada para diversas cargas do CubeSat.

regulador de carga das baterias estão conectados de forma empilhada. Durante o período de insolação quando o algoritmo de MPPT está ativo, o EPS é capaz de extrair e redirecionar a máxima energia disponível para carga das baterias. Essa arquitetura permite também, que as baterias sejam conectadas diretamente ao barramento CC durante o período de eclipse, funcionando como um sistemas DET. Com isso, otimiza-se ambas as condições de operação do EPS. Os conversores foram modelados utilizando o modelo médio por espaço de estado. Os controladores digitais foram implementados em DSP. Verificou-se o seu funcionamento por meio de um protótipo. Os resultados experimentais validam a modelagem e o procedimento de projeto dos controladores de tensão do barramento CC e o controle de corrente para a carga da bateria.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/PROEX).

REFERÊNCIAS

- [1] L. Alminde, M. Bisgaard, D. Vinther, T. Viscor, K. Z. Østergard, "The AAU-CubeSat student satellite project: architectural overview and lessons learned", in *16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, (Russia), pp. 949-954, 2004.
- [2] H. Heidt, J. Puig-Suari, A. Moore, S. Nakasuka, R. Twiggs, "CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation", in *14th AIAA/USU Conference on Small Satellites*, pp. 894-900, 2000.
- [3] S. J. Kim, B. H. Cho, "Analysis of spacecraft battery charger systems", in *proceedings of 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)*, pp. 365-372, 1990.
- [4] O. Shekoofa, E. Kosari, "Comparing the topologies of satellite electrical power subsystem based

- on system level specifications", in *2013 6th International Conference On Recent Advances In Space Technologies (RAST)*, p.671-675, 2013.
- [5] G. Farahani, M. Taherbaneh, "Extracting best reliable scheme for Electrical Power Subsystem (EPS) of satellite", in *Proceedings Of 5th International Conference On Recent Advances In Space Technologies (RAST)*, p.532-537, 2011.
- [6] S. Luo, "A review of distributed power systems part I: DC distributed power system", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 20, no. 8, pp. 5-16, Aug. 2005.
- [7] R. Burt, *Distributed electrical power system in cubesat applications*, Dissertação de Mestrado, Utah state university, Logan, Utah, 2011.
- [8] P. Bhatnagar, R. Nema, "Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, no. 7, pp. 224-241, Jul, 2013.
- [9] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, A. Lázaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555-1578, Jul, 2006.
- [10] R. W. Erickson, D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [11] A. Ahmed, *Eletrônica de potência*, Pearson Education do Brasil, 2000.
- [12] N. Mohan, *Power Electronics: A First Course*, Wiley, 2011.
- [13] S. Buso, P. Mattavelli, *Digital Control in Power Electronics*, Morgan & Claypool, 2006.

DADOS BIOGRÁFICOS

Everson Mattos, Engenheiro Eletricista pela UFSC em 1999, mestrado em Eletrônica de Potência pela UFSM (GEPOC) em

2016. Atualmente é aluno de Doutorado na mesma Instituição e Tecnologista Senhor do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE). Áreas de Interesse: Processamento de energia para satélites. É membro da SOBRAEP e da SBA.

Antônio Manuel Santos Spencer Andrade Engenheiro de Controle e Automação pela UCS em 2012, mestrado em Eletrônica de Potência pela UFSM (GEPOC). Atualmente é aluno de Doutorado na mesma Instituição. Áreas de Interesse: Processamento de energia fotovoltaico. Conversores de alto ganho de tensão e inversores. É membro da SOBRAEP e do IEEE.

Nelson Jorge Shuch PhD. em Física pela Universidade de Cambridge em 1979. Atualmente é pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Coordenador do programa Nanosat-BR. Áreas de Interesse: Energias Renováveis; NanoSat, amplificadores de potência e geração distribuída de energia elétrica.

Mário Lúcio da Silva Martins Doutor em Engenharia Elétrica pela UFSM (GEPOC), Santa Maria, Brazil, em 2008. Desde 2012, é professor Adjunto da UFSM. Áreas de interesse: SMPS, inversores FV e energias renováveis. É membro da SOBRAEP e algumas sociedades do IEEE.

José Renes Pinheiro Doutor em Engenharia Elétrica UFSC, em 1994. Atualmente é professor Titular do Departamento de Processamento de Energia Elétrica (DPEE) da UFSM. Pós-doutorado no Center for Power Electronics Systems (CPES), da Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), USA, em 2002. Fundador do Grupo de Pesquisa em Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC) da UFSM. Suas principais áreas de interesse incluem Sistemas Híbridos de Alimentação em Alta Frequência, Modelagem, Controle e Otimização de Conversores Estáticos e Sistemas Distribuídos de Energia. É membro do IEEE, SBA e da SOBRAEP.