



V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
V NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
25 a 28 de agosto de 2008 – Salvador – Bahia - Brasil
August 25 – 28, 2008 - Salvador – Bahia – Brazil

ESTIMAÇÃO EM TEMPO REAL DO ESTADO DE CARGA DE BATERIA NÍQUEL CÁDMIO EM SATÉLITES DE ÓRBITA BAIXA

Renato Oliveira de Magalhães, renato@dea.inpe.br¹
Hélio Koiti Kuga, hkk@dem.inpe.br¹
Roberto V. F. Lopes, roberto@dss.inpe.br¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas 1758 12227-010 São José dos Campos, SP

Resumo: Propõe-se um método para estimar o estado de carga de uma bateria Níquel Cádmio, a bordo de satélites, em tempo real. Um satélite de órbita baixa, na faixa de 500 a 1000km de altitude, em cada órbita passa por períodos iluminados pelo Sol e por períodos de eclipse da Terra, que caracterizam os ciclos de carga e descarga da bateria. Assim sendo, a capacidade de carga da bateria é um dos fatores mais importantes que limitam a vida útil de uma missão espacial, uma vez que é submetida a condições de operação extremas. Com o decorrer da missão, a bateria se degrada e sua capacidade de carga começa a comprometer a execução da missão. Com capacidade degradada, a bateria pode não ser capaz de alimentar outros subsistemas do satélite como a carga útil, o controle de atitude ou o computador de bordo, resultando em falhas de alguns subsistemas, e consequentemente a deterioração da missão e diminuição da vida útil. Neste artigo, para o satélite CBERS ("China-Brazil Earth Resources Satellite"), propõe-se utilizar dados de telemetrias de vôo do satélite, correspondentes ao sistema de suprimento de energia, que são obtidas no centro de controle de satélites do INPE. Estes dados são medidas que possibilitam ajustar os parâmetros do modelo da bateria durante o período iluminado do satélite, e assim obter o estado de carga da bateria durante seu período de eclipse, em tempo real. O processamento desses dados é feito através de técnicas de estimação de parâmetros e de estado, viz. Mínimos Quadrados e Filtro de Kalman. O artigo contém uma revisão deste problema, estabelece os modelos para capacidade de carga da bateria, nas diversas fases da missão, discute os métodos e as soluções existentes. O desempenho funcional do procedimento é analisado, com dados abrangendo as várias fases da vida do satélite. Por fim verifica-se a viabilidade do procedimento de estimação, para implementação no computador de bordo, para monitoramento em tempo real do estado de carga da bateria..

Palavras-chave: Estimação, Filtro de Kalman, Baterias Níquel Cádmio, Estado de Carga, CBERS.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de suprimento de energia em satélites de órbita baixa, na faixa de 500 a 1000 km de altitude sofrem uma grande quantidade de ciclos alternados de iluminação solar e eclipse. Painéis solares e baterias têm sido amplamente usados como fonte e armazenamento de energia elétrica, respectivamente, em grande parte dos sistemas presentes atualmente. No caso do satélite CBERS2, projetado para uma vida de 2 anos, células de silício e baterias de Níquel Cádmio foram a solução para prover 1500W a um barramento regulado de 28V ao longo de sua órbita.

As principais funções presentes no condicionamento de energia de um sistema como este são mostradas no diagrama de blocos da Figura 1. Neste diagrama, as siglas contêm em si o significado de cada uma dessas funções. Dessa forma, BCHC ("Battery Charging and Heating Controller") é responsável pelo controle térmico e carga da bateria durante o período solar. Esta carga é feita a partir dos painéis solares SAG ("Solar Array Generator"). O BDR ("Battery Discharge Regulator") regula o barramento de 28V durante o eclipse e o SHUNT fornece a energia necessária ao barramento de 28V durante o período solar. Caso haja uma demanda de energia superior à capacidade do SHUNT, o BDR fornece o excedente.

Pesquisas têm sido feitas em novos dispositivos de armazenamento de energia como, por exemplo, "flywheels", que transformam e armazenam energia elétrica em cinética rotacional, utilizando para isso discos girantes. Parte do desafio consiste na tecnologia de materiais resistentes o suficiente para suportar as altas rotações exigidas. Uma das vantagens desses dispositivos é o fato de que a medida da velocidade de rotação nos dá uma indicação direta do estado de carga ou de energia em que se encontra o "flywheel". No caso de baterias, conhecer o estado de carga se torna um desafio maior devido ao fato de que este estado é dependente de múltiplas variáveis.

Neste trabalho, estaremos observando duas variáveis, medidas por meio de sensores e enviadas como telemetria às estações de solo. Essas variáveis representam o potencial e o fluxo de corrente na bateria do sistema. Queremos utilizar estas medidas para obter os parâmetros de um modelo elétrico durante o período iluminado e utilizar este modelo para

estimar o estado de carga da bateria em tempo real, à medida que esses dados cheguem às estações de controle do satélite.

Estimação de estado de carga de baterias vem sendo uma área de grande pesquisa em aplicações como carros elétricos ou híbridos (Pang et al., 2001), que utilizam baterias de chumbo-ácido para armazenar energia elétrica. Uma grande diferença comparada com a aplicação espacial é a intensa variação dos ciclos de carga e descarga, no caso de carros elétricos, influenciada entre outros fatores pelas acelerações que sofrem o veículo.

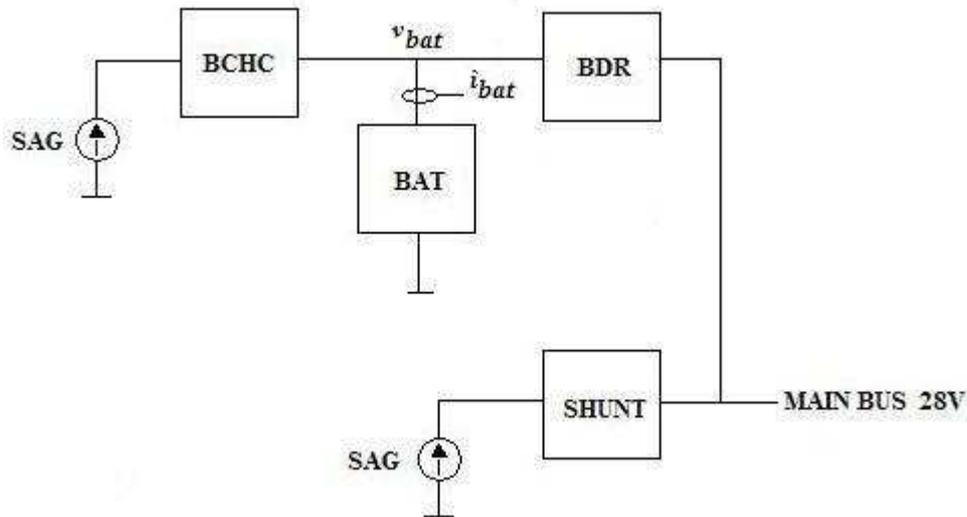


Figura 1 – Diagrama de blocos com as principais funções de condicionamento de energia do satélite CBERS.

2. ESTIMAÇÃO

Conforme já dito, o objetivo deste artigo é utilizar os dados de telemetria de corrente e tensão da bateria, e com eles, estimar os parâmetros de seu modelo elétrico durante o período solar, e a partir deste modelo, estimar o estado de carga da bateria durante o eclipse. No satélite CBERS2, as telemetrias de baixa prioridade, como é o caso das baterias, são amostradas a cada 52s. Com o objetivo de não sobrecarregar a memória, a cada janela de intervalo de 7 minutos, são armazenados os valores máximo, mínimo e calculado a média. O restante das medidas adquiridas é descartado. A Figura 2 mostra os valores máximo e mínimo de tensão da bateria ao longo de alguns ciclos de período solar e eclipse.



Figura 2 – Dados da telemetria de tensão da bateria do satélite CBERS2. Eixo vertical é tensão da bateria em Volts. Eixo horizontal é tempo.

2.1. Estimação de Parâmetros

Os parâmetros que modelam uma bateria real podem ser bastante complexos, dependendo das características ou comportamentos que se pretendem observar. Sabe-se (Willard and Rusta, 1979) que existem grandes dependências de várias variáveis como temperatura, número de ciclos, profundidade de descarga, etc. Os modelos podem ser químicos ou elétricos. No entanto, iremos considerar aqui um modelo elétrico simplificado. Este modelo nos parece adequado para representar um comportamento aproximadamente linear, que pode ser observado nas curvas da Figura 2.

Assim, o seguinte modelo elétrico de bateria é considerado, conforme a Figura 3.

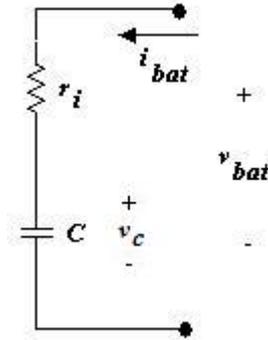


Figura 3 – Modelo simplificado da bateria

Considerando uma corrente de carga constante e tendo em vista o modelo acima, podemos escrever a seguinte relação

$$\Delta v_{bat} = [I \quad I\Delta t] \begin{bmatrix} r_i \\ 1/C \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na equação acima, Δv_{bat} é diferença entre duas medidas de tensão de bateria, separadas de um tempo Δt . A corrente de descarga é representada por I , e r_i e $1/C$ são os parâmetros que modelam a resistência interna e o inverso da capacidade do tanque de armazenamento, numa analogia ao equivalente hidráulico deste sistema.

Se considerarmos $y = \Delta v_{bat}$, $\mathbf{H} = [I \quad I\Delta t]$ e o vetor de parâmetros a serem estimados como $\mathbf{x} = [r_i \quad 1/C]^T$ podemos então escrever

$$y = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (2)$$

Iremos usar para o estimador, um algoritmo de mínimos quadrados que minimize a seguinte função custo

$$L = (y - \mathbf{H}\mathbf{x})^T (y - \mathbf{H}\mathbf{x}) \quad (3)$$

No caso de m medidas obtidas durante o período diurno do satélite, a variável y se torna um vetor de tamanho $m \times 1$, e a matriz \mathbf{H} se torna uma matriz $m \times 2$. O algoritmo então processa todos os dados de uma só vez (processamento "batch") para obter a solução ótima que minimiza a função custo da equação 3. Esta solução é dada por

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T y \quad (4)$$

2.2. Estimação de Estado

Para se estimar o estado de carga de uma bateria, uma primeira aproximação seria usar a tradicional definição "coulômbica" abaixo

$$SOC(t) = 100 \left(\frac{Q_c - \int_0^t i_{bat}(\tau) d\tau}{Q_c} \right) \quad (5)$$

Nesta equação, SOC é o estado de carga da bateria e Q_c é a carga inicial em Ah. A grande desvantagem deste método é que um erro no valor de Q_c acarreta erro no cálculo do estado de carga. Muitas baterias apresentam, quando submetidas a testes, uma capacidade nominal que difere de sua capacidade real, daí a incerteza deste método.

Mas com os parâmetros obtidos no passo anterior, podemos utilizar o modelo da Figura 3 para representar a bateria durante a descarga no eclipse, levando em consideração que a corrente agora possui o sentido oposto ao indicado nesta figura. Considerando então o seguinte vetor de estado

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} v_c \\ i_{bat} \end{bmatrix} \quad (6)$$

podemos escrever as equações da dinâmica do sistema durante o modo de descarga, no eclipse.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\mathbf{x} \quad (7)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & -1/C \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

O modelo de observações é descrito como

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (9)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} v_{bat} \\ i_{bat} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -r_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Nas equações acima r_i e C representam a resistência interna e capacitância do modelo elétrico da Figura 3, obtidos por estimação de parâmetros durante o período solar. A formulação do problema do filtro de Kalman para o caso contínuo-discreto é então como se segue: dada a dinâmica do sistema, levando em conta a influência estocástica no erro de modelagem e na precisão das medidas, e dada uma estimativa inicial $x(t_0)$ do estado com distribuição gaussiana de média x_0 e matriz de covariância inicial P_0 , queremos melhorar nossa estimativa inicial do estado e de sua covariância, à medida em que se obtém cada medida de tensão e corrente da bateria. O seguinte modelo da dinâmica de estado e de observações, considerando essa perturbação estocástica, pode então ser escrito

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}\boldsymbol{\omega} \quad (12)$$

$$y_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + v_k \quad (13)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Nas equações acima, $\boldsymbol{\omega}$ é uma variável aleatória com distribuição normal de média zero e matriz de covariância \mathbf{Q} , ou seja, é um ruído branco que representa flutuações ou erros de modelo. A variável aleatória v possui distribuição normal com média zero e matriz de covariância \mathbf{R} . Ela modela o erro aleatório cometido durante a realização das medidas (observações).

Assim, o algoritmo utilizará a observação obtida conforme equação 13 para realizar a fase de atualização do filtro de Kalman. Em seguida, o estado e a covariância atualizados são propagados conforme a dinâmica descrita na equação 12. Estes passos se repetem cíclica e recursivamente para cada medida obtida, conforme diagrama mostrado na Figura 4 (Kuga, 2005).

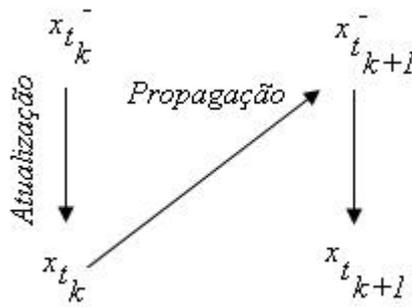


Figura 4 – Algoritmo do filtro de Kalman

Para se realizar a fase de propagação do filtro, utilizamos a matriz de transição $\Phi_{k+1,k}$ que relaciona o estado entre os instantes t_{k+1} e t_k . Considerando constante o intervalo entre duas medidas sucessivas e denominando este intervalo de T , a matriz de transição é obtida como se segue na equação 15.

$$\phi_{k+1,k} = e^{FT} = \mathbf{I} + \mathbf{F}T = \begin{bmatrix} 1 & -T/C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

3. RESULTADOS

O satélite CBERS2 foi projetado para uma missão de 2 anos. Ele foi lançado em outubro de 2003 e, superando sua vida útil, ainda se encontra em operação, realizando imagens de observação da Terra. Em abril de 2005 ocorreu uma falha em uma das baterias do satélite, degradando em parte a missão original prevista. Com apenas uma bateria em funcionamento, foi necessário modificar alguns modos de operação de modo a garantir um correto balanço de energia do satélite. Com apenas uma bateria em operação, o trabalho exigido da bateria remanescente praticamente dobrou, aumentando sua profundidade de descarga (DOD) o que por sua vez aumentou consideravelmente sua degradação.

Os dados utilizados no resultado a seguir fazem parte do conjunto de telemetrias do ano de 2005, portanto após a falha ocorrida em uma das baterias. Utilizando estes dados, podemos verificar, a partir das observações realizadas durante o eclipse, como o estado de carga estimado pelo filtro de Kalman se comporta em relação à predição feita, utilizando o método descrito na equação 5. Para um valor de Q igual a zero, um gráfico comparativo entre estes dois métodos é mostrado na Figura 5. Podemos observar que existe uma diferença entre as duas predições, mas que pode ser explicada conforme se segue.

A estimativa baseada no método da corrente integrada supõe, neste caso da Figura 5, uma capacidade nominal de 30Ah, o que conforme já dito anteriormente não representa a condição real do equipamento. É possível observar, ao se rodar o algoritmo para uma capacidade de 25Ah, que as duas curvas se aproximam. Tal fato estaria condizente com a realidade uma vez que, além da degradação natural ao longo da operação do satélite, deve-se acrescentar ainda a intensificação da degradação da bateria remanescente após a falha, conforme já descrito nos parágrafos anteriores. Dessa forma, a partir da estimativa obtida via filtro de Kalman, poderíamos dizer que a bateria sofreu uma degradação de capacidade em relação ao seu valor nominal da ordem de 16%.

O resíduo das estimativas de tensão e corrente é mostrado na Figura 6. A Figura 7 mostra o valor estimado de estado de carga juntamente com sua covariância atualizada a cada instante de medida. Podemos observar que a tolerância da medida de estado de carga diminui, à medida que os dados são processados.

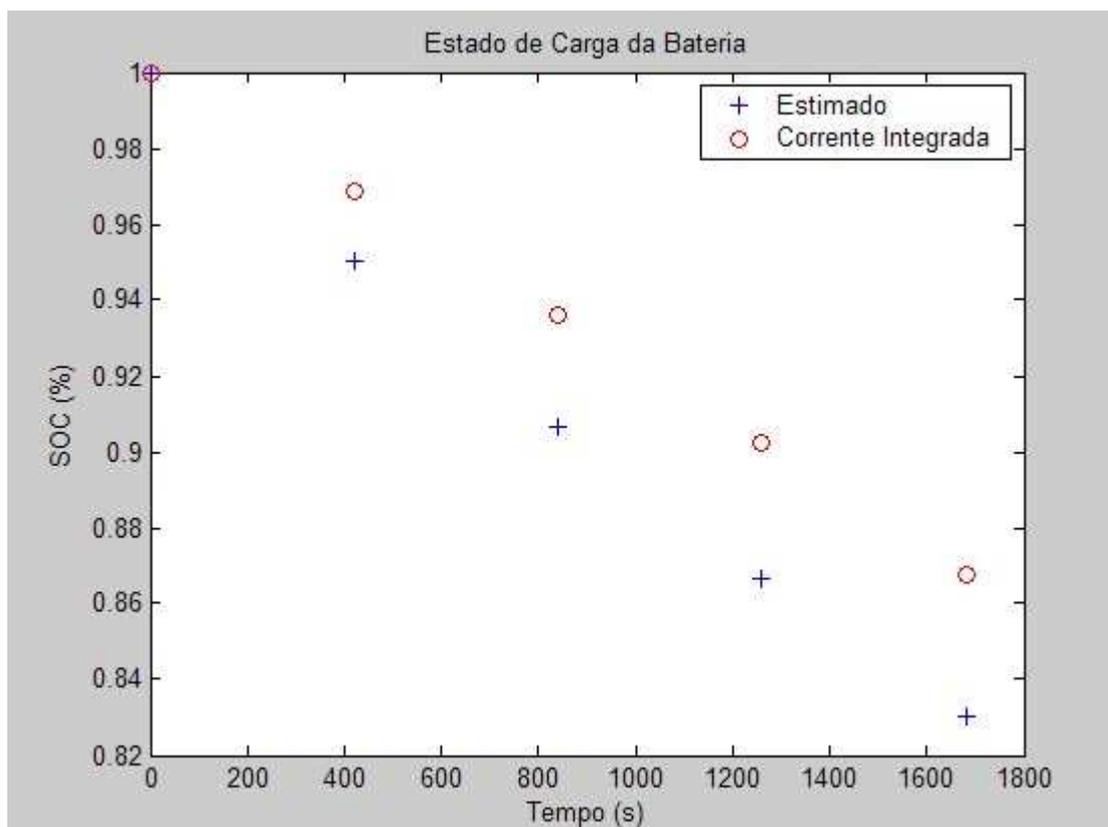


Figura 5 – Estado de carga estimado via filtro de Kalman versus método da corrente integrada durante um eclipse

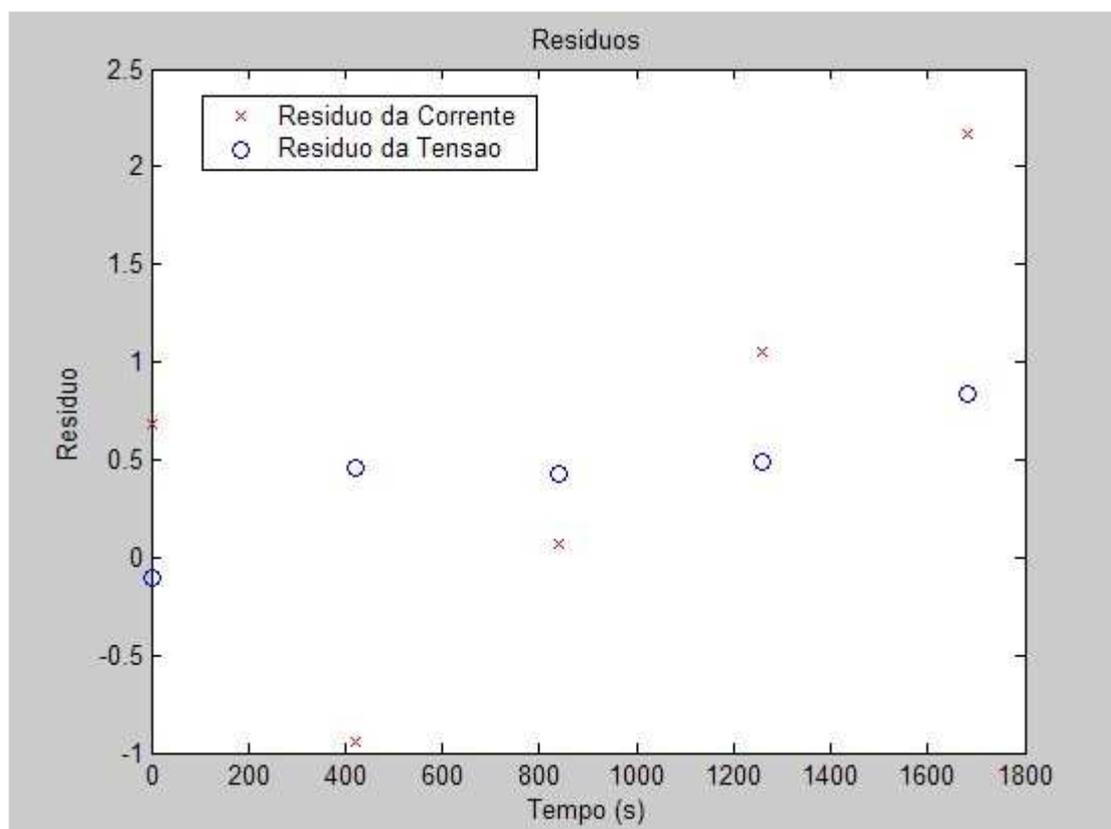


Figura 6 – Resíduo da tensão e da corrente

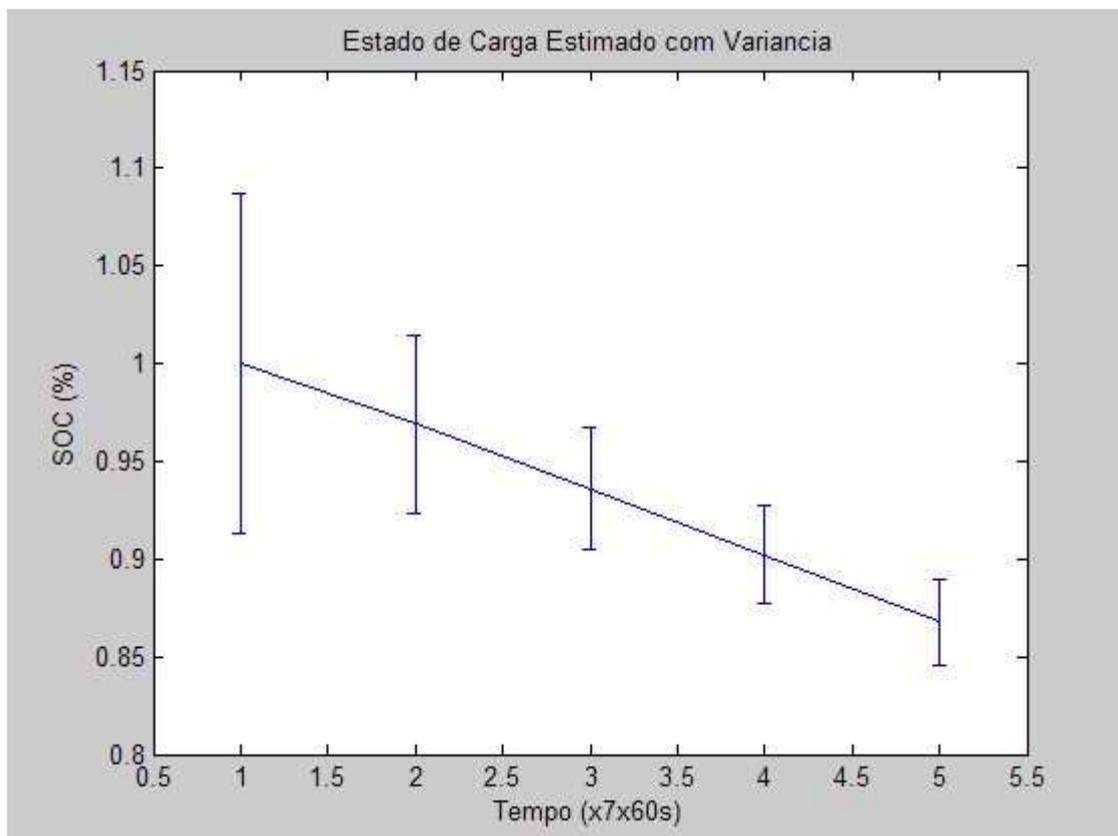


Figura 7 – Estado de carga estimado com variância atualizada

4. CONCLUSÃO

O filtro de Kalman pode ser uma poderosa ferramenta em aplicações como esta apresentada aqui neste trabalho. No entanto utilizar os dados de telemetria disponíveis não pareceu adequado em virtude do pequeno número de pontos obtidos. Esse fato se torna ainda pior no início de vida do satélite, pois durante esse período a bateria atinge o final de carga mais rapidamente durante o período solar e com isso um menor número de pontos para se estimar os parâmetros do modelo é obtido. Como se pode observar na Figura 6, não foi possível observar convergência do resíduo com essa baixa estatística.

Portanto, para se implementar a bordo do satélite um algoritmo de Kalman para estimar o estado de carga da bateria, em tempo real, seria necessário um hardware dedicado para fazer a aquisição das medidas necessárias, com uma taxa de amostragem maior e que permita a obtenção de um maior número de pontos. Assim, espera-se que a convergência e os resultados possam ter um resultado melhor.

5. REFERÊNCIAS

- Kuga, H.K. Noções Práticas de Técnicas de Estimção. Notas de Aula. 2005. <http://www2.dem.inpe.br/hkk>.
- Pang, S., Farrel, J., Du, J. and Barth, M. Battery State of Charge Estimation. Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA June 25-27, 2001.
- Willard, S.R. and Rusta, D. W. Sealed-Cell Nickel-Cadmium Battery Applications Manual. NASA Reference Publication 1052, 1979.