

## REFINAMENTOS DE MEDIDAS DE GPS DE POSIÇÃO DE UM VEÍCULO USANDO MEDIDAS DE SISTEMA DE NAVEGAÇÃO INERCIAL

**Alessandro Gonçalves Adinolfi**

alessandro.adinolfi@anac.gov.br

Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC

São José dos Campos, SP, Brasil

**Marcelo Lopes de Oliveira e Souza**

marcelo@dem.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/DMC

São José dos Campos, SP, Brasil

**Helio Koiti Kuga**

hkk@dem.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/DMC

São José dos Campos, SP, Brasil

**Resumo:** *Atualmente, o uso de Sistemas Globais de Navegação por Satélite - GNSS tem sido amplamente difundido para várias aplicações, desde a navegação aeronáutica ao tráfego de automóveis, sendo o Sistema de Posicionamento Global - GPS o mais usado para tais objetivos. Algumas soluções têm tido uso mais recente, como os sistemas de aumento de precisão baseados em solo ou em terra, que melhoram a precisão das estimativas de posição e velocidade. Tais sistemas, entretanto, são sujeitos a uma limitada taxa de amostragem, e perdas de qualidade ou interrupções do sinal causadas por limitações do sistema ou agentes externos. Por outro lado, Sistemas de Navegação Inercial - INS são menos sujeitos a tais limitações, apesar de acumularem perda de precisão ao longo das medidas. Neste trabalho, estudamos refinamentos de medidas de GPS de posição de um veículo usando medidas de uma Unidade de Medição Inercial - IMU de um INS. Para tanto: 1- identificamos na literatura um caso de Filtro de Kalman aplicado ao movimento de um veículo; 2- analisamos os dados disponíveis para a medição da trajetória do veículo e os adaptamos para estimativas da trajetória em uma dimensão; 3- implementamos um Filtro de Kalman tipo discreto-discreto utilizando os dados de IMU e GPS disponíveis; e 4- analisamos os resultados. Desta forma, verificamos: 1- as limitações das medidas isoladas de GPS e IMU; 2- as dificuldades em sintonizar o Filtro de Kalman para obtermos sua convergência; 3- as vantagens das medições obtidas em termos de uma precisão maior em relação às medidas puras da IMU e uma maior robustez a perdas de dados em relação ao sinal puro do GPS, uma vez sintonizado o Filtro de Kalman.*

**Palavras-chaves:** *Sistemas de Navegação Global por Satélites, GPS, INS, IMU, Filtro de Kalman.*

### 1 Introdução

Neste trabalho, estudamos refinamentos de medidas de GPS de posição de um veículo usando medidas de uma Unidade de Medição Inercial - IMU de um INS.

Na seção 2 apresentamos considerações gerais sobre a finalidade deste trabalho.

Na seção 3 mostramos na literatura um caso de Filtro de Kalman aplicado ao movimento de um veículo.

Na seção 4 apresentamos e discutimos o uso dos dados disponíveis sem combinação.

Na seção 5 discutimos a implementação de um Filtro de Kalman tipo discreto-discreto para combinação das medidas disponíveis.

Na seção 6 apresentamos e discutimos os resultados; e apontamos direções para a continuação do trabalho.

## 2 Combinação de Medidas de GPS e IMU

Atualmente, o uso de Sistemas Globais de Navegação por Satélite - GNSS tem sido amplamente difundido para várias aplicações, desde a navegação aeronáutica ao tráfego de automóveis, sendo o Sistema de Posicionamento Global-GPS o mais usado para tais objetivos.

Algumas soluções têm tido uso mais recente, como os sistemas de aumento de precisão baseados em solo ou em terra, que melhoram a precisão das estimativas de posição e velocidade. Tais sistemas, entretanto, são sujeitos a uma baixa taxa de amostragem, que limita seu uso em sistemas sujeitos a grandes transientes de aceleração. Outra limitação inerente a este sistema é a dependência de sinais externos, o que o torna sujeito a perdas de qualidade ou interrupções do sinal causadas por limitações do sistema ou agentes externos.

Por outro lado, Sistemas de Navegação Inercial - INS são menos sujeitos a tais limitações. Os dados podem ser obtidos e processados dentro do sistema embarcado de forma que, na ausência de falhas, o sistema está menos sujeito a perdas de qualidade ou interrupção do sinal. Por outro lado, a integração das medidas de acelerações ao longo do tempo acarreta um grande aumento da incerteza pois, juntamente com as medidas, seus erros são também integrados, o que limita o uso de INS para navegação a longas distâncias.

Neste trabalho, estudamos refinamentos de medidas de GPS de posição de um veículo usando medidas de uma Unidade de Medição Inercial - IMU de um INS usando um Filtro de Kalman discreto-discreto. Um caso simplificado de uma dimensão é exercitado para avaliar o potencial do uso de tal combinação para melhor lidar com as limitações de cada um dos sistemas.

## 3 Considerações sobre os dados experimentais utilizados

Os dados de IMU e GPS utilizados neste trabalho foram obtidos de testes usando uma IMU-MEMS Crossbow CD400-200 <sup>[4]</sup> e um DGPS Ashtech Z-12 DGPS <sup>[5]</sup>. A IMU foi previamente calibrada e os dispositivos montados para medir o deslocamento de um automóvel, como descrito por Einwoegerer (2009) <sup>[2]</sup>.

Para este trabalho foi utilizado um trecho em linha reta, para o qual a latitude e longitude fornecidas pelo DGPS foram convertidas em distância de um ponto de origem. Para os dados obtidos da IMU, foi utilizada apenas a aceleração no eixo-x.

As variáveis de estado deste modelo simplificado são a posição “x”, a velocidade “v”, (apresentada como x') e o viés de acelerômetro “b”, caracterizando um sistema de 3 variáveis de estado.

Dado que o estado inicial é conhecido e a aceleração é providenciada, um sistema discreto cinemático pode ser descrito, tal como abaixo:

$$\begin{aligned}x_k &= x_{k-1} + x'_{k-1} * \Delta t + (A_{k-1} + b_{k-1}) * (\Delta t)^2/2; \\x'_k &= x'_{k-1} + (A_{k-1} + b_{k-1}) * \Delta t; \text{ and} \\b_k &= b_{k-1}\end{aligned}$$

## 4 O uso dos dados de IMU e GPS não combinados

A Figura 1 mostra os dados de deslocamento do veículo obtidos com o DGPS e obtidos através das acelerações medidas na IMU.

O segmento adotado foi tal que as medidas de DGPS tiveram sempre seu PDOP abaixo de 5. Dado que as medidas de DGPS no segmento foram sempre de boa qualidade e não ocorreram acelerações elevadas neste percurso, é suposto que os dados de DGPS descrevem a posição verdadeira do veículo. Em trabalhos futuros, em que se pretende avaliar perdas de sinal de GPS e transientes de alta aceleração, esta suposição não poderá ser utilizada.

Como se pode observar, as medidas integradas de IMU produzem, ao longo do tempo, uma grande divergência em relação à posição originada pelas medidas de DGPS. Tais erros se devem a características de integração de medidas

da IMU, porém são também potencializadas por simplificações no modelo que utiliza os dados da IMU, que não considera efeitos locais, nem as variações de atitude de veículo, o que acaba por introduzir um elevado erro na planta.

A Figura 2 mostra um pouco da trajetória do veículo em termos de altitude DGPS, indicando que no percurso escolhido há pequenos aclives e declives, que por sua vez afetam a atitude do veículo, sendo fontes de erros.

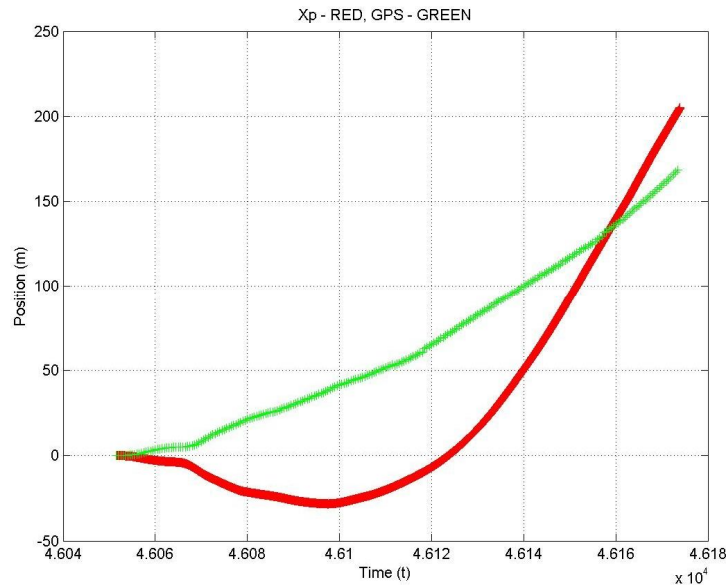


Figura 1: Dados de IMU e DGPS sem combinação.

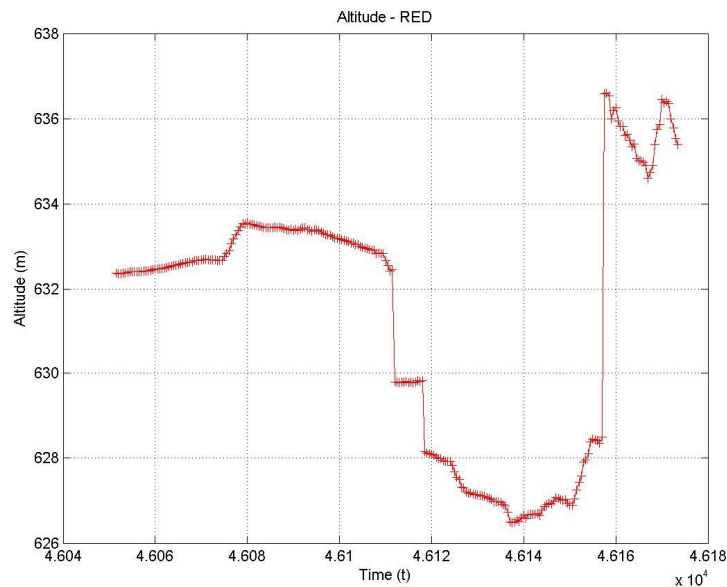


Figura 2: Variações de altitude medidas pelo DGPS.

## 5 A aplicação de Filtro de Kalman Estendido tipo discreto-discreto

Com o objetivo de reduzir o comportamento divergente observado, foi proposta uma combinação das medidas de IMU com dados de DGPS, por meio de um Filtro de Kalman Estendido-EKF.

A planta em questão pode ser modelada da seguinte forma <sup>[1]</sup>:

$X_k = \varphi_{k, k-1} * X_{k-1} + B * U + G * \omega$ , para as equações de estado;  $X_0$  é um vetor aleatório normal, ou seja,  $N(0, P_0)$ ; e

$Y_k = h_k(X_k) + v_k$ , para as medidas, onde, tomando-se por base as equações descritas na seção 3, temos:

$X_k = [x_k \quad x'_k \quad b_k]$ , e por consequência,  $X_{k-1} = [x_{k-1} \quad x'_{k-1} \quad b_{k-1}]$ ;

$\varphi_{k, k-1}$  é a matriz de transição entre os estados  $X_{k-1}$  e  $X_k$ , que é igual a:

$\varphi_{k, k-1} = [1 \quad \Delta t \quad (\Delta t)^2/2 \quad ; \quad 0 \quad 1 \quad \Delta t \quad ; \quad 0 \quad 0 \quad 1]$ ;

$U$  é dado pela aceleração medida pela IMU;

$B = [(\Delta t)^2/2 \quad \Delta t \quad 0]^T$ ;

$h_k(X_k)$  é a equação que relaciona a medida  $Y_k$  ao estado  $X_k$ ;

$G * \omega$  é um parâmetro de adição de ruídos e incertezas no modelo, sendo  $\omega$  modelado como uma sequência branca normal com média zero e covariância  $Q$ , ou seja,  $N(0, Q)$ ;

$v_k$  é um parâmetro de adição de erro nas medidas, sendo modelado como uma sequência branca normal com média zero e covariância  $R$ , ou seja,  $N(0, R)$ .

Um EKF realiza 2 operações: Propagação (ou Atualização) e Correção <sup>[3]</sup>. Estas operações são feitas sobre o vetor de estados e a matriz de covariâncias. Estas operações são efetuadas tomando por base o modelo da planta.

No caso em questão, dado que a taxa de amostragem da IMU é da ordem de 10 vezes a do DGPS, vários ciclos de propagação são feitos até que uma medida do DGPS esteja disponível para a correção.

A propagação é realizada da seguinte forma <sup>[1]</sup>:

1 – Para o vetor de estados:

$X_k = \varphi_{k, k-1} * X_{k-1} + B * U$ ;

2 – Para a matriz de covariâncias:

$P_k = \varphi_{k, k-1} * P_{k-1} * \varphi_{k, k-1}^T + \Gamma_k * Q_k * \Gamma_k^T$ , onde:

$P_{k-1}$  é a covariância anterior das variáveis de estado. As covariâncias são dadas <sup>[2]</sup> baseadas em incertezas das medidas da IMU.

O termo  $\Gamma_k * Q_k * \Gamma_k^T$  é baseado em  $G * \omega$  e se refere a ruído e incertezas do modelo.

A correção é feita nas seguintes etapas <sup>[1]</sup>:

1 - Calculamos o Ganho  $K_k$ :

$K_k = P_k * H_k^T * (H_k * P_k * H_k^T + R_k)^{-1}$ ; onde

$H_k = [\partial h_{tk}(X_k) / \partial x]_{t=tk}$ ; e

$R_k$  é a medida de incertezas nos dados medidos (vide a definição anterior de  $v_k$ ).

2 – Corrigimos a Matriz de Covariâncias:

$P_{k-corrected} = (I - K_k * H_k) * P_{k-propagated}$ .

3 – Corrigimos a Matriz de Estados:

$X_{k-corrected} = X_{k-propagated} + K_k * Resíduo_k$ ; onde

$Resíduo_k = y_k - h_k (X_{k-propagated})$ .

Este EKF foi aplicado e os resultados são discutidos na próxima seção.

## 6 Resultados e Discussão

O sistema foi modelado e simulado em computador produzindo as Figuras 3 a 8.

Da Figura 3 à Figura 5 podemos ver os resultados com  $R=180m^2$ .

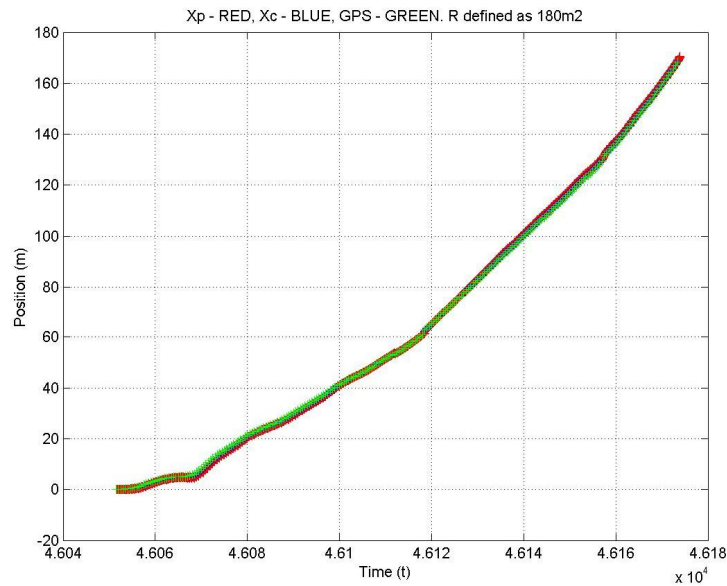


Figura 3: Posição dada pelo EKF versus posição DGPS usando  $R=180m^2$ .

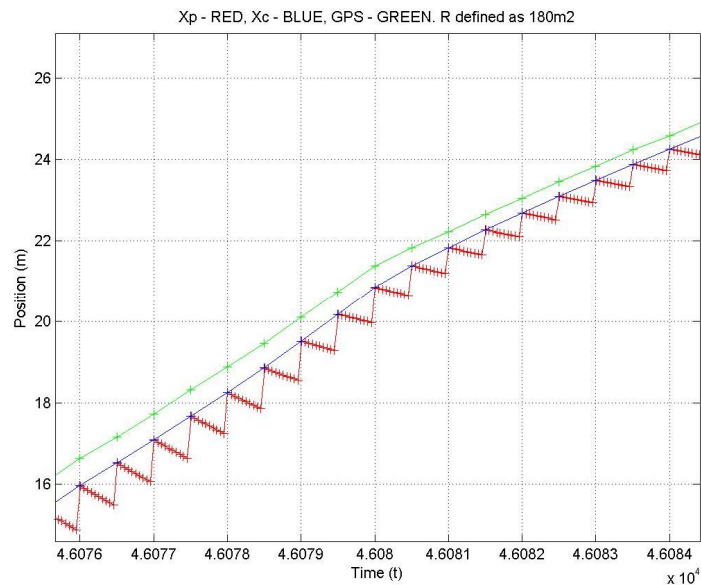
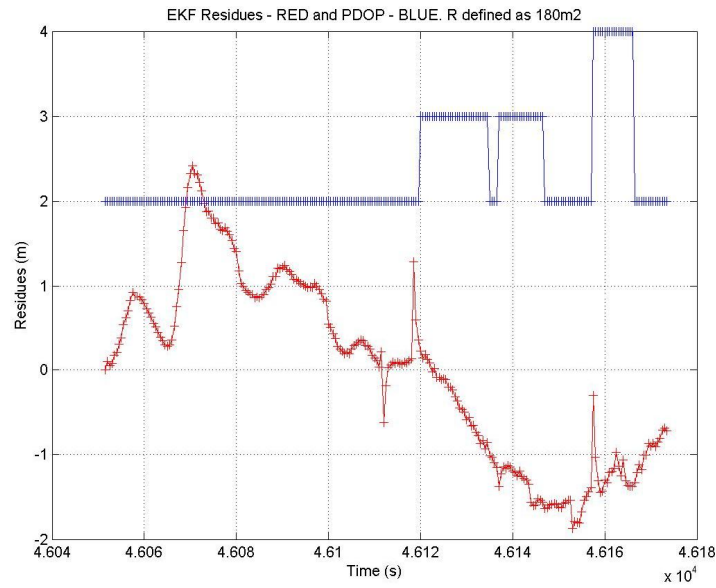
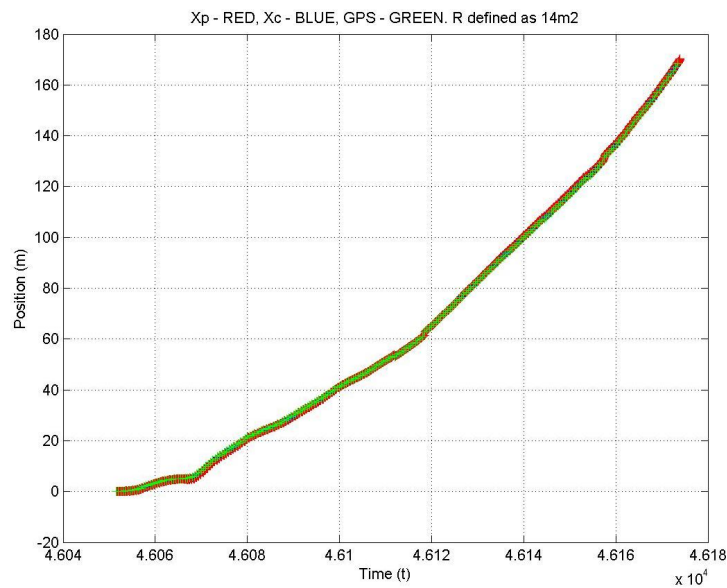


Figura 4: Esforço de correção do EKF usando  $R=180m^2$ .

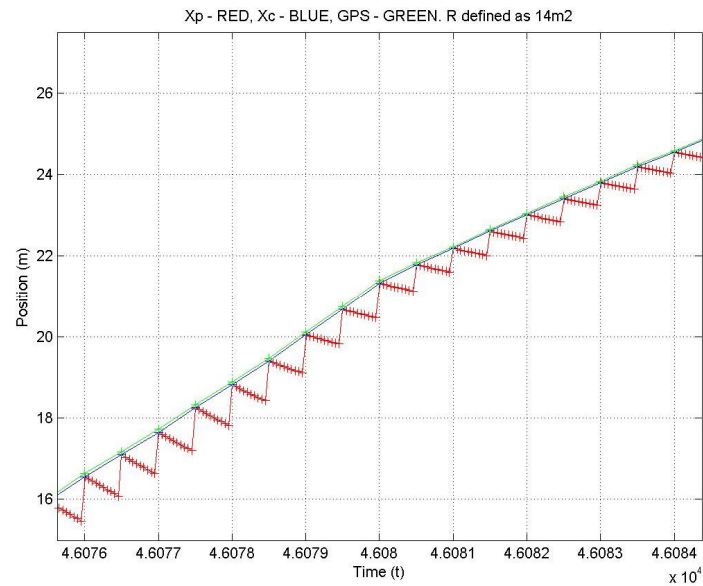


**Figura 5: Resíduos do EKF usando  $R=180m^2$ .**

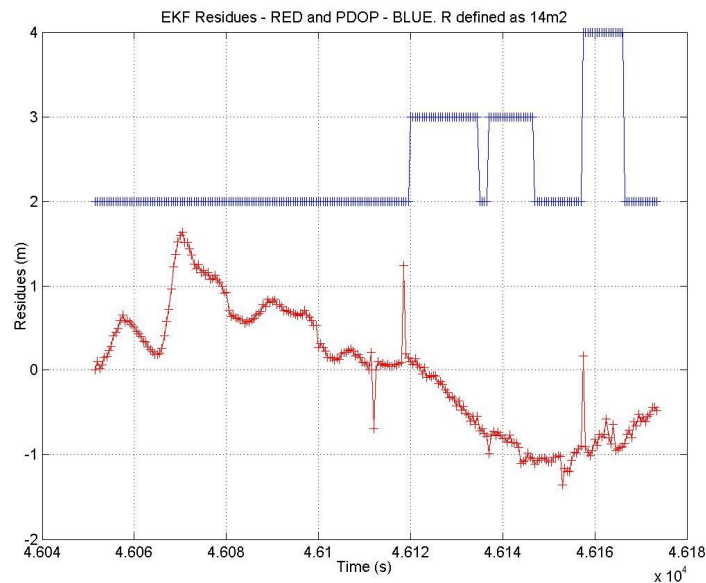
Da Figura 6 à Figura 8 podemos ver os resultados com  $R=14m^2$ .



**Figura 6: Posição dada pelo EKF versus posição DGPS usando  $R=14m^2$ .**



**Figura 7: Esforço de correção do EKF usando  $R=14m^2$ .**



**Figura 8: Resíduos do EKF usando  $R=14m^2$ .**

Comparando a Figura 3 com a Figura 6 e a Figura 5 com a Figura 8, podemos observar que o uso de  $R=14m^2$  melhora a convergência do filtro. A maior efetividade dos esforços de correção do EKF pode ser observada comparando a Figura 4 com a Figura 7.

Além disso:

1. Um comportamento de convergência é observado, com significativa melhoria em relação aos dados propagados com base nas acelerações da IMU.
2. É possível observar o trabalho do EKF nos ciclos de correção, sendo este esforço proporcional ao ganho e ao resíduo.

3. Os ciclos de propagação rapidamente conduzem a planta à divergência. Tal comportamento é indesejável, caso haja a intenção de utilizar as medidas de IMU para substituir as medidas de DGPS em casos de perdas de qualidade deste, ou transientes altamente acelerados. Para trabalhos futuros que se aprofundem neste assunto, é necessário um modelo mais elaborado para lidar com os dados da IMU.
4. Foram testados valores para  $P_k$  e  $R$  iniciais, para verificar o comportamento do EKF. Foi observada grande sensibilidade a variações de  $R$ .

## 7 Conclusão

Os resultados observados neste trabalho preliminar mostram a efetividade do EKF na correção do vetor de estados obtido a partir das medidas da IMU. Tal correção será importante para lidar com perdas de qualidade do sinal de DGPS ou transientes de altas acelerações.

Para trabalhos futuros, o modelo da planta terá de ser melhorado, para que o comportamento divergente causado pela forma como as medidas de IMU são tratadas no modelo seja minorado.

## 8 Agradecimentos

Os autores agradecem penhoradamente: à Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), pelo provimento de um espaço enriquecedor para a compreensão dos desafios relacionados à segurança na Aviação Civil; ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo espaço de estudo e pesquisa; ao Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais (ETE/CSE) pelos conhecimentos e experiências transmitidas nos assuntos de Engenharia de Requisitos e Engenharia de Sistemas; e ao Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle (ETE/CMC) pelos conhecimentos e experiências transmitidas nos assuntos de Otimização de Sistemas.

## 9 Referências

1. Kuga, H. K. Otimização em Sistemas Dinâmicos II. São José dos Campos: INPE, 2011. Notas de aulas.
2. Einwoegerer, W. Mecanização de Central de Navegação Inercial com Dados a Partir da Integração de IMU MEMS e Receptor GPS. São José dos Campos: INPE, 2009. Dissertação de Mestrado.
3. Gelb, A., Kasper Jr., J. F., Nash Jr., R. A., Price, C. F., Sutherland Jr., A. A. Applied Optimal Estimation. The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology. 16<sup>th</sup> printing, 2001.
4. Crossbow. UMI User's Manual Models UMI300CC, UMI400CC, UMI400CD. Revision B. San Jose, CA, USA. Document 7430-0003-03, Feb 2007.
5. Ashtech Surveying Products. Ashtech Z-12 GPS Receiver Operation and Reference Manual. Revision A. Santa Clara, CA, USA. 1999.