

# NAVEGAÇÃO USANDO UNIDADE INERCIAL DE BAIXO CUSTO (IMU MEMS) E RECEPTOR GPS COM APLICAÇÃO DO FILTRO DE KALMAN SIGMA PONTO

Walter Einwoegerer\*, Hélio Koiti Kuga\*, Paulo Giácomo Milani\*

**Resumo** - Este trabalho apresenta um método de integração das informações de aceleração e taxa angular de uma Unidade de Medida Inercial (IMU) de baixo custo, com tecnologia Micro Electro-Mechanical System (MEMS) às medidas de posição e velocidade obtidas de um receptor GPS. As equações diferenciais utilizadas para integrar o movimento e a atitude de um sistema móvel na configuração solidária à plataforma (strapdown) são apresentadas. Na sequência, descrevem-se os procedimentos e resultados obtidos da integração de medidas da IMU a um receptor GPS em um experimento em condições dinâmicas. Um algoritmo baseado no Filtro de Kalman Sigma-Ponto (FKSP) foi desenvolvido para aplicação à navegação a fim de realizar a fusão das informações de posição e velocidade via GPS e as coordenadas calculadas através da IMU. O resultado da trajetória obtida desta integração é comparado à trajetória esperada. O objetivo deste trabalho é o de obter o domínio das técnicas de Mecanização de Centrais de Navegação Inercial, permitindo a determinação dos erros envolvidos na implementação do algoritmo de navegação usando a técnica do Filtro de Kalman Sigma-Ponto.

**Palavras-Chave:** IMU, MEMS, Filtro de Kalman, Filtro de Kalman Sigma Ponto.

**Abstract** - The proposal of this work is to present a process of fusion of the acceleration and angular rate measurements of a low cost Inertial Measurement Unit (IMU) MEMS (Micro Electro-Mechanical System) based technology, incorporating measured position and speed data from a GPS receiver. Then, it details the equations that have been used to integrate the movement and the attitude of a system in strapdown configuration, through appropriate algorithm using the method of the Sigma-Point Kalman filter, verifying its performance and comparing results. It also details the measurements taken in dynamic conditions using the IMU and GPS simultaneously and describes the use of this data on a Sigma-Point Kalman Filter developed to fuse the GPS position and speed information with the coordinates calculated from the IMU.

**Keywords:** IMU, MEMS, Kalman filter, Sigma Point Kalman Filter.

## I. INTRODUÇÃO

Uma Unidade de Medida Inercial (IMU) baseada em tecnologia MEMS (Micro Electro-Mechanical System), devido à sua grande disponibilidade e baixo custo, será aqui utilizada para a aplicação na determinação de um algoritmo de navegação.

Os dados obtidos de uma IMU-MEMS (Micro Electro-Mechanical System) permitem cinematicamente a integração das equações diferenciais do movimento a taxas de amostragem elevadas (até 133Hz na unidade utilizada). Entretanto, em virtude de seu baixo custo, contém derivas que com o passar do tempo acumulam erros crescentes em relação à posição e velocidade medidas ao longo do tempo.

O receptor GPS, por sua vez, opera a taxas de amostragem menores (1 Hz) fornecendo informações mais precisas de posição e velocidade, porém é sujeito a perdas de sinais em função de obstáculos físicos.

Para compensar esse tipo de limitação pretende-se a integrar a IMU ao receptor GPS, o que permite uma solução de navegação que alia a independência da IMU, de baixa precisão, com a estabilidade do receptor GPS, sujeito a perdas de sinal

Esse tipo de integração se torna cada vez mais comum devido ao crescente desenvolvimento deste tipo de IMU possibilitando não apenas a sua integração a receptores GPS, mas também a outros sensores e dispositivos de apoio à navegação. As características da IMU-MEMS utilizada, bem como os procedimentos para a obtenção de seus parâmetros são detalhadamente descritos nas referências [1] e [2]. Os detalhes dos resultados correspondentes a este experimento estão reportados e analisados na referência [3].

## II. MECANIZAÇÃO DA NAVEGAÇÃO INERCIAL

Neste trabalho, para o equacionamento abaixo são consideradas: a IMU na configuração solidária a plataforma ("strapdown"), o sistema de coordenadas girante com a Terra e as variáveis de estado representadas pelas coordenadas de posição, velocidade, e atitude.

Desta forma, as equações diferenciais que mecanizam a cinemática de navegação para determinar a trajetória e a atitude da IMU-MEMS, são dadas por<sup>4</sup>:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\lambda} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I/R_n & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_e \cos \varphi} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_N \\ \dot{V}_E \\ \dot{V}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_N \\ f_E \\ f_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$+ \begin{bmatrix} -2\Omega_e V_E \sin \varphi + \frac{V_N V_D}{R_n} - \frac{V_E^2 \tan \varphi}{R_e} \\ 2\Omega_e (V_N \sin \varphi + V_D \cos \varphi) + \frac{V_E (V_N \tan \varphi + V_D)}{R_e} \\ -2\Omega_e V_E \cos \varphi - \frac{V_E^2}{R_e} - \frac{V_N^2}{R_n} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi / \cos\theta & \cos\phi / \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{bmatrix} p-b_p \\ q-b_q \\ r-b_r \end{bmatrix} - \mathbf{R}_{n2p} \begin{bmatrix} \Omega_e \cos\phi + V_E / R_e \\ -V_N / R_n \\ -\Omega_e \sin\phi - V_E \tan\phi / R_e \end{bmatrix} \right\}$$

onde

$$\begin{bmatrix} f_N \\ f_E \\ f_D \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{p2n} \left( \begin{bmatrix} fu \\ fv \\ fw \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

e  $[\phi, \lambda, h]$  são a latitude geodética, a longitude, e a altitude;  $[V_N, V_E, V_D]$  são os componentes de velocidade da plataforma nas direções Norte, Leste, e Nadir local;  $[\phi, \theta, \psi]$  são os ângulos de rolamento, arfagem e guinada ("roll, pitch, yaw");  $R_e$  é o raio terrestre leste acrescido da altitude  $h$ ;  $R_n$  é o raio terrestre norte acrescido da altitude  $h$ ;  $\mathbf{R}_{p2n}$  é a matriz de rotação do sistema do corpo (plataforma) para o sistema de navegação NED (Norte, Leste, e Nadir);  $\Omega_e$  é a rotação da Terra;  $g$  é a gravidade local computada levando em conta a atração gravitacional e a aceleração centrípeta;  $[p, q, r]$  são as taxas angulares medidas pelos giros e  $[b_p, b_q, b_r]$  são suas derivas respectivamente;  $[f_w, f_v, f_u]$  são as medidas acelerométricas e  $[b_w, b_v, b_u]$  são seus "bias" respectivamente; e  $[f_N, f_E, f_D]$  são as medidas acelerométricas transformadas para o sistema NED. Consideramos ainda que os "bias" e derivas dos acelerômetros e giros, na sua forma mais simples, podem ser modelados constantes por trechos respectivamente fazendo:

$$\begin{aligned} \dot{b}_a &= 0, \\ \dot{b}_g &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

### III. FILTRO NÃO LINEAR DE KALMAN SIGMA-PONTO

Para problemas não-lineares, os filtros não lineares convencionais, como o filtro estendido de Kalman, podem apresentar uma performance pobre em razão de problemas inerentes aos sistemas não lineares, principalmente devido às seguintes suposições<sup>6,7,8</sup>

- Linearização é uma boa aproximação dos processos (Jacobiano da dinâmica e medidas);
- Processos são Gaussianos mesmo para problemas altamente não lineares;
- Normalmente somente a média (primeiro momento) é previsto como não-linear, visto que a covariância é linearizada.

Assim sendo, um Filtro de Kalman (FK) não linear de tempo real denominado filtro de Kalman Sigma-Ponto (ou "Unscented") (FKSP ou FKU) é a opção a ser desenvolvida.

O método do FKSP consiste em obter um conjunto mínimo de amostras, os sigma-pontos, em torno da média<sup>9,10,11</sup> de interesse e que seja ainda representativo do sistema não linear. Este método procura obter informações sobre os primeiros momentos (média, covariância, terceiro momento central ou assimetria e curtose) das amostras escolhidas criteriosamente. Posteriormente, os sigma-pontos são previstos não linearmente e também calculada sua covariância predita<sup>10</sup>.

Com esta aproximação não é necessária a linearização do sistema, como para o filtro de Kalman Estendido (EKF), evitando Jacobianas analíticas complexas que necessitam ser calculadas a cada etapa da integração.

Para tal, definindo  $n$  como a dimensão do vetor a ser estimado, é gerado um conjunto de  $2n+1$  sigma-pontos por:

$$\begin{aligned} \hat{\chi}_k^0 &= \hat{\mathbf{x}}_k \\ \hat{\chi}_k^i &= \hat{\mathbf{x}}_k + \left( \sqrt{(n+\kappa)\hat{\mathbf{P}}_k} \right)_i, \quad i=1, \dots, n \\ \hat{\chi}_k^{i+n} &= \hat{\mathbf{x}}_k - \left( \sqrt{(n+\kappa)\hat{\mathbf{P}}_k} \right)_i, \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

Onde  $\left( \sqrt{(n+\kappa)\hat{\mathbf{P}}_k} \right)_i$  é a  $i$ -ésima linha ou coluna da matriz

raiz quadrada de  $(n+\kappa)\hat{\mathbf{P}}_k$ , e o fator  $\kappa$  é escolhido de maneira a escalonar os momentos superiores a 3. Se  $(n+\kappa)=3$ , também é possível escalonar alguns dos quarto-momentos (curtose) quando  $\mathbf{x}$  é gaussiano<sup>10,11</sup>. Os pesos para ponderar a média e covariância predita são dados por:

$$\begin{aligned} W^0 &= \kappa / (n+\kappa) \\ W^i &= 1 / (2n+2\kappa), \quad i=1, \dots, n \\ W^{i+n} &= 1 / (2n+2\kappa), \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (7)$$

A fase de predição do FKSP é implementada através da integração das equações (1)-(3), e (5), para cada sigma-ponto:

$$\dot{\chi}_{i,k+1} = \mathbf{f}(\chi_{i,k}). \quad (8)$$

A média e a covariância predita são então calculadas por:

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W^i \chi_{i,k+1} \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W^i \left[ \chi_{i,k+1} - \bar{\mathbf{x}}_{k+1} \right] \left[ \chi_{i,k+1} - \bar{\mathbf{x}}_{k+1} \right]^T \quad (10)$$

usando os pesos de acordo com a equação (7).

A abordagem via FKSP neste problema é aplicada somente à fase da predição.

A fase de correção do filtro ("measurement update") usa as equações convencionais do Filtro de Kalman<sup>8</sup>, pois as medidas são lineares em relação ao vetor de estado a ser estimado:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k &= \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^t \left( \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^t + \mathbf{R}_k \right)^{-1} \\ \hat{\mathbf{P}}_k &= \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^t \left( \mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \right) \bar{\mathbf{P}}_k \\ \hat{\mathbf{x}}_k &= \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k \left[ \mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{x}}_k \right] \end{aligned} \quad (11)$$

#### IV. FILTRO NÃO LINEAR DE KALMAN SIGMA-PONTO NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA IMU-MEMS

Foram desenvolvidos “*à priori*”, conforme referências [1] e [2], os procedimentos para a determinação dos *bias* e derivas da IMU-MEMS através da técnica do FKSP. Na seqüência foram analisados os desempenhos e os erros envolvidos fazendo comparações entre:

- \* Integração simples, CI exata, considerando  $b_a = 0$  e  $b_g = 0$ ,
- \* Integração simples, CI exata com valores de  $b_a$  e  $b_g$  pré-calculados através do FKSP,
- \* Utilizando FKSP com  $n = 9$  elementos, não considerando  $b_a$  e  $b_g$ ,
- \* Utilizando FKSP com  $n = 15$  elementos, considerando  $b_a$  e  $b_g$ .

As conclusões destas simulações determinaram que é necessário levar em conta os erros sistemáticos, seja estimando-os previamente, ou estimando-os conjuntamente no FKSP. Tanto menor o erro como mais rápida a convergência dos valores de *bias* ou derivas se estes erros  $b_a$  e  $b_g$  fizerem parte do estado a ser estimado em qualquer filtro projetado para navegação. Esta abordagem torna o filtro robusto também para variações locais da IMU onde em regimes de trabalho diferentes estes erros tenham a contribuição de derivas no tempo, fator de escala e desalinhamentos, amplificados.

#### V. FILTRO NÃO LINEAR DE KALMAN SIGMA-PONTO NO ALGORITMO DA INTEGRAÇÃO IMU/GPS

O Filtro de Kalman Sigma-ponto para a integração IMU/GPS considera os respectivos *bias* dos acelerômetros e derivas dos giros como elementos do vetor de estado.

Ao algoritmo são fornecidas as condições iniciais e as leituras seqüenciais e sincronizadas entre os valores obtidos pela IMU e pelo receptor GPS. É feita a implementação do filtro FKSP com a geração dos sigma-pontos e a posterior integração numérica das equações de mecanização da central inercial. São obtidas a média e covariância predita para cada vetor de estado com a posterior correção (atualização) através do Filtro de Kalman convencional para a atitude e a navegação.

A finalidade do algoritmo de navegação é propagar as informações de posição, velocidade e atitude em função de cada leitura recebidos dos acelerômetros e giros, entre os tempos de leitura do receptor GPS e também quando este último tem seus sinais bloqueados por obstáculos físicos.

#### VI. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

O experimento usou uma IMU-MEMS de baixo custo, um conjunto receptor GPS/bateria e um computador para recepção e armazenamento dos dados conforme mostrado na figura 1.

A IMU-MEMS (Modelo Crossbow IMU-CD400-200)<sup>5</sup> é um sistema de medidas de 6-eixos, para medidas de aceleração linear em torno de 3 eixos tri-ortogonais; e taxas de rotação em torno de 3 eixos tri-ortogonais, que possibilitam medidas completas da dinâmica do sistema. As medidas da IMU são obtidas de uma porta de comunicação serial RS-232 para armazenamento das medidas no computador.

O receptor GPS<sup>13</sup> utilizado para este trabalho, Ashtech Z-12, faz uso completo do sistema de posicionamento e provê precisão de navegação com qualificação aeronáutica. O conjunto é um sistema composto de receptor, bateria, antena e cabo coaxial. Os dados podem ser armazenados internamente ao receptor e depois recuperados via comunicação serial RS-232, para pós-processamento, ou então podem ser utilizados em tempo real valendo-se desta mesma porta de comunicação. Neste trabalho foram utilizadas as soluções de navegação (posição, velocidade, *pdop* e o tempo correspondente) fornecidas pelo receptor.

Neste experimento, para efeito de comparação, é de interesse o erro cometido na medição das distâncias aos satélites na determinação da posição destes. É caracterizada pelos fatores DOP (*Dilution of Precision*), e neste trabalho é usado especificamente o *pdop*, que é uma medida de erro de posição tridimensional entre receptor e satélites.



Fig. 1 - Receptor GPS, conjunto IMU e computador

O equipamento da figura 1 foi montado em um automóvel e o ambiente escolhido e a trajetória percorrida para o teste é exibido na vista aérea mostrada na fig. 2.



Fig. 2 - Vista aérea do trajeto percorrido

O conjunto percorreu o trajeto armazenando os dados da IMU (aceleração, taxas angulares e tempo correspondente) no computador. Por se tratar de um experimento pós-processado, a correlação entre as diferentes amostras dos arquivos armazenados foi obtida através do conhecimento do elemento comum às mesmas, ou seja, o tempo. É obrigatório o conhecimento das respectivas marcações de tempo em que se deu cada medida, em relação a um padrão (GMT), de forma que seja possível uma sincronização entre leituras dos dados ao tempo comum da IMU, do computador e do receptor GPS.

A figura 3 resume o funcionamento do algoritmo e mostra que após a fase de predição, quando da existência de dados disponibilizados pelo receptor GPS (P,V, *pdop*,t) pode ser feita uma atualização ou correção dos valores de posição e velocidade obtidos pela integração das medidas fornecidas pela IMU (acelerações e taxas angulares). A decisão da atualização ou não das medidas é tomada em função dos valores de *pdop* (qualidade) do GPS para a correspondente medição. Desta forma, o valor de *pdop* será usado como referência para a qualidade do sinal GPS no filtro FKSP.

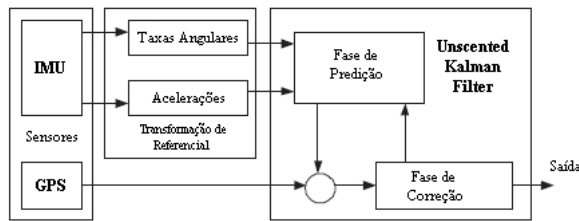


Fig. 3 – Diagrama IMU/GPS com integração ao FKSP

## VII. SIMULAÇÕES

Para o algoritmo do Filtro de Kalman Sigma-Ponto (FKSP), na aplicação das equações (6) a (9), foram utilizados os valores:

a) para o vetor de estados  $\bar{x}$  em P1:

- X(1) - Latitude Geodésica = 23,21187649° S
- X(2) - Longitude Geodésica = 314,1423949° E
- X(3) - Altitude Geodésica = 613,866 m
- X(4) - Velocidade Norte = 0 m/s
- X(5) - Velocidade Leste = 0 m/s
- X(6) - Velocidade Nadir = 0 m/s
- X(7) - Roll = 0 °
- X(8) - Pitch = -0,49°
- X(9) - Yaw = 314,47 °
- X(10) -  $b_{ax} = -0,012 \text{ m/s}^2$
- X(11) -  $b_{ay} = 0,057 \text{ m/s}^2$
- X(12) -  $b_{az} = -0,013 \text{ m/s}^2$
- X(13) -  $b_{gx} = 0,15 \text{ }^\circ/\text{seg}$
- X(14) -  $b_{gy} = 0,14 \text{ }^\circ/\text{seg}$
- X(15) -  $b_{gz} = 0,38 \text{ }^\circ/\text{seg}$

b) para a covariância Inicial [ $P_0$ ]:

Posição: 10 metros em coordenadas horizontais (latitude e longitude) e 30 metros na coordenada vertical,  
Velocidade: 0,1 m/s para as três componentes,

Atitude: 0,1° para “Roll” e “Pitch” e 0,5° para “Yaw”  
Bias dos acelerômetros: 1,0e-03 m/s<sup>2</sup>  
Deriva dos Giroscópios: 5,0e-03 rad/s

Os valores são típicos para medidas de posição e velocidade obtidas para GPS<sup>12</sup>. Dentre os ângulos de atitude, o ângulo de “yaw” (guinada) foi considerado o menos observável (maior desvio-padrão) na prática.

A matriz de densidade espectral de potência foi considerada diagonal e constante com os ruídos:

$$\sqrt{q_{vv}} = 0,0125 \text{ m} / \sqrt{s^3}$$

$$\sqrt{q_{\theta\theta}} = 0,05^\circ / \sqrt{s}$$

$$\sqrt{q_{b_x, b_x}} = 0,0125 \text{ m} / \sqrt{s^3}$$

$$\sqrt{q_{b_y, b_y}} = 0,0025^\circ / \sqrt{s}$$

correspondentes aos ruídos nas equações diferenciais de velocidade (2), de taxa de atitude (3), de “biases” e derivas (5) dos giros e acelerômetros.

E por fim a variância do ruído da medida ( $R_k$ ) adotada:

$R_k(1,1) = 2,450465e-12 \text{ rad}^2$	(latitude)
$R_k(2,2) = 2,450465e-12 \text{ rad}^2$	(longitude)
$R_k(3,3) = 900 \text{ m}^2$	(altitude)
$R_k(4,4) = 0,01 \text{ (m/s)}^2$	( $V_N$ )
$R_k(5,5) = 0,01 \text{ (m/s)}^2$	( $V_E$ )
$R_k(6,6) = 0,01 \text{ (m/s)}^2$	( $V_D$ )
$R_k(7,7) = 7,615435e-07 \text{ rad}^2$	(roll)
$R_k(8,8) = 7,615435e-07 \text{ rad}^2$	(pitch)
$R_k(9,9) = 1,218469e-05 \text{ rad}^2$	(yaw)

O experimento foi amostrado a uma taxa de 20Hz para as leituras da UMI e a 2 Hz para o receptor GPS .

A trajetória bem como as medidas de distâncias são apresentadas em coordenadas NED e suas unidades em metros.

O algoritmo, além de processar a trajetória em função das leituras dos acelerômetros e giroscópios, recebe de forma contínua as informações de posição e velocidade determinadas pelo receptor GPS.

Para a análise do desempenho do algoritmo em função da qualidade do sinal GPS (filtragem usando os valores de *pdop*) são estudados dois casos onde é possível medir a atuação do filtro e seu desempenho.

### Caso 1 – Considerando todas as leituras obtidas pelo receptor GPS como válidas (sem filtragem)

Para este caso, todas as leituras obtidas pelo receptor GPS são realimentadas para o algoritmo de navegação, independentemente de sua qualidade (sem limitação de *pdop*).

A figura 4 faz a comparação, em coordenadas NED, entre a trajetória fornecida pelo receptor GPS e a obtida através do processamento do algoritmo IMU/GPS.

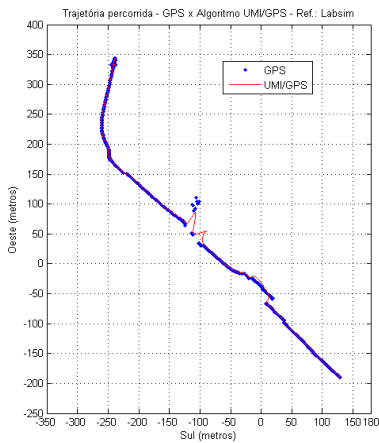


Fig. 4 – Trajetória percorrida GPS X algoritmo sem limitação de pdop

O trecho percorrido é sujeito a trechos com perda de sinal GPS, que é a região de interesse para a avaliação do desempenho do algoritmo em estudo. Para as condições desta análise, a perda de valores confiáveis de posição e velocidade fornecidas pelo receptor GPS é a responsável pelos desvios na trajetória processada pelo filtro devido à falta de qualidade do sinal. A figura 5 detalha o trecho de interesse onde houve a perda de sinal GPS e a resposta do filtro nesta região.

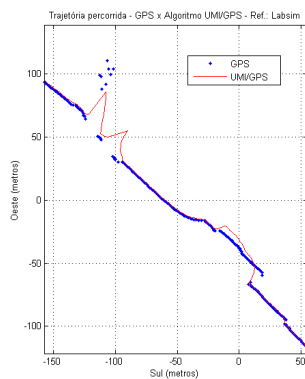


Fig. 5 – Região onde há perda de sinal GPS e comportamento do algoritmo sem filtragem de sinal GPS de má qualidade

### Caso 2 - Considerando apenas as leituras obtidas pelo receptor GPS com $Pdop \leq 5$ (com filtragem)

Em condições idênticas às do caso 1, o algoritmo recebe de forma contínua as informações de posição e velocidade do receptor GPS, contudo, para este caso são atualizadas e processadas deste, apenas as com qualidade de  $Pdop \leq 5$ . Para as medidas com  $Pdop > 5$ , são utilizadas as medidas de posição e velocidade obtidas a partir das medidas da IMU.

Resulta neste caso para o conjunto IMU/GPS a nova trajetória obtida pelo algoritmo que é o mostrado na Fig. 6.

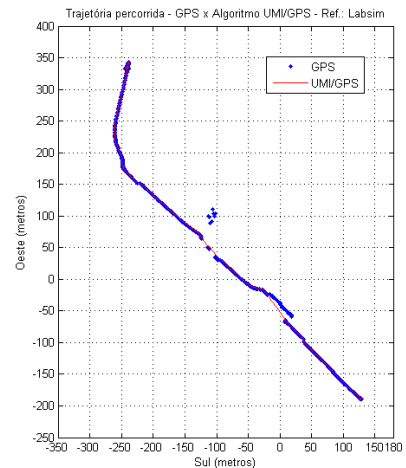


Fig. 6 – Trajetória percorrida GPS X algoritmo com limitação de pdop

A tendência do algoritmo é seguir a atitude informada ao filtro mantendo a trajetória aproximadamente correta nos trechos onde há obstáculos ou limitações de satélites visíveis que resultam em uma qualidade inferior do sinal GPS.

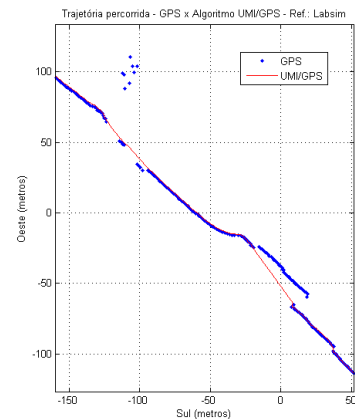


Fig. 7 – Região com perda de sinal GPS e atuação do algoritmo eliminando-se os sinais GPS com  $Pdop > 5$

Na análise dos resultados obtidos as regiões com perda de sinal GPS e com geometria ruim ( $Pdop > 5$ ), a integração UMI/GPS garantiu a interpolação da trajetória com erros menores que os cometidos pelo GPS, desde que eliminados dados GPS intrinsecamente ruins.

Os resultados obtidos mostram que a trajetória obtida é dependente das correções impostas à solução de navegação fornecida pelo receptor GPS. Como a qualidade obtida do receptor GPS é função da geometria local, isto afeta diretamente a qualidade de navegação. Por este motivo é imprescindível a eliminação de valores “ruins” obtidos do receptor GPS, permitindo que a trajetória seja calculada apenas através da UMI para estes valores.

## VIII. CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu os procedimentos e os resultados obtidos na determinação da trajetória a dos dados de uma IMU e sua integração a receptor GPS por meio de um algoritmo utilizando a técnica do Filtro de Kalman Sigma Ponto.

A técnica Sigma-Ponto é atrativa em sistemas onde as expressões da dinâmica do sistema não estão disponíveis ou se apresentam na forma a não permitir uma fácil linearização. Além disso, é capaz de escalonar momentos de ordem superior aumentando ligeiramente a carga computacional.

Na avaliação do desempenho da integração de uma IMU-MEMS com um receptor GPS, concluiu-se pelos resultados obtidos, que a fusão das informações de aceleração e velocidade angular de uma IMU com as de posição e velocidade de um receptor GPS através de FKSP aumenta a autonomia dessa mesma IMU operando em caso de perdas do sinal GPS.

Os resultados mostraram uma resposta rápida do filtro. Os trabalhos futuros envolverão campanhas mais longas para a caracterização do filtro, avaliar sua robustez e a tolerância às falhas.

## IX. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer os organizadores do evento SBEIN 2010 pela atenção e dedicação para que o trabalho pudesse ser apresentado.

## X. REFERÊNCIAS

- [1] Kuga, H.K. and Lopes, R.V.F. and Einwoegerer, W., "Experimental static calibration of an IMU (Inertial Measurement Unit) based on MEMS." XIX Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2007, Brasilia, DF, Brazil, 05-09 November 2007.
- [2] Kuga, H.K. e Milani, P.G. e Einwoegerer, W.; "Experimentos de alinhamento de unidade de medida inercial baseada em MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems)" V Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial – V SBEIN, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2007.
- [3] Einwoegerer, W. Mecanização de central de navegação inercial com dados a partir da integração de IMU MEMS e receptor GPS. 2009. 142 p. (INPE-15763-TDI/1506). Dissertação (Mestrado em Mecânica Espacial e Controle) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009.
- [4] Farrel, Jay A. and Barth, Matthew 1998, "The Global Positioning System & Inertial Navigation", New York, NY, McGraw-Hill.
- [5] Crossbow, 2007, "IMU User's Manual Models IMU300CC, IMU400CC, IMU400CD. Revision B, February 2007, Document 7430-0003-03.
- [6] Maybeck, P. S., 1979, "Stochastic Models, Estimation and Control", Academic Press, New York.
- [7] Brown, R. G. and Hwang, P. Y. C., 1996, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering", John Wiley & Sons, New York.
- [8] Bierman, G. J., 1977, "Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation", Academic Press, New York.
- [9] Julier, S.J. and Uhlmann, J.K., 1997, "A New Extension of the Kalman Filter for Nonlinear Systems". International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, SPIE, 1997.
- [10] Julier, S.J. and Uhlmann, J.K., and Durrant-Whyte, H.F., 2000, "A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators". IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 45, Issue 3, p. 477-482.
- [11] Julier, S.J. and Uhlmann, J.K., 2004, "Unscented Filtering and Nonlinear Estimation". Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 3.
- [12] Misra, P. and Enge, P., 2001, "Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance", Ganga-Jamuna Press, Lincoln.
- [13] Ashtech Surveying Products, - Ashtech, "Z-12 GPS Receiver Operation and Reference Manual", Revision A, 999.