

NAVEGAÇÃO ODOMÉTRICA AUXILIADA POR SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL

Victor Hugo Leite Pereira, victor.pereira@estudante.ufla.br¹

Felipe Oliveira e Silva, felipe.oliveira@ufla.br¹

Gustavo de Souza Carvalho, gustavo.carvalho8@estudante.ufla.br¹

Marcus Vinicius Oliveira Pacheco, marcus.pacheco@estudante.ufla.br¹

Gabriel Araújo e Silva Ferraz, gabriel.ferraz@ufla.br¹

Danilo Alves de Lima, danilo.delima@ufla.br¹

¹Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037 - CEP: 37200-900 - Lavras/MG

Resumo: Atualmente, a navegação de veículos agrícolas é quase que exclusivamente dominada pelos Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS), em especial, o Sistema de Posicionamento Global (GPS). No entanto, quando da existência de requisitos de posição submétrica, típicos da chamada "Agricultura de Precisão", esta tecnologia não se mostra financeiramente acessível aos pequenos e médios agricultores, os quais correspondem a mais de 80% dos agricultores do Brasil (agricultura familiar). A principal causa dessa inacessibilidade reside no alto custo dos aparelhos GNSS utilizados, os quais se baseiam em técnicas diferenciais e relativas avançadas. A despeito dos GNSS, a navegação veicular também pode ser obtida por meio de outras tecnologias, a exemplos dos Sistemas de Navegação Inercial (INS), câmeras, radares, odômetros, etc. É sabido que a navegação odométrica, em particular, tem baixo custo e fornece alta precisão de posicionamento no curto prazo, resultando, contudo, em erros acumulativos, os quais crescem rapidamente à medida que o veículo se desloca. Este comportamento inviabiliza a utilização de apenas a navegação odométrica em veículos terrestres sujeitos a requisitos de posicionamento submétrico. Apesar disso, a odometria pode servir como tecnologia de navegação base (e complementar) aos GNSS, os quais, ao contrário da primeira, apresentam boa exatidão de posicionamento no longo prazo. Este trabalho tem por objetivo propor, simular e avaliar a integração/fusão sensorial da navegação odométrica com o GPS, para fins de posicionamento submétrico de veículos terrestres, em especial os agrícolas. Como principal contribuição deste trabalho, são comparadas duas das principais técnicas de integração odometria/GPS, a saber, as topologias fracamente acoplada e fortemente acoplada, ambas implementadas com base em um Filtro de Kalman Estendido (EKF). Resultados simulados concebidos no software MATLAB[®] são apresentados e analisados, indicando a funcionalidade, efetividade e robustez das topologias de navegação integrada propostas.

Palavras-chave: Odometria, GPS, Filtro de Kalman Estendido.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a maioria das técnicas de navegação e posicionamento são baseadas em dois métodos fundamentais. O primeiro é o *Dead Reckoning*, que se caracteriza pela execução de integrações numéricas a partir de medições de velocidade e/ou aceleração, apresentando boa precisão, porém inerente acúmulo de erros no longo prazo (Grewal *et al.*, 2020). Exemplos de métodos *Dead Reckoning* incluem os Sistemas de Navegação Inercial (INS), odômetros, *Pedestrian Dead Reckoning* (PDR), dentre outros. O segundo é o *Position Fixing*, que apresenta, em geral, boa exatidão, erros limitados, mas baixa precisão (Hegarty, 2019). Um exemplo de método de navegação tipo *Position Fixing* são os Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS), que inclui o Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Diversas técnicas de integração/fusão sensorial têm sido utilizadas para compensar o acúmulo de erros dos métodos *Dead Reckoning* (Lora *et al.*, 1997). A integração da odometria com o GPS, por exemplo, é uma das abordagens mais investigadas (Tian *et al.*, 2000; Ohno *et al.*, 2004). O uso da odometria como recurso auxiliar melhora significativamente a precisão das soluções de navegação GPS, limita os erros de velocidade e corrige adequadamente as características dinâmicas do veículo durante as falhas de sinal do GPS (Spcmgemberg *et al.*, 2007).

A principal problemática a ser investigada neste trabalho, consiste na possibilidade de obtenção de posicionamento submétrico, com sensores odométricos de baixo custo, auxiliados por GPS, de forma a tornar a tecnologia mais acessível (especialmente para aplicações agrícolas). Como contribuição principal do trabalho, são concebidas, testadas e validadas

simulações computacionais de duas das principais técnicas de integração odômetro/GPS, a saber, as implementações fracamente e fortemente acoplada.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a integração do odômetro e GPS, via Filtro de Kalman Estendido (EKF), para dois tipos de arquiteturas de integração: fracamente acoplada (*loosely coupled integration, LC*) e fortemente acoplada (*tightly coupled integration, TC*). A Seção 3 apresenta os resultados simulados para as integrações investigadas e a Seção 4 fornece as conclusões.

2. INTEGRAÇÃO ODÔMETRO/GPS

A técnica de integração/fusão sensorial proposta neste trabalho consiste na utilização de um EKF, configurado para estimar os erros nas variáveis de navegação fornecidas pela odometria, bem como eventuais erros sistemáticos existentes nas medições do GPS. Tal topologia é chamada na literatura de implementação por erros de estado (Groves, 2013), e pode ser categorizada ainda, conforme o tipo de medição do GPS que é utilizado na etapa de atualização do EKF, descrito a seguir. Para detalhes quanto à implementação prática da navegação odométrica, vide (Pereira *et al.*, 2020; Farrell, 2008) e GPS isoladamente, vide (Groves, 2013).

2.1 Integração Fracamente Acoplada - Etapa de Predição

A etapa de predição do EKF para a fusão sensorial fracamente acoplada (subscrito LC) da odometria com o GPS inicia-se com a obtenção dos modelos dinâmicos e dos modelos de erros para as variáveis de estado a serem estimadas. Os estados, x , do filtro de integração, representados no sistema de coordenadas de navegação¹ (n), compreendem os erros, representados por δ , da solução de navegação da odometria:

$$\mathbf{x}_{LC} = \begin{bmatrix} \delta\psi \\ \delta\mathbf{r}_{eb,N}^n \\ \delta\mathbf{r}_{eb,E}^n \\ \delta R_{rL} \\ \delta R_{rR} \end{bmatrix} \quad (1)$$

sendo $\delta\psi$ o erro de guinada, $\delta\mathbf{r}_{eb,N}^n$ o erro de deslocamento norte, $\delta\mathbf{r}_{eb,E}^n$ o erro de deslocamento leste, δR_{rL} e δR_{rR} os erros (*biases*) supostos existirem nos raios das rodas esquerda e direita, respectivamente.

O modelo do processo do EKF de integração é definido por meio das equações dinâmicas que regem o comportamento temporal dos erros da odometria, a saber:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta\psi} \\ \dot{\delta\mathbf{r}_{eb,N}^n} \\ \dot{\delta\mathbf{r}_{eb,E}^n} \\ \dot{\delta R_{rL}} \\ \dot{\delta R_{rR}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & F_{14} & F_{15} \\ F_{21} & 0 & 0 & F_{24} & F_{25} \\ F_{31} & 0 & 0 & F_{34} & F_{35} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_{rL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_{rR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\psi \\ \delta\mathbf{r}_{eb,N}^n \\ \delta\mathbf{r}_{eb,E}^n \\ \delta R_{rL} \\ \delta R_{rR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_r} & -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 \\ G_{21} & G_{22} & 0 & 0 \\ G_{31} & G_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{rL}\delta\omega_{rL} \\ R_{rR}\delta\omega_{rR} \\ \eta_{R_{rL}} \\ \eta_{R_{rR}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde:

$$F_{14} = \frac{v_{erL}}{R_{rL}T_r} \quad (3)$$

$$F_{15} = -\frac{v_{erR}}{R_{rR}T_r} \quad (4)$$

$$F_{21} = -\sin\psi v_{er} + (-\sin\psi l_{br,y}^b + \cos\psi l_{br,x}^b) \dot{\psi} \quad (5)$$

$$F_{24} = \frac{\cos\psi v_{erL}}{2R_{rL}} + \left(\frac{\cos\psi l_{br,y}^b + \sin\psi l_{br,x}^b}{T_r R_{rL}} \right) v_{erL} \quad (6)$$

$$F_{25} = \frac{\cos\psi v_{erR}}{2R_{rR}} - \left(\frac{\cos\psi l_{br,y}^b + \sin\psi l_{br,x}^b}{T_r R_{rR}} \right) v_{erR} \quad (7)$$

$$F_{31} = \cos\psi v_{er} + (\cos\psi l_{br,y}^b + \sin\psi l_{br,x}^b) \dot{\psi} \quad (8)$$

$$F_{34} = \frac{\sin\psi v_{erL}}{2R_{rL}} + \left(\frac{\sin\psi l_{br,y}^b - \cos\psi l_{br,x}^b}{T_r R_{rL}} \right) v_{erL} \quad (9)$$

¹O sistema de coordenadas de navegação é definido com sua origem no centro de massa do veículo e tem seus eixos x , y , z direcionados para o norte, leste e vertical (NED), respectivamente.

$$F_{35} = \frac{\sin \psi v_{erR}}{2R_{rR}} - \left(\frac{\sin \psi l_{br,y}^b - \cos \psi l_{br,x}^b}{T_r R_{rR}} \right) v_{erR} \quad (10)$$

$$G_{21} = \frac{\cos \psi}{2} + \left(\frac{\cos \psi l_{br,y}^b + \sin \psi l_{br,x}^b}{T_r} \right) \quad (11)$$

$$G_{22} = \frac{\cos \psi}{2} - \left(\frac{\cos \psi l_{br,y}^b + \sin \psi l_{br,x}^b}{T_r} \right) \quad (12)$$

$$G_{31} = \frac{\sin \psi}{2} + \left(\frac{\sin \psi l_{br,y}^b - \cos \psi l_{br,x}^b}{T_r} \right) \quad (13)$$

$$G_{32} = \frac{\sin \psi}{2} - \left(\frac{\sin \psi l_{br,y}^b - \cos \psi l_{br,x}^b}{T_r} \right) \quad (14)$$

sendo τ_{R_r} o tempo de correlação para o erro dos raios das rodas traseiras, T_r o comprimento do eixo traseiro, v_{er} a velocidade no centro do eixo traseiro, v_{erL} e v_{erR} as velocidades nas rodas traseiras esquerda e direita respectivamente, $\delta\omega_{rL}$ e $\delta\omega_{rR}$ os ruídos brancos Gaussianos associados ao processo de quantização numérica dos pulsos dos odômetros nas rodas traseiras esquerda e direita, respectivamente, e $\eta_{R_{rL}}$ e $\eta_{R_{rR}}$ os ruídos brancos Gaussianos que dirigem os processos correlacionados dos erros dos raios das rodas esquerda e direita, também respectivamente.

Os componentes do braço de alavanca entre os sistemas de coordenadas do corpo (b) e do eixo das rodas traseiras² (r), $\delta l_{br,x}^b$ e $\delta l_{br,y}^b$ podem, em geral, ser desprezados do vetor de estado desde que a matriz de densidade de ruídos do processo, S_{LC} , abaixo seja ligeiramente incrementada de forma a acomodar as variações na dinâmica dos estados decorrentes dessa simplificação:

$$S_{LC} = \begin{bmatrix} PSD(R_{rL}\delta\omega_{rL}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & PSD(R_{rR}\delta\omega_{rR}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & PSD(\eta_{R_{rL}}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & PSD(\eta_{R_{rR}}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde PSD denota densidade espectral de potência.

2.2 Integração Fracamente Acoplada - Etapa de Atualização

As inovações de medição do EKF aplicado à integração fracamente acoplada da odometria/GPS correspondem à diferença entre a posição cartesiana fornecida pelo GPS e a respectiva estimativa proveniente da odometria. O modelo de medição, z_{LC} , nesse caso é:

$$z_{LC} = \begin{bmatrix} 0 & -C_{n1,1}^e & -C_{n1,2}^e & 0 & 0 \\ 0 & -C_{n2,1}^e & -C_{n2,2}^e & 0 & 0 \\ 0 & -C_{n3,1}^e & -C_{n3,2}^e & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\psi \\ \delta r_{eb,N}^n \\ \delta r_{eb,E}^n \\ \delta R_{rL} \\ \delta R_{rR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \eta_{r_{ea,G}}^e \quad (16)$$

sendo C_n^e a matriz de transformação do sistema de coordenadas de navegação para o sistema de coordenadas ECEF³ (e), e $\eta_{r_{ea,G}}^e$ representa o vetor de ruído estocástico do posicionamento obtido pelo GPS (suposto branco e Gaussiano).

Por fim, a matriz de covariância dos ruídos de medição é definida em função da variância (σ^2) do vetor de ruídos estocásticos do GPS.

$$R_{LC} = \begin{bmatrix} \sigma^2(\eta_{r_{ea,G},x}^e) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2(\eta_{r_{ea,G},y}^e) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2(\eta_{r_{ea,G},z}^e) \end{bmatrix} \quad (17)$$

²Os sistemas de coordenadas do corpo e do eixo das rodas traseiras são definidos no centro de massa do veículo e no centro do eixo traseiro respectivamente, e têm seus eixos x , y e z apontados na direção frontal, para a direita e para baixo, respectivamente.

³O sistema de coordenadas ECEF é definido com sua origem no centro da Terra, sendo que o eixo x aponta para a interseção entre o Meridiano de Greenwich e a Linha do Equador, o eixo z aponta no sentido do eixo de rotação da Terra, e o eixo y completa o triedro dextrogiro.

2.3 Integração Fortemente Acoplada - Etapa de Predição

Além dos estados já apresentados anteriormente para a integração fracamente acoplada, dois estados extras referentes ao GPS são acrescentados na integração fortemente acoplada (subscrito TC):

$$\mathbf{x}_{TC} = \begin{bmatrix} \delta\psi \\ \delta\mathbf{r}_{eb,N}^n \\ \delta\mathbf{r}_{eb,E}^n \\ \delta R_{rL} \\ \delta R_{rR} \\ \delta\rho_c^a \\ \delta\dot{\rho}_c^a \end{bmatrix} \quad (18)$$

sendo $\delta\rho_c^a$ o erro do relógio do receptor e $\delta\dot{\rho}_c^a$ a deriva (*drift*) do erro do relógio do receptor.

O modelo do processo para a integração fortemente acoplada é definido como anteriormente feito para a integração fracamente acoplada somado ao modelo dinâmico dos estados do GPS:

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{\rho}_c^a \\ \delta\ddot{\rho}_c^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\rho_c^a \\ \delta\dot{\rho}_c^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_{\rho_{c\phi}}^a \\ \eta_{\rho_{cf}}^a \end{bmatrix} \quad (19)$$

sendo os vetores $\eta_{\rho_{c\phi}}^a$ e $\eta_{\rho_{cf}}^a$ de ruídos estocásticos que modelam as incertezas na fase ϕ e frequência f do relógio do receptor, respectivamente.

Finalizando a etapa de predição do EKF, a matriz de densidade de ruídos do processo, S_{TC} , define as PSDs dos elementos do vetor de ruídos estocásticos relativas ao GPS:

$$S_{TC} = \begin{bmatrix} PSD(\eta_{\rho_{c\phi}}^a) & 0 \\ 0 & PSD(\eta_{\rho_{cf}}^a) \end{bmatrix} \quad (20)$$

2.4 Integração Fortemente Acoplada - Etapa de Atualização

As inovações de medição do EKF aplicado à integração fortemente acoplada da odometria/GPS são formadas pelas diferenças entre as pseudo-distâncias medidas a partir dos s satélites GPS visíveis e suas respectivas estimativas obtidas a partir da solução de navegação odométrica. O consequente modelo de medição, $\mathbf{z}_{TC}$ do EKF é dado por:

$$\mathbf{z}_{TC} = \begin{bmatrix} 0 & -u_{a1,N}^n & -u_{a1,E}^n & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -u_{as,N}^n & -u_{as,E}^n & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\psi \\ \delta\mathbf{r}_{eb,N}^n \\ \delta\mathbf{r}_{eb,E}^n \\ \delta R_{rL} \\ \delta R_{rR} \\ \delta\rho_c^a \\ \delta\dot{\rho}_c^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_\rho^1 \\ \vdots \\ \eta_\rho^s \end{bmatrix} \quad (21)$$

onde $u_{as,N}^n$ e $u_{as,E}^n$ representam as componentes norte e leste, respectivamente, do vetor linha de visada entre o satélite s e a antena do receptor a , e η_ρ^s corresponde ao elemento s do vetor de ruídos estocásticos (supostos brancos e Gaussianos) da pseudo-distância obtida pelo GPS.

A matriz de covariância dos ruídos de medição é definida em função das variâncias do vetor de ruídos estocásticos de medição do GPS, nesse caso, atrelados às pseudo-distâncias. Nele estão incluídos os erros de multicaminho, ruídos de rastreamento, erros do relógio do satélite, erros de sincronização entre o odômetro e GPS, flexão no braço de alavanca, erro de efeméride e atrasos ionosféricos e troposféricos. A ponderação dos erros dependentes da linha de visada entre receptor e satélite pode ser feita na matriz R_{TC} levando-se em consideração o ângulo de elevação dos mesmos.

$$R_{TC} = \begin{bmatrix} \sigma^2(\eta_\rho^1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma^2(\eta_\rho^s) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Os erros de modo comum e devido ao multicaminho podem, em geral, ser desprezados do vetor de estados (devido a problemas de observabilidade), desde que sejam aumentados ligeiramente os valores das variâncias na Eq. (22) para que o modelo acomode as incertezas extras que não foram contabilizadas no vetor de medição.

3. RESULTADOS SIMULADOS

De forma a se verificar o desempenho das soluções de navegação integradas entre odometria/GPS propostas, testes simulados foram concebidos. Os testes consistiram em se gerar uma massa de dados simulados, para um veículo agrícola em movimento, supostamente instrumentado com odômetros em suas rodas traseiras não esterçantes e um receptor GPS. A trajetória bidimensional simulada para o veículo é ilustrada na Fig. 1.

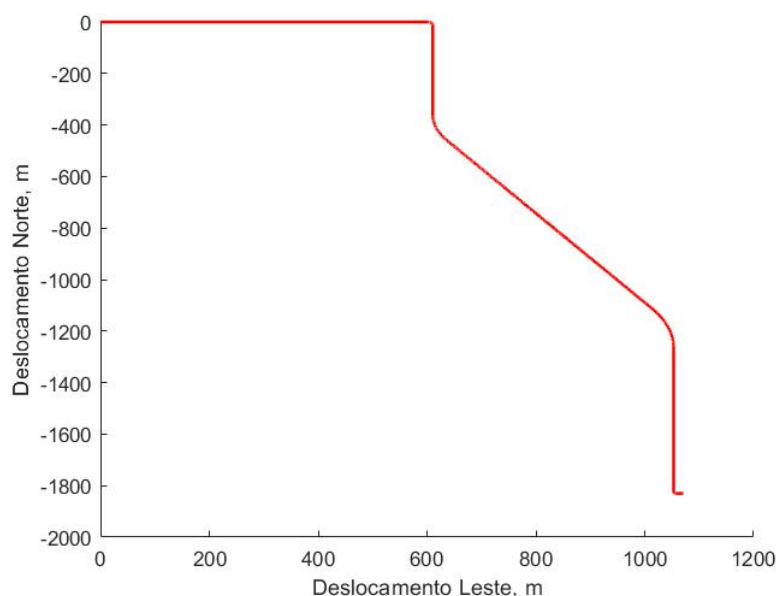


Figura 1: **Trajétória bidimensional simulada realizada pelo veículo para fins de validação, obtida sem adição de ruídos e a uma velocidade média de 50 Km por hora.**

Fonte: Autor

As soluções de navegação odométrica e GPS isoladas foram implementadas em *software* MATLAB®, conforme sugerido por (Pereira *et al.*, 2020) e (Groves, 2013), respectivamente, bem como as integrações/fusões sensoriais propostas. Os parâmetros considerados na simulação são sumarizados nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1: **Erros de inicialização representados no sistema de coordenadas de navegação (n).**

Parâmetros	Valor
Erro de inicialização de posição	$[-1,63;0,58;7,09]$ m
Erro de inicialização de velocidade	$[0,05;-0,05;0,1]$ m/s
Erro de inicialização de atitude	$[-0,05;0,04;1]$ graus

Fonte: Autor

Tabela 2: **Parâmetros definidos para a simulação da navegação odométrica.**

Parâmetros	Valor
Braço de alavanca do centro de gravidade do veículo até ao centro do eixo traseiro	$[-1;0;0]$ m
Comprimento do eixo traseiro	2 m
Raio das rodas traseiras	0,75 m
Bias do raio das rodas traseiras	$[1;-1]*10^{-4}$ m
Desvio padrão do erro correlacionado nos raios das rodas traseiras	$5*10^{-4}$ m
Tempo de correlação do erro nos raios das rodas traseiras	36000 s
Raiz da PSD dos ruídos estocásticos da odometria	10^{-3} m/ $\sqrt{s}$
Nível de quantização (resolução) para um odômetro de 400 pulsos/volta	$1,6*10^{-2}$ m/s

Fonte: Autor

Tabela 3: **Parâmetros definidos para a simulação do GPS.**

Parâmetros	Valor
Braço de alavanca do centro de gravidade do veículo até a antena do receptor	[0;0;-2] m
Número de satélites na constelação	30
Raio das órbitas dos satélites	26.561.750 m
Ângulo de inclinação das órbitas	55 graus
Ângulo de máscara	10 graus
<i>Offset</i> do relógio do receptor no tempo $t = 0$ s	10000 m
<i>Drift</i> do relógio do receptor no tempo $t = 0$ s	100 m/s
Desvio padrão do erro do relógio do satélite	0,5 m
Desvio padrão do erro de efeméride	0,5 m
Desvio padrão do erro troposférico zenital	0,2 m
Desvio padrão do erro ionosférico zenital	4 m
Desvio padrão do ruído de rastreamento do código	1 m
Desvio padrão do erro de multicaminho do código	0,5 m
Tempo de correlação do erro de multicaminho	10 s

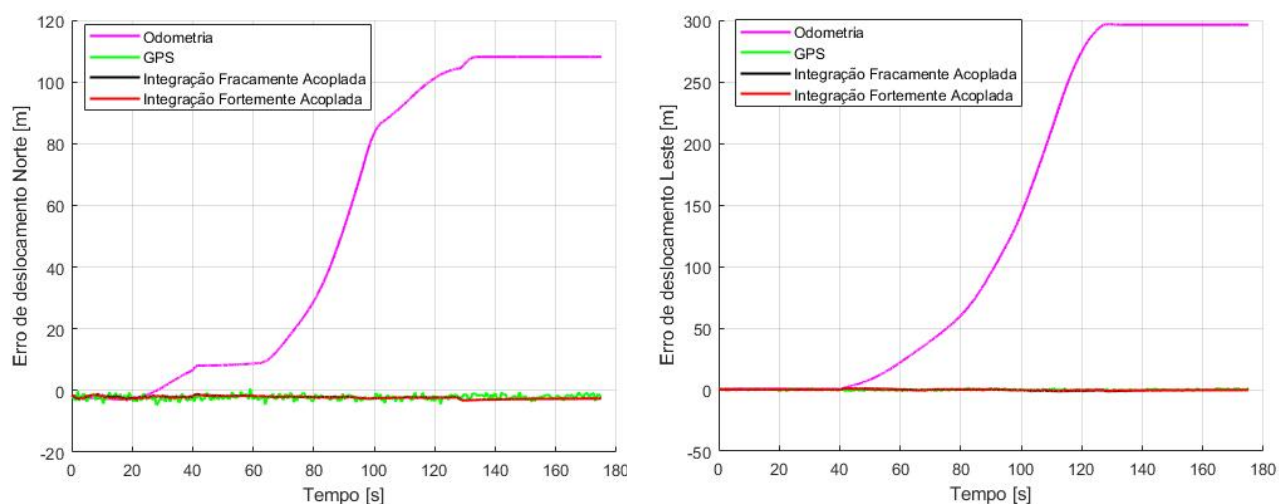
Fonte: Autor

Tabela 4: **Parâmetros definidos para a simulação do Filtro de Kalman Estendido.**

Parâmetros	Valor
Incerteza inicial da guinada	3 graus
Incerteza inicial da posição horizontal	10 m
Incerteza inicial do <i>bias</i> dos raios das rodas traseiras	$5 \cdot 10^{-3}$ m
Incerteza inicial do <i>offset</i> do relógio do receptor	10 m
Incerteza inicial do <i>drift</i> do relógio do receptor	0,1 m/s
PSD dos ruídos estocásticos da odometria	10^{-6} m ² /s
PSD dos ruídos diretores dos erros dos raios das rodas traseiras	$1,5 \cdot 10^{-11}$ m ² /s
PSD do ruído da fase do relógio do receptor	0,01 m ² /s
PSD do ruído da frequência do relógio do receptor	0,04 m ² /s ³
Desvio padrão do ruído de medição da posição (via GPS)	3,5 m
Desvio padrão do ruído de medição da pseudo-distância	2,5 m

Fonte: Autor

As Figuras 2 a 3 ilustram os erros de posição cartesiana nas direções norte e leste, bem como o erro de guinada do veículo, para as diferentes estratégias de navegação investigadas.



a) Erro de deslocamento norte.

b) Erro de deslocamento leste.

Figura 2: **Erros de deslocamento norte e leste obtidos com a adição de ruídos.**

Fonte: Autor

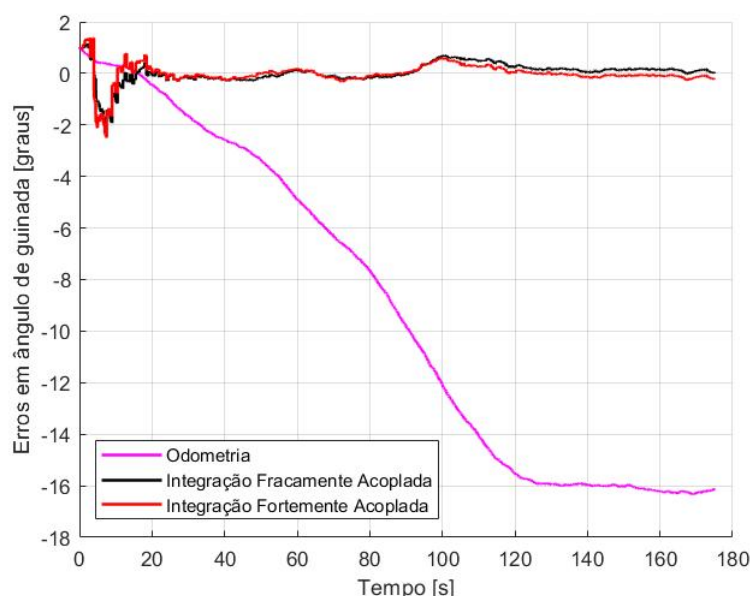


Figura 3: Erros em ângulo de guinada obtidos com a adição de ruídos.

Fonte: Autor

As Tabelas 5 e 6 resumizam os respectivos valores RMS (*Root Mean Square*) e Desvios Padrões (SD), respectivamente, dos erros supracitados. Na Tab. 5, em particular, é incluído, para fins de comparação, o valor RMS do erro de posição horizontal ($\delta \mathbf{r}_{eb,H}^n$), calculada como sendo a norma Euclidiana dos respectivos erros de posição norte e leste.

Tabela 5: Valores RMS para os erros de posição cartesiana nas direções norte, leste e ângulo de guinada.

	Odometria	GPS	Integração Fracamente Acoplada	Integração Fortemente Acoplada
$\delta \mathbf{r}_{eb,N}^n$ [m]	70,819	2,345	2,299	2,356
$\delta \mathbf{r}_{eb,E}^n$ [m]	184,373	0,700	0,552	0,376
$\delta \mathbf{r}_{eb,H}^n$ [m]	197,506	2,447	2,364	2,386
$\delta \psi$ [graus]	10,995	x	0,393	0,398

Fonte: Autor

Tabela 6: Desvios padrões dos erros de posição cartesiana nas direções norte, leste e ângulo de guinada.

	Odometria	GPS	Integração Fracamente Acoplada	Integração Fortemente Acoplada
$\sigma \delta \mathbf{r}_{eb,N}^n$	46,763	0.836	0,424	0,403
$\sigma \delta \mathbf{r}_{eb,E}^n$	126,973	0.685	0,512	0,324
$\sigma \delta \psi$	0,109	x	0,006	0,006

Fonte: Autor

Das Figuras 2 a 3 e Tabelas 5 e 6, é possível verificar a característica típica do método de navegação odométrico *Dead Reckoning*, a saber: boa exatidão nos instantes iniciais, a qual, contudo, se degrada progressivamente, com o deslocamento do veículo, o que resultou em um erro de posição horizontal próximo a 200 metros em menos de 2 minutos de simulação. A navegação por GPS, por outro lado, não apresenta problemas de divergência, mas apresenta baixa precisão (i.e., maior dispersão das estimativas), conforme pode ser observado nos valores SD da Tab. 6. Tal precisão de navegação é geralmente suficiente em aplicações urbanas, uma vez que a posição do veículo pode ser corrigida conhecendo-se o mapa aproximado do local por onde ele trafega (veículos urbanos não trafegam dentro de quarteirões, por exemplo). No entanto, em aplicações agrícolas e *canyons* urbanos, por exemplo, essa possibilidade de correção não se faz disponível, fazendo com que a navegação por GPS, não seja suficiente para garantir boa exatidão de posicionamento, além de não fornecer estimativas de orientação do veículo (ângulo de guinada).

Já nas integrações fracamente e fortemente acoplada, o EKF corrigiu as divergências do sistema referência (odometria), bem como reduziu a dispersão (ruídos) do sistema auxiliar (GPS), indicando boas escolhas dos modelos de predição e atualização usados no EKF. Em termos de valores RMS, a integração fracamente acoplada mostrou-se ligeiramente superior à fortemente acoplada. Já em termos de valores SD, a integração fortemente acoplada resultou em menor dispersão das estimativas, conforme pode ser visto pelos valores SD da Tab. 6, bem como nas Figs. 4 e 5, que são réplicas da Fig. 2, excluindo-se somente a solução odométrica pura.

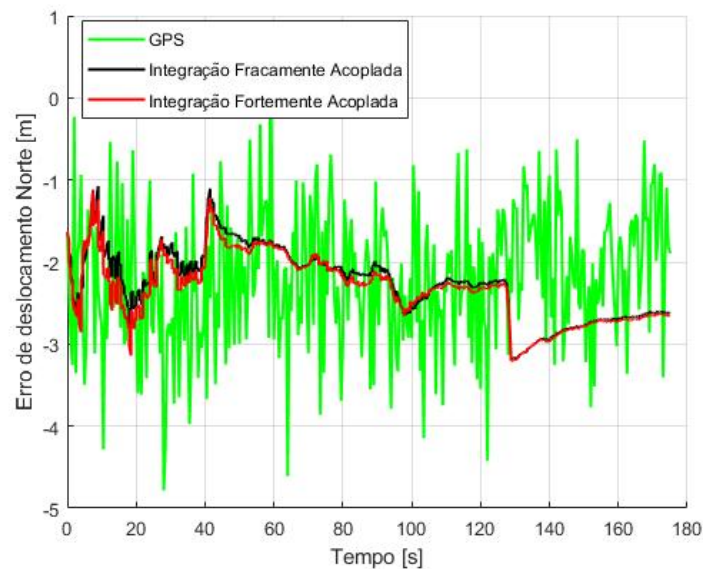


Figura 4: Erros de deslocamento norte obtidos com a adição de ruídos.

Fonte: Autor

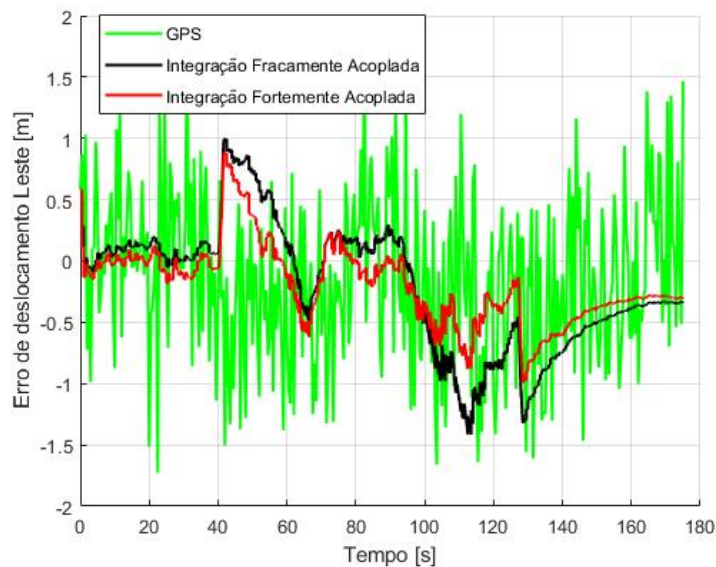
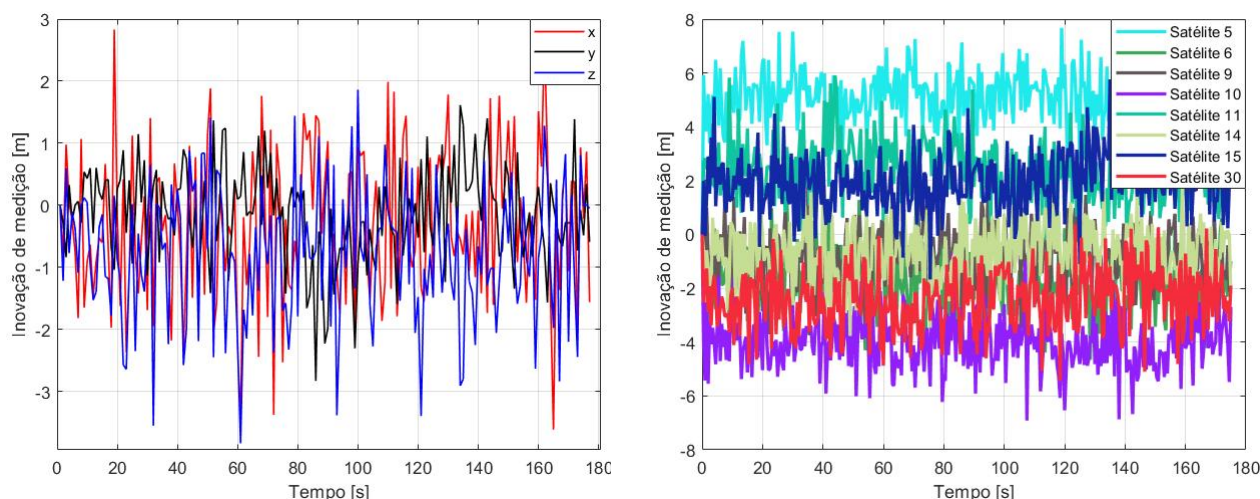


Figura 5: Erros de deslocamento leste obtidos com a adição de ruídos.

Fonte: Autor

Na Fig. 6, as inovações de medição dos EKF's sinalizam a qualidade dos filtros para as integrações fracamente e fortemente acopladas. Quando bons modelos de medição são escolhidos para o EKF, i.e., quando assume-se que eventuais erros sistemáticos de medição foram adequadamente mitigados e/ou modelados como estados, tem-se que as inovações de medição resultantes são ruídos brancos Gaussianos de média nula. Essa situação é melhor observada na integração LC, onde as três inovações de posição são mais próximas de zero, ao contrário da integração TC que apresenta inovações dispersas (com erros sistemáticos) para os 8 satélites visíveis. Tal comportamento é um claro indicativo de que o modelo de medição da integração LC foi superior ao da integração TC, o que resultou no seu desempenho de estimação (em termos de valores RMS) também ligeiramente superior.



a) Integração fracamente acoplada.

b) Integração fortemente acoplada.

Figura 6: Inovações de medição dos Filtros de Kalman Estendidos sinalizando a qualidade dos filtros para as integrações fracamente e fortemente acopladas.

Fonte: Autor

Conforme é sabido da literatura, a principal vantagem da integração LC, em relação à TC, é a simplicidade da arquitetura. Uma desvantagem, contudo, é o fato de que o GPS é incapaz de fornecer uma estimativa de posição ao EKF de integração (e consequentemente, fazê-lo corrigir a odometria), quando há menos de quatro satélites visíveis ao receptor. Isso, por outro lado, não ocorre na integração TC, onde o auxílio à odometria permanece mesmo quando do fornecimento de apenas uma medição de pseudo-distância por parte do GPS.

Em suma: ambas as topologias de integração testadas mostraram-se eficientes na fusão sensorial da odometria com o GPS, sendo capazes de reter as vantagens de ambos os métodos de navegação e mitigar suas desvantagens. A escolha entre as topologias fracamente e fortemente acopladas deve ser cuidadosa e levar em conta o compromisso existente entre simplicidade de implementação e disponibilidade de sinais GPS. Em cenários típicos agrícolas, onde não há significativas barreiras aos sinais GPS, a solução fracamente acoplada mostra-se uma solução promissora e suficientemente precisa, conforme foi demonstrado neste trabalho.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto, simulado e avaliado, via *software* MATLAB®, um sistema de navegação veicular integrando odometria e Sistema de Posicionamento Global (GPS). Para fins de simulação, foram investigadas duas técnicas de fusão sensorial tipicamente encontradas na literatura, a saber, a fracamente acoplada (LC) e a fortemente acoplada (TC). Por meio das simulações, foi possível obter um resultado satisfatório comprovando a eficácia das mesmas para fins de posicionamento veicular de precisão, em particular para aplicações agrícolas.

A navegação utilizando apenas a odometria mostrou-se de baixo custo, porém ineficiente, ainda assim, esse método tem suas vantagens pois pode fornecer solução de posicionamento contínua, isto é, independente de sinais externos. Já a navegação utilizando apenas o GPS mostrou-se eficiente, no entanto limitada, visto que possui baixa precisão, está sujeita a interrupções dos sinais e não fornece estimativas de orientação do veículo.

A integração da navegação odométrica (*Dead Reckoning*) com o GPS (*Position Fixing*) por meio da utilização de Filtros de Kalman Estendidos (EKF), propiciou um sistema de navegação veicular de baixo custo e com boas características de robustez, confiabilidade, disponibilidade, precisão e exatidão. A principal contribuição desta integração é a minimização do acúmulo de erros da navegação odométrica e no caso da implementação fortemente acoplada, a garantia de fornecimento da solução de navegação, mesmo quando da interrupção de sinais GPS. São desvantagens, contudo, da utilização da topologia TC: maior custo computacional e impossibilidade de implementação em receptores GPS que não forneçam medições brutas das suas observáveis.

A despeito da eficácia das técnicas de integração propostas, e da evidente melhoria das mesmas se comparadas com as soluções de navegação odométrica e GPS puras, verificou-se que nenhuma delas culminou em um desempenho de navegação submétrico (requisito da Agricultura de Precisão). A integração de outros sistemas auxiliares à odometria, tais como os Sistemas de Navegação Inercial (INS), magnetômetros e barômetros, em adição ao GPS, figura como tópico de investigação futura por parte dos autores.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EMBRAPA (proc. no. 10.18.20.041.00.02 e 10.18.20.044.00.02), à FAPEMIG (proc. no. AG-APQ-01449-17 e APQ-00202-21), ao CNPq (proc. no. 313160/2019-8), à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP - ROTA 2030), proc. no. 27192.02.02/2021.01.0, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas

e Automação (PPGESISA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), pelo apoio fornecido.

6. REFERÊNCIAS

- Farrell, J., 2008. *Aided navigation: GPS with high rate sensors*. McGraw-Hill, Inc. 553 p.
- Grewal, M.S., Andrews, A.P. and Bartone, C.G., 2020. *Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons. 410 p.
- Groves, P.D., 2013. *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. Artech house. 797 p.
- Hegarty, C., 2019. "Understanding GPS/GNSS: Principles and applications". 410 p.
- Lora, F.A.S., Hemerly, E.M. and Lages, W.F., 1997. "Estimação em tempo real de posição e orientação de robôs móveis utilizando sensores com diferentes taxas de amostragem". *Simpósio Brasileiro de Automação ao Inteligente-SBAI*, pp. 453–458.
- Ohno, K., Tsubouchi, T., Shigematsu, B. and Yuta, S., 2004. "Differential GPS and odometry-based outdoor navigation of a mobile robot". *Advanced Robotics*, Vol. 18, No. 6, pp. 611–635.
- Pereira, V.H.L., Silva, F.O., Ferraz, G.A.S., Carvalho, G.S., Fernandes, A.A. and Menezes Filho, R.P., 2020. "Simulador de navegação odométrica em plataforma MATLAB®". *Anais do XXIX Congresso da Pós-Graduação, Universidade Federal de Lavras*, pp. 900–909.
- Spcmggenberg, M., Calmettes, V. and Tourneref, J.Y., 2007. "Fusion of GPS, INS and odometric data for automotive navigation". In *2007 15th European Signal Processing Conference*. IEEE, pp. 886–890.
- Tian, L., Zhou, Y. and Tang, L., 2000. "Improving GPS positioning precision by using optical encoders". In *ITSC2000. 2000 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No. 00TH8493)*. IEEE, pp. 293–298.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

GLOBAL POSITIONING SYSTEM-AIDED ODOMETRY NAVIGATION

Victor Hugo Leite Pereira, victor.pereira@estudante.ufla.br¹

Felipe Oliveira e Silva, felipe.oliveira@ufla.br¹

Gustavo de Souza Carvalho, gustavo.carvalho8@estudante.ufla.br¹

Marcus Vinicius Oliveira Pacheco, marcus.pacheco@estudante.ufla.br¹

Gabriel Araújo e Silva Ferraz, gabriel.ferraz@ufla.br¹

Danilo Alves de Lima, danilo.delima@ufla.br¹

¹Federal University of Lavras, Post office box: 3037 - CEP: 37200-900 - Lavras/MG

Abstract: Nowadays, agricultural vehicle navigation is almost exclusively dominated by Global Navigation Satellite Systems (GNSS), in particular, the Global Positioning System (GPS). However, when there are submetric position constraints, typical of the so-called "Precision Agriculture", this technology is not financially accessible to small and medium farmers, who correspond to more than 80% of farmers in Brazil (family farming). The main cause of this inaccessibility lies in the high cost of the employed GNSS devices, which are based on advanced differential and relative techniques. Despite GNSS, vehicular navigation can also be achieved through other technologies, such as Inertial Navigation Systems (INS), cameras, radars, odometers, etc. It is known that odometric navigation, in particular, provides high precision in the short-term, but it presents cumulative errors that rapidly increase as the vehicle moves. This hinders the use of only odometric navigation for terrestrial vehicles subject to submetric positioning constraints. Despite this, odometry can serve as a base (and complementary) navigation technology to GNSS, which, unlike the former, provides good positioning accuracy in the long-term. This work aims at proposing, simulating and evaluating the sensor fusion/integration of odometric navigation with GPS, for the purpose of submetric positioning of land vehicles, especially agricultural ones. As the main contribution of this work, two of the main odometry/GPS integration techniques are compared, namely, the loosely coupled and tightly coupled topologies, both implemented in the framework of an Extended Kalman Filter (EKF). Simulated results conceived in MATLAB® software are presented and analyzed, indicating the functionality, effectiveness and robustness of the proposed integrated navigation topologies.

Palavras-chave: Odometry, GPS, Extended Kalman Filter