

# Posicionamento com GNSS em Cenários de Multi-Constelação



8º CONGRESSO DO COMITÉ PORTUGUÊS DA URSI  
LISBOA, 28 DE NOVEMBRO DE 2014

*Rita Vallejo*  
*José Sanguino*  
*António Rodrigues*



**TÉCNICO**  
LISBOA



instituto de  
telecomunicações

# Estrutura da Apresentação



- Introdução
- Problema
- Motivação
- Combinação de múltiplos GNSS (GPS, GLONASS e Galileo)
- Estimativa da Posição
- Simulação de Galileo
- Resultados e Conclusões
- Considerações Finais

# Introdução (1/2)



- Definição de GNSS

- *Global Navigation Satellite System*
- Sistema capaz de proporcionar o posicionamento a nível global através de uma constelação de satélites



	GPS	GLONASS	Galileo
Satélites	32	24	30
Planos orbitais	6	3	3
Inclinação orbital	55°	64.8°	56°
Período orbital	11 h 58 min	11 h 15 min	~14h
Altitude orbital	20 200 km	19 100 km	23 222 km

# Introdução (2/2)



- Posicionamento com GNSS
  - A posição do receptor é dada pela intersecção de esferas centradas em cada satélite visível, com raio igual à distância satélite-receptor.
    - ✦ Offset do relógio do receptor (pseudo-distâncias)
    - ✦ 4 satélites (4 equações e 4 incógnitas)
  - A precisão da solução do posicionamento depende da geometria relativa satélites-receptor.

# Problema



- Em condições de pouca visibilidade do céu (como em áreas urbanas) nem sempre o receptor é capaz de determinar a sua posição e quando consegue, a estimativa pode ter de ser descartada por não cumprir os requisitos das aplicações.
  - Poucos satélites visíveis
  - Geometria desfavorável

# Motivação



- Combinação de múltiplos GNSS:
  - Aumento do número de satélites visíveis
  - Geometrias mais favoráveis
  - Melhor disponibilidade
  - Estimativas mais precisas e exactas
  - Tirar partido das características de cada constelação

# Combinação de Múltiplos GNSS (1/6)



- A combinação não é simples pois as constelações têm diferentes implementações a nível de:
  - Escalas de Tempo
  - Sistemas de Coordenadas
  - Informação orbital

# Combinação de Múltiplos GNSS (2/6)



- Escalas de Tempo

- GPS

- ✦ Difere da hora UTC pois não é corrigida por *leap seconds* (16 segundos)

- Galileo

- ✦ Difere da hora UTC pois não é corrigida por *leap seconds* (15 segundos)

- GLONASS

- ✦ Coincidente com a hora de Moscovo UTC(SU) ou UTC+3 horas

- ***Estão relacionadas com UTC!***



# Combinação de Múltiplos GNSS (3/6)



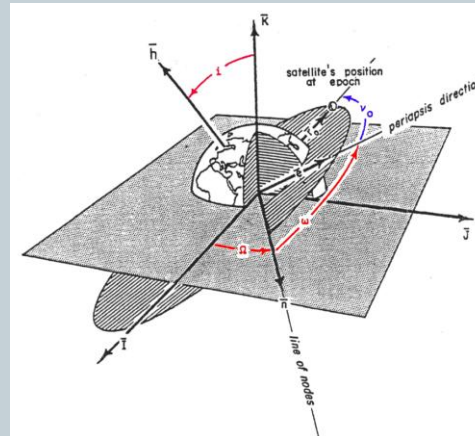
- Sistemas de Coordenadas
  - GPS
    - ✦ World Geodetic System 1984 (WGS-84)
  - Galileo
    - ✦ Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)
  - GLONASS
    - ✦ Parametry Zemli PZ-90.11
- Transformar as coordenadas do satélite no instante de transmissão no sistema de coordenadas final desejado antes do cálculo da posição do receptor.
  - ***Temos de conhecer os parâmetros de transformação!***

# Combinação de Múltiplos GNSS (4/6)

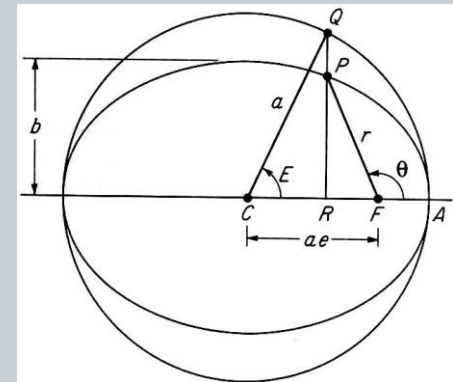


- **Informação orbital**
- Determinação da órbita do satélite (usando efemérides)
  - **Efemérides de GPS e Galileo**
    - ✦ Conjunto de parâmetros orbitais e respectivos factores de perturbação
    - ✦ Actualizadas a cada 2-4 horas

Parameters	
$t_{oe}$	$IDOT$
$e$	$C_{uc}, C_{us}$
$\sqrt{A}$	$C_{rc}, C_{rs}$
$\Omega_0$	$C_{ic}, C_{is}$
$i_0$	$\Delta\eta$
$\omega$	$\dot{\Omega}$
$M_0$	



Source: Bate



Source: Battin

# Combinação de Múltiplos GNSS (5/6)



## ○ Algoritmo

- ✦ Tempo desde o instante de referência das efemérides:

$$t_k = \begin{cases} t - t_{oe} - 604800, & \text{if } (t - t_{oe}) > 302400 \\ t - t_{oe} + 604800, & \text{if } (t - t_{oe}) < -302400 \\ t - t_{oe}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- ✦ Semi-eixo maior:  $A = (\sqrt{A})^2$
- ✦ Movimento angular médio corrigido:  $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}} + \Delta\eta$
- ✦ Anomalia média:  $M = M_0 + \eta t_k$
- ✦ Excentricidade:  $E = M + e \sin(E)$

- Anomalia verdadeira:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - e^2} \sin(E)}{\cos(E) - e}\right)$$

- Argumento de latitude:  $\phi = \theta + \omega$

- Argumento de latitude corrigido:

$$u = \phi + \delta u$$

$$\delta u = C_{uc} \cdot \cos(2\phi) + C_{us} \cdot \sin(2\phi)$$

- Raio orbital:  $r_0 = A(1 - e \cos(E))$

- Raio orbital corrigido:

$$r = r_0 + \delta r$$

$$\delta r = C_{rc} \cdot \cos(2\phi) + C_{rs} \cdot \sin(2\phi)$$

- Ângulo de inclinação corrigido:

$$i = i_0 + \delta i + IDOT \cdot t_k$$

$$\delta i = C_{ic} \cdot \cos(2\phi) + C_{is} \cdot \sin(2\phi)$$

- Longitude do nó ascendente corrigida:  $\Omega = \Omega_0 - \dot{\Omega}_e t + \dot{\Omega} t_k$

$$x = r (\cos(u) \cos(\Omega) - \sin(u) \cos(i) \sin(\Omega))$$

$$y = r \sin(u) \sin(\Omega) (1 + \cos(i))$$

$$z = r \sin(u) \sin(i)$$

# Combinação de Múltiplos GNSS (6/6)

- **Efemérides de GLONASS**

- Posição do satélite em PZ-90.11 no instante de referência  $T_b$ , a velocidade do satélite e a sua aceleração devida à atracção luni-solar. :

Parameters
$t_b$
$x_n(t_b), y_n(t_b), z_n(t_b)$
$x_n'(t_b), y_n'(t_b), z_n'(t_b)$
$x_n''(t_b), y_n''(t_b), z_n''(t_b)$

- Actualizadas a cada 30 min

- Integração de 6 equações diferenciais orbitais

- ✦ Método de quarta ordem Runge Kutta

$$\frac{dx}{dt} = v_x$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y$$

$$\frac{dz}{dt} = v_z$$

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{\mu}{r^3}x - \frac{3}{2}J_2^0\frac{\mu a_e^2}{r^5}x\left(1 - 5\frac{z^2}{r^2}\right) + \omega_e^2x + 2\omega_e v_y + X''$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -\frac{\mu}{r^3}y - \frac{3}{2}J_2^0\frac{\mu a_e^2}{r^5}y\left(1 - 5\frac{z^2}{r^2}\right) + \omega_e^2y - 2\omega_e v_x + Y''$$

$$\frac{dv_z}{dt} = -\frac{\mu}{r^3}z - \frac{3}{2}J_2^0\frac{\mu a_e^2}{r^5}z\left(3 - 5\frac{z^2}{r^2}\right) + Z''$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

# Estimativa da Posição (1/2)



- Algoritmo estimador: *Weighted Least Squares*

$$\hat{x} = \operatorname{argmin}_x \{(Z - H \cdot x)^T W (Z - H \cdot x)\} = (H^T W H)^{-1} H^T W \cdot Z$$

- Standard Point Positioning

- 1 Constelação

$$x = [x_R \quad y_R \quad z_R \quad c \cdot \delta t^{\text{Constellation}}]^T$$

$$Z = \begin{bmatrix} PR_R^1 - e_0^{1T} \cdot \bar{x}^1 + c \cdot \delta t^1 - c \cdot \delta t_R^{1,Trop} - c \cdot \delta t_R^{1,Iono} \\ PR_R^2 - e_0^{2T} \cdot \bar{x}^2 + c \cdot \delta t^2 - c \cdot \delta t_R^{2,Trop} - c \cdot \delta t_R^{2,Iono} \\ \vdots \\ PR_R^n - e_0^{nT} \cdot \bar{x}^n + c \cdot \delta t^n - c \cdot \delta t_R^{n,Trop} - c \cdot \delta t_R^{n,Iono} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0^1} & 1 \\ \frac{x_0 - x^2}{\rho_0^2} & \frac{y_0 - y^2}{\rho_0^2} & \frac{z_0 - z^2}{\rho_0^2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0^n} & 1 \end{bmatrix}$$

# Estimativa da Posição (2/2)

## ○ 3 Constelações

- ✦ Estimar os *offsets* do receptor relativos a cada escala de tempo
- ✦ Desvantagem: satélites adicionais são necessários

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^{1,GPS}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{1,GPS}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{1,GPS}}{\rho_0} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{x_0 - x^{2,GPS}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{2,GPS}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{2,GPS}}{\rho_0} & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^{n,GPS}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{n,GPS}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{n,GPS}}{\rho_0} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{x_0 - x^{1,GLONASS}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{1,GLONASS}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{1,GLONASS}}{\rho_0} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{x_0 - x^{2,GLONASS}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{2,GLONASS}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{2,GLONASS}}{\rho_0} & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^{m,GLONASS}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{m,GLONASS}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{m,GLONASS}}{\rho_0} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{x_0 - x^{1,Galileo}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{1,Galileo}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{1,Galileo}}{\rho_0} & 0 & 0 & 1 \\ \frac{x_0 - x^{2,Galileo}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{2,Galileo}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{2,Galileo}}{\rho_0} & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^{k,Galileo}}{\rho_0} & \frac{y_0 - y^{k,Galileo}}{\rho_0} & \frac{z_0 - z^{k,Galileo}}{\rho_0} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \left[ x_R \quad y_R \quad z_R \quad c \cdot \delta t^{GPS} \quad c \cdot \delta t^{GLONASS} \quad c \cdot \delta t^{Galileo} \right]^T$$

# Simulação de Galileo (1/3)



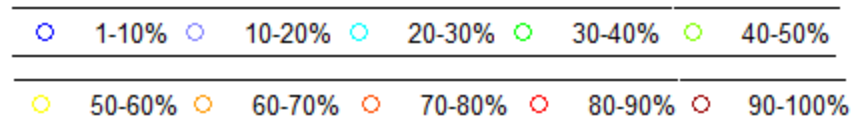
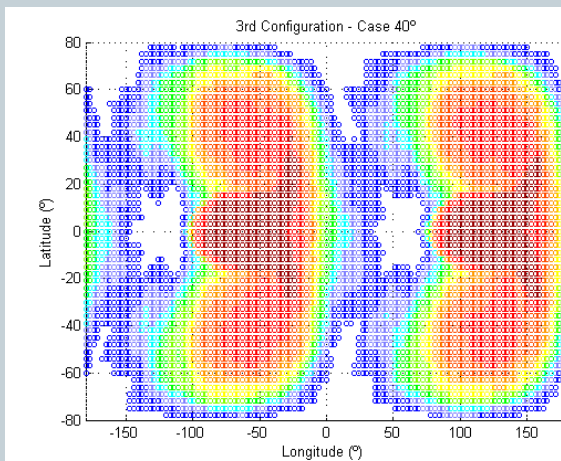
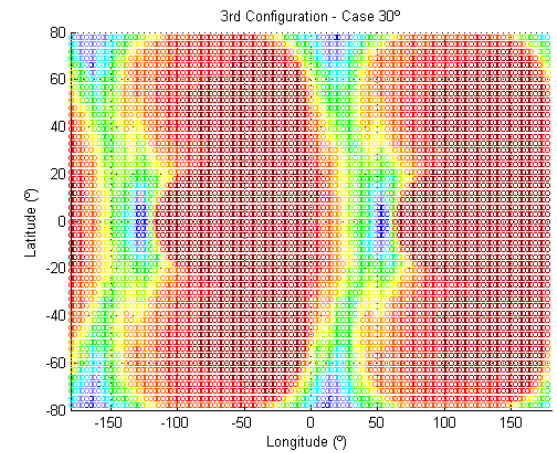
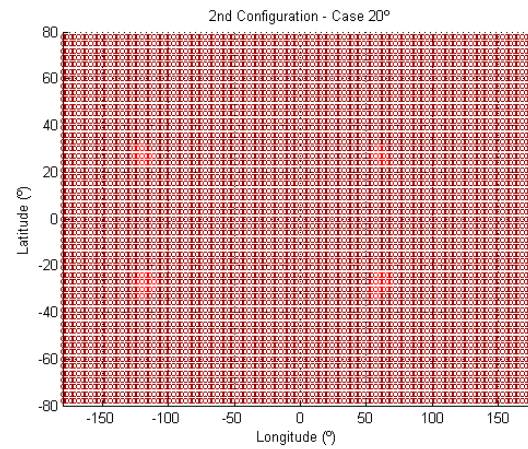
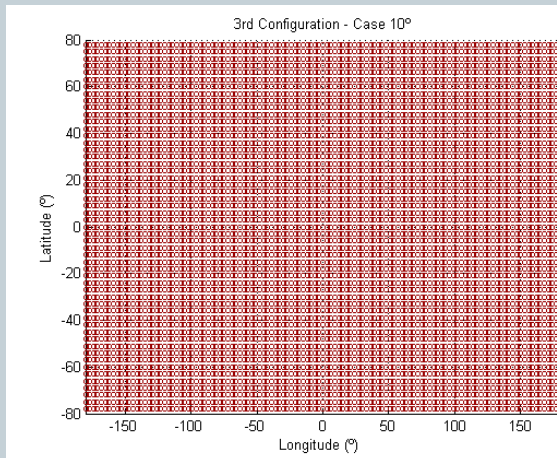
- Simulação da Órbita

- Aproximação a órbita circular
- 3 planos orbitais com 27 satélites operacionais
- Inclinação de 56 graus
- Semi-eixo maior igual a 29599.8 km

- *Offset na Anomalia Verdadeira de slots equivalentes que confere melhor disponibilidade de solução*

- *Offsets: 0, 5, 10, 15, 20 graus*

# Simulação de Galileo (2/3)



- Disponibilidade de solução com um offset de 13 graus considerando ângulos de máscara de 10, 20, 30 e 40 graus.



# Simulação de Galileo (3/3)

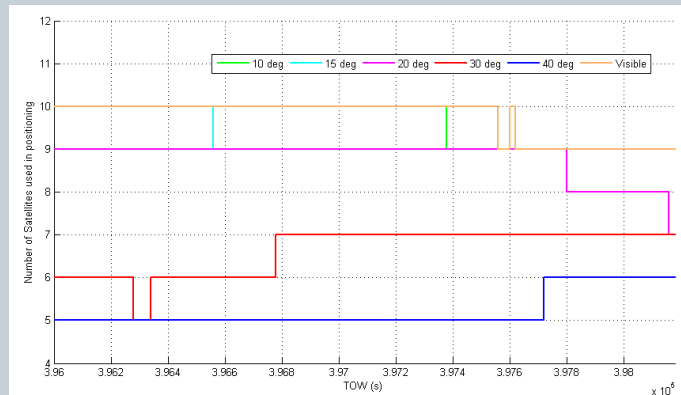


- Simulação das Pseudo-distâncias
  - Offset do relógio do satélite assumido como zero
  - Erros residuais e remanescentes modelados como:
    - ✦ Variáveis aleatórias Gaussianas
    - ✦ Valores típicos como desvio padrão

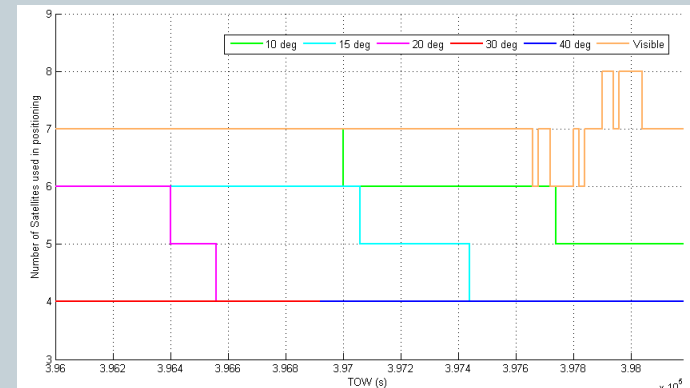
# Resultados e Conclusões (1/6)

- Disponibilidade

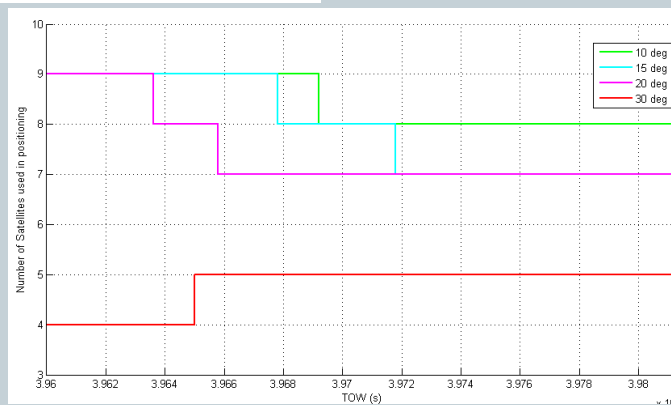
- Número mínimo de satélites visíveis (elevação superior a ângulo de máscara).



GPS

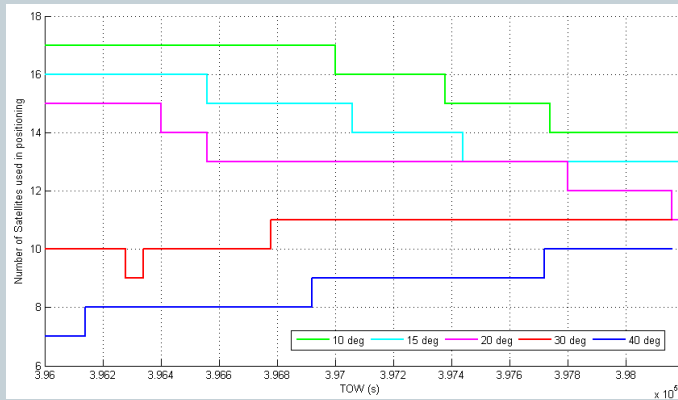


GLONASS

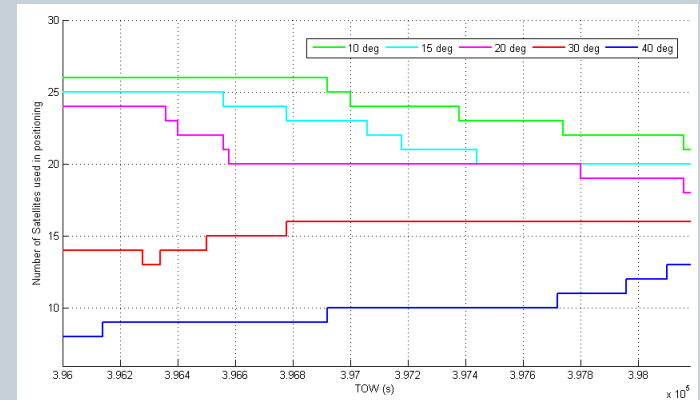


Galileo

# Resultados e Conclusões (2/6)



**GPS+GLONASS**



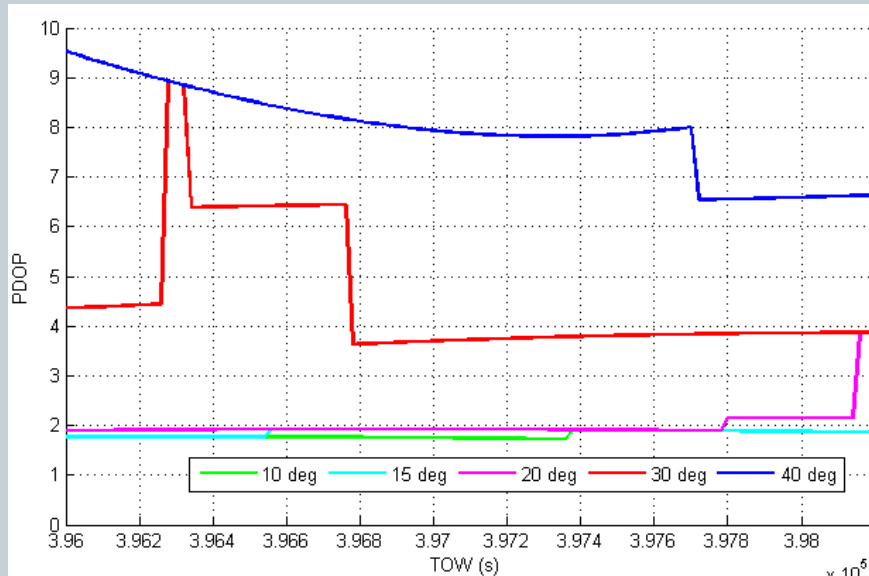
**GPS+GLONASS+Galileo**

Ângulo máscara	GPS	GLONASS	Galileo	GPS GLONASS	GPS GLONASS Galileo
10°	100%	100%	100%	100%	100%
15°	100%	100%	100%	100%	100%
20°	100%	100%	100%	100%	100%
30°	100%	100%	100%	100%	100%
40°	100%	57%	0%	100%	100%

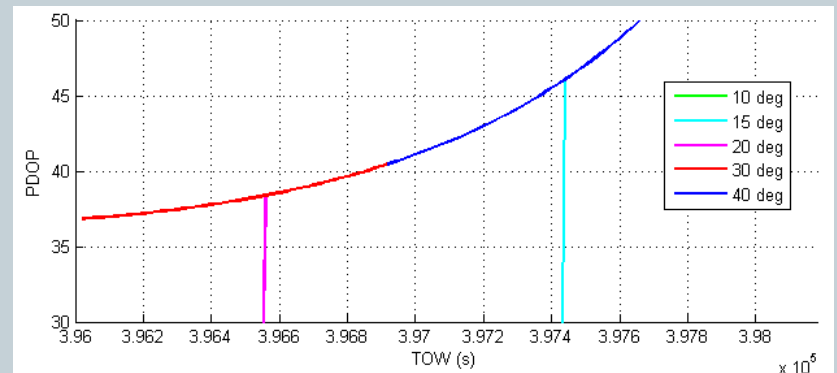
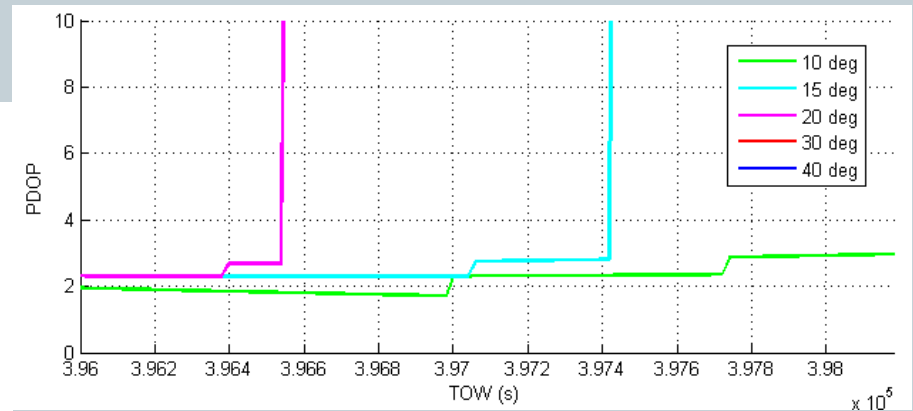
# Resultados e Conclusões (3/6)

## ● Diluição de Precisão (PDOP)

○ GPS+GLONASS



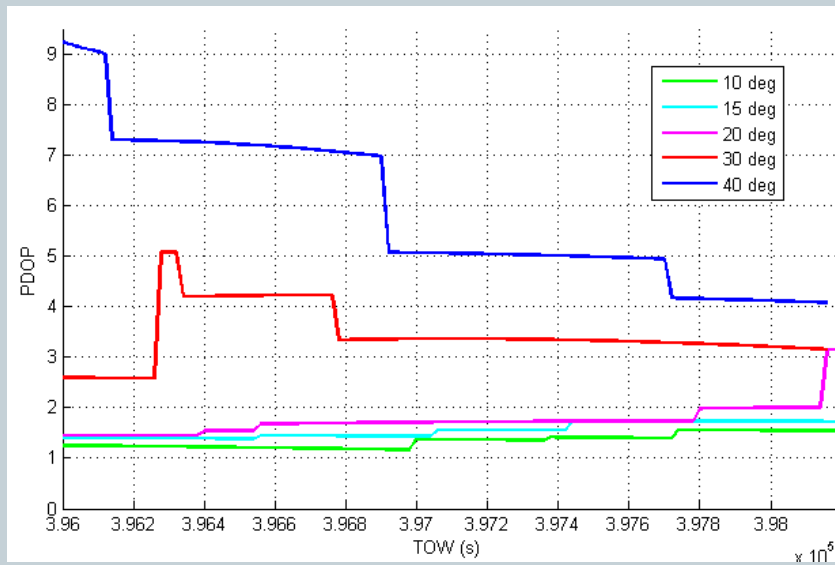
GPS



GLONASS

# Resultados e Conclusões (4/6)

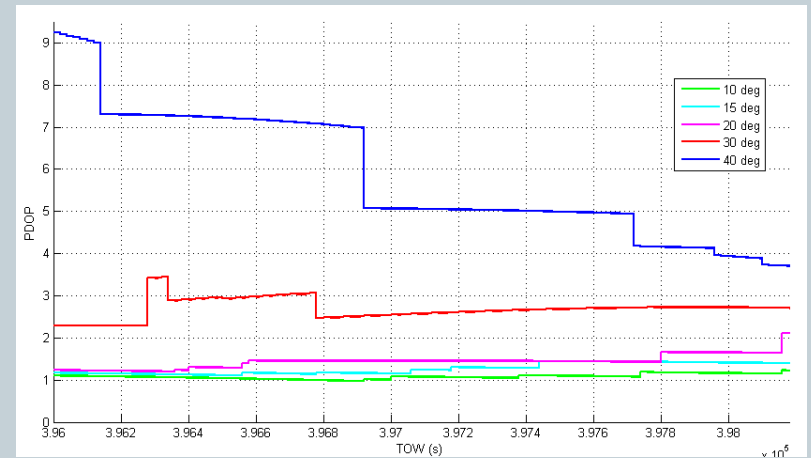
- Ganho relativo médio da combinação GPS+GLONASS



Em relação a	GPS	GLONASS
<b>10°</b>	25.905%	38.364%
<b>15°</b>	17.361%	59.176%
<b>20°</b>	13.142%	81.339%
<b>30°</b>	21.451%	92.067%
<b>40°</b>	26.973%	89.251%

# Resultados e Conclusões (5/6)

- GPS+GLONASS+Galileo
  - Ganho relativo médio



Em relação a	GPS	GLONASS	Galileo	GPS GLONASS
<b>10°</b>	40.106%	49.897%	57.276%	18.928%
<b>15°</b>	32.397%	67.075%	58.548%	18.324%
<b>20°</b>	27.265%	84.447%	57.204%	16.063%
<b>30°</b>	37.886%	93.874%	64.278%	21.071%
<b>40°</b>	27.518%	89.886%	-	0.633%

# Resultados e Conclusões (6/6)



- Exactidão e Precisão
  - Resultados para o ângulo de máscara de 10 graus

Erro (m)	GPS	GLONASS	GPS GLONASS	GPS GLONASS Galileo
$\mu_{horizontal}$	3.359	2.642	2.505	0.4387
$\sigma_{horizontal}$	2.028	1.543	0.876	0.259
$\mu_{vertical}$	-3.820	2.921	-2.305	0.252
$\sigma_{vertical}$	6.157	5.191	4.414	1.113

# Considerações Finais



- **Resolver os problemas de interoperabilidade:**
  - Sistemas de Tempo
  - Sistemas de Coordenadas
  - Determinação da órbita do satélite
  
- **Combinação de GPS, GLONASS e Galileo:**
  - Melhor disponibilidade
  - Geometrias mais favoráveis
  - Estimativas mais exactas e precisas
  - Mais significativo para ângulos de máscara severos





# QUESTÕES E DISCUSSÃO