

# Sistema de Posicionamento Global

**Carlos ANTUNES**

cmantunes@fc.ul.pt



Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

<http://www.fc.ul.pt>

Engenharia Geográfica

<http://enggeografica.fc.ul.pt>

Sistema GPS

1/36

C. Antunes - FCUL

# Sistema de Posicionamento Global

TÉCNICA DE  
POSICIONAMENTO

POSICIONAMENTO

SISTEMA DE  
REFERÊNCIA

ABSOLUTO

RELATIVO

Sistema GPS

2/36

C. Antunes - FCUL



## GPS – Global Position System

O **Sistema de Posicionamento Global** (NAVSTAR GPS – NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System) foi criado e desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD).

✓ **Qual o Objectivo?**

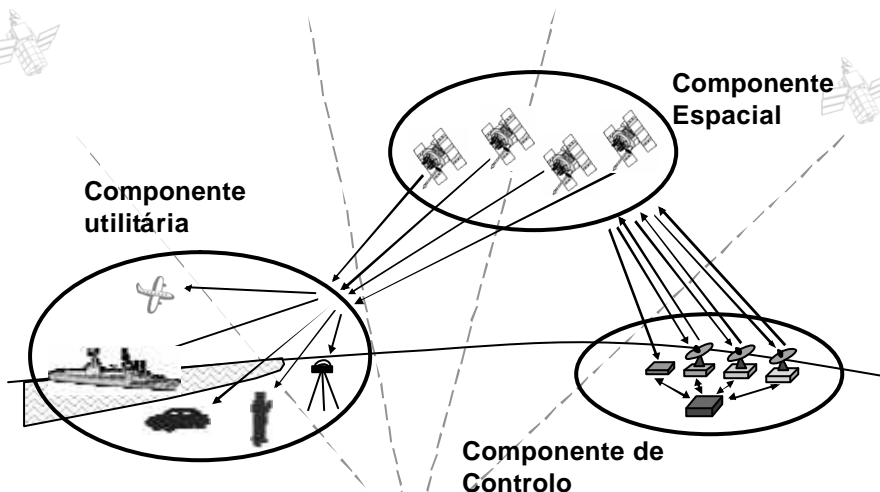
Garantir tempo e navegação de precisão (posição, velocidade e direcção) continua e global, em tempo real e sob quaisquer condições atmosféricas.

✓ **Quando apareceu?**

- 1960 – F.A.E.U.A. e a NASA desenvolvem o sistema TRANSIT;
- 1967 – Inicia-se a 1ª aplicação do sistema no campo da geodesia;
- 1974 – DoD melhora o sistema e avança com o actual sistema GPS;
- 1978 – Foi lançado o primeiro satélite do GPS;
- 1983 – É feita a primeira aplicação no campo da geodesia;
- 1995 – O sistema fica completamente operacional (com 24 satélites).



## Constituição do Sistema

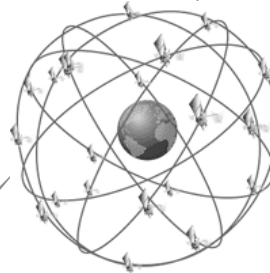
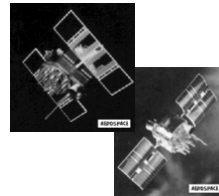




## Componente Espacial



- ✓ **24 satélites** dos blocos II, IIA e IIR distribuídos por **6 órbitas**;
- ✓ **órbitas** aproximadamente circulares com raio de cerca 26 600 km, separadas entre si de 60° em longitude;
- ✓ **período orbital** de 12 horas siderais ( $\approx 11\text{h } 58\text{min } 26\text{s UTC}$ ), que faz com que o nascimento dos satélites se dê cerca de 4 min mais cedo em cada dia;
- ✓ **inclinação orbital** próxima dos 55°, relativamente ao plano equatorial terrestre.



## Componente Espacial



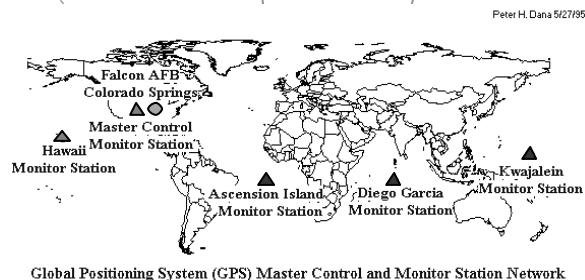
Série	SVNs	Nº satélites activos	Datas de lançamento	Tempo de vida (anos)
Bloco I	1 - 11	desactivados	Fev 78 e Out 85	5
Bloco II	13 - 21	4	Fev 89 e Out 90 (5 satélites desactivados SVNs 14, 16, 18-20)	7.3
Bloco IIA	22 - 40	18	Nov 90 a Nov 97 (1 satélite desactivado SVN 28)	7.3
Bloco IIR	41 - 62	6	Jan 97 (lançamento do SVN 42 mal sucedido, último lançamento do SVN 54 em Jan 01)	7.8
Bloco IIF	?	-	a partir de 2001 (satélites de quarta geração)	12.7



## Componente de Controlo

### É composta por:

- ✓ 1 estação principal de controlo (Colorado Springs);
- ✓ 5 estações de monitorização ou rastreio de satélites, 3 das quais são também estações transmissoras (Ascension, Diego Garcia e Kwajalein).



Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network



## Componente de Controlo

### Funções:

- ✓ Verificar o funcionamento dos satélites;
- ✓ Calcular as órbitas dos satélites para uma dada época;
- ✓ Sincronizar os relógios dos satélites com o tempo GPS;
- ✓ Determinar parâmetros ionosféricos;
- ✓ Controlar as manobras de substituição e de correcção das órbitas;
- ✓ Actualizar a mensagem de navegação;
- ✓ Enviar os dados necessários aos satélites.

Os dados recolhidos nas **estações de monitorização** são enviados para a **estação principal** onde são efectuados os cálculos necessários à actualização da mensagem de navegação. Os dados actualizados são enviados periodicamente para as **estações de transmissão** que posteriormente os enviam para os satélites.



## Componente Utilitária



A **componente do utilizador** é constituído pelos **receptores GPS** que recebem, descodificam e processam os sinais emitidos pelos satélites



a partir dos quais se faz o **cálculo da posição, velocidade e tempo do utilizador.**



Sistema GPS

9/36

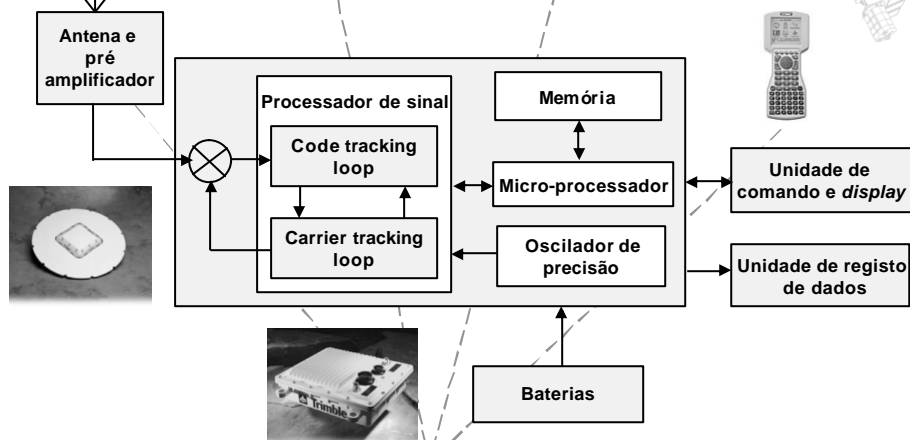
C. Antunes - FCUL



## Componente Utilitária



Principais componentes de um receptor



Sistema GPS

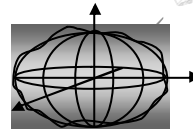
10/36

C. Antunes - FCUL



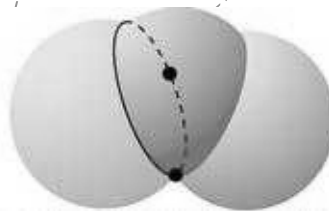
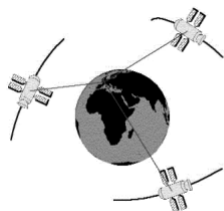
## Sistema de Referência Geodésico – WGS84

- ✓ WGS84 – *World Geodetic System* de 1984, é o sistema de referência geodésico associado ao sistema GPS.
- ✓ *Datum* Global:  $e^2 = 0.00669437999013$   
 $a = 6378137 (\pm 2m)$   
origem = C.M. da Terra  
orientação:  $\Delta W_1 = 0, \Delta W_2 = 0, \Delta W_3 = 0$
- ✓ Coordenadas cartesianas (X,Y,Z)  $\leftrightarrow$  coordenadas geodésicas ( $\varphi, \lambda, h$ )
- ✓ Qualquer receptor processa os dados sempre em WGS84, podendo proceder à *posteriori* a qualquer transformação de coordenadas para outro sistema.



## Princípio básico do Posicionamento GPS

- ✓ As coordenadas de um ponto na Terra são obtidas através de medição das distâncias desse ponto a vários satélites (mínimo 3).
- ✓ Essas distâncias correspondem aos raios de esferas centradas na posição instantânea dos satélites e que se intersectam no ponto ocupado pelo receptor.

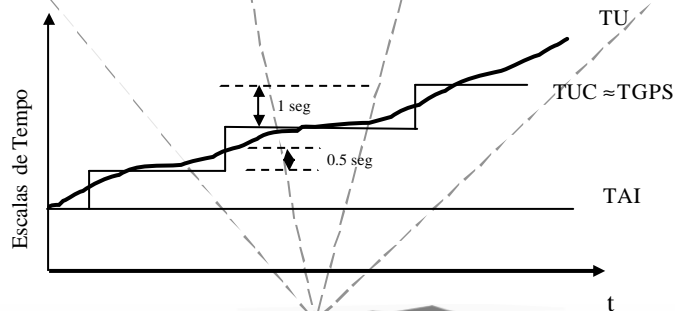




## Escala de Tempo GPS



- ✓ Tempo atómico utilizado para a sincronização dos relógios do sistema;
- ✓ Gerado por 2 relógios atómicos na Estação Principal de Controlo;
- ✓ Difundido pelos satélites GPS que estão munidos de relógios atómicos
- ✓  $\neq$  UTC actual de  $\approx 1.5$  ns (época comum: 0h de 1 Jan 1980)



Sistema GPS

13/36

C. Antunes - FCUL



## Estrutura do Sinal GPS



O sinal GPS é constituído pelos seguintes elementos, formados a partir de um sinal base com frequência fundamental  $f_0 = 10.23$  MHz:

- ✓ **Ondas portadoras**
  - L1 (Link 1) de frequência  $f_{L1} = 150 f_0 = 1575.42$  MHz ( $\lambda = 19.05$  cm);
  - L2 (Link 2) de frequência  $f_{L2} = 120 f_0 = 1227.60$  MHz ( $\lambda = 24.45$  cm);
- ✓ **Códigos PRN**
  - C/A (*Coarse Aquisition* ou *Clear Access*) código PRN de 1023 dígitos binários;
  - P (*Precise* ou *Protected*) código PRN de  $2.34 \times 10^{14}$  dígitos binários, sequência de período de 267 dias de duração, divididos em 7 dias, com reinicialização às 0h de domingo;
  - D (*Navigation Message*) código de 1500 dígitos binários.



Sistema GPS

14/36

C. Antunes - FCUL



## Códigos PRN

Os sinais GPS resultam da modulação de um código binário PRN (*Pseudo Random Noise* ou Ruído Pseudo-Aleatório).

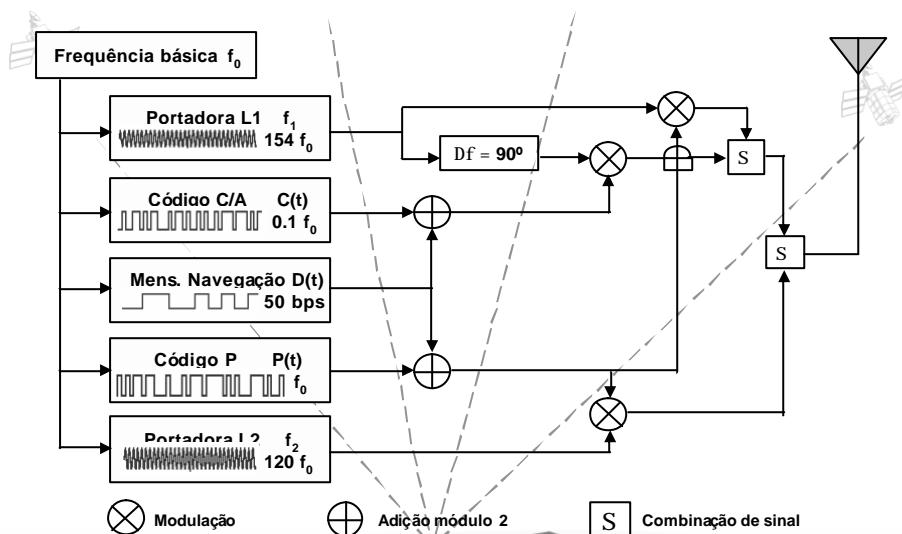
	frequência	modulado em	comp. de onda
P ( <i>Precise</i> )	$f_0 = 10.23 \text{ MHz}$	L1* e L2	30 m
C/A ( <i>Coarse Acquisition</i> )	$f_0/10 = 1.023 \text{ MHz}$	L1	300 m
D ( <i>Navigation Message</i> )	50 Hz	L1 e L2	6 km

\* modulado em quadratura de fase com o código CA, i.e., separados de  $90^\circ$  em fase

A Mensagem de Navegação (código D) contém efemérides, tempo UTC, n.º da semana GPS, correcção aos relógios dos satélites e outras informações.



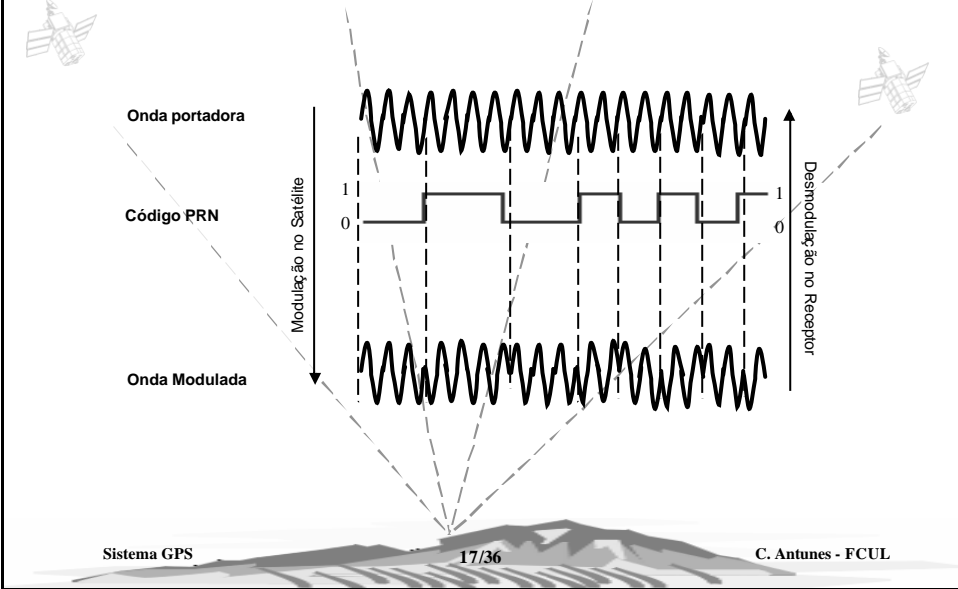
## Formação do Sinal





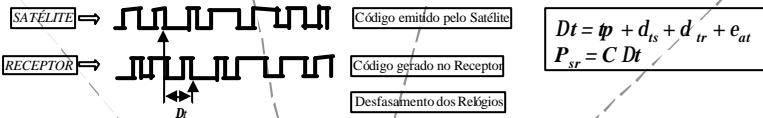


# Modulação do Sinal

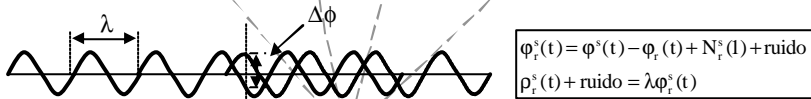


# Observáveis do GPS

**Pseudo-distância** – tempo de percurso do sinal, desde o satélite até ao receptor, medida a partir do desfasamento do código PRN e convertida em distância.



**Fase de batimento da onda portadora** – diferença de fase entre a fase do sinal gerado no receptor e a fase do sinal proveniente do satélite.



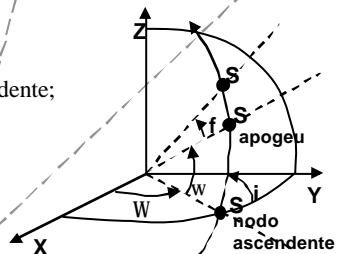


## Efemérides Radiodifundidas

- ✓ são constituídos pelos elementos de **órbita kepleriana e suas perturbações**,
- ✓ são determinadas na estação principal de controlo, com base nos dados de rastreio das estações monitoras.
- ✓ são difundidos na mensagem de navegação
- ✓ permitem calcular as **posições geocéntricas (x, y, z) dos satélites no sistema WGS 84**.

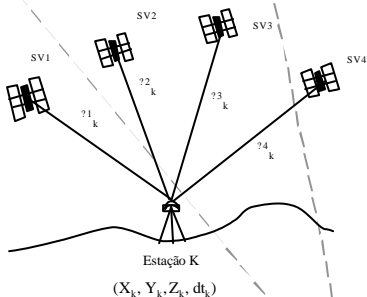
### Elementos Keplerianos:

- ✓  $\Omega$ , ascensão recta do nodo ascendente;
- ✓  $\omega$ , argumento do perigéu;
- ✓ inclinação,  $i$
- ✓ semi-eixo maior,  $a$ ;
- ✓ excentricidade,  $e$ ;
- ✓ anomalia verdadeira,  $f$ .

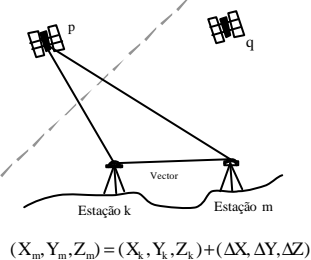


## Posicionamento GPS

### Absoluto (1 receptor)



### Relativo/diferencial (2 ou mais receptores)





## Posicionamento Absoluto

A **pseudo-distância** é dada por :  $P_k^p = Dt_k^p \times C$   
 $[tp - dt_k - dt^p] \times C = r_k^p + e_a$

Considerando:  $r_k^p = \sqrt{(X^p - X_k)^2 + (Y^p - Y_k)^2 + (Z^p - Z_k)^2}$   
 $e_a$  e  $dt^p$  insignificantes

Para  $p=1,4$  satélites temos um sistema de 4 equações a 4 incógnitas:

$$\hat{P}_k^1 = \sqrt{(X^1 - X_k)^2 + (Y^1 - Y_k)^2 + (Z^1 - Z_k)^2} + Cdt_k$$

$$\hat{P}_k^2 = \sqrt{(X^2 - X_k)^2 + (Y^2 - Y_k)^2 + (Z^2 - Z_k)^2} + Cdt_k$$

$$\hat{P}_k^3 = \sqrt{(X^3 - X_k)^2 + (Y^3 - Y_k)^2 + (Z^3 - Z_k)^2} + Cdt_k$$

$$\hat{P}_k^4 = \sqrt{(X^4 - X_k)^2 + (Y^4 - Y_k)^2 + (Z^4 - Z_k)^2} + Cdt_k$$

A resolução deste sistema permite determinar as coordenadas e o erro do relógio do receptor k.



## Factores DOP

Factor de degradação de precisão (DOP - *Dilution of Precision*)

$$DOP = \frac{\sigma}{\sigma_0} \begin{cases} \text{VDOP} - \text{factor de precisão vertical} \rightarrow \sigma_H / \sigma_0 \\ \text{HDOP} - \text{factor de precisão horizontal} \rightarrow \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_P^2} / \sigma_0 \\ \text{PDOP} - \text{factor de precisão da posição} \rightarrow \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_P^2 + \sigma_H^2} / \sigma_0 \\ \text{TDOP} - \text{factor de precisão do tempo} \rightarrow \sigma_I / \sigma_0 \\ \text{GDOP} - \text{factor de precisão global} \rightarrow \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_P^2 + \sigma_H^2 + \sigma_I^2} / \sigma_0 \end{cases}$$

DOPS's pequenos  $\Leftrightarrow$  boa intersecção, boa precisão de posicionamento

Muitos satélites  $\Rightarrow$  baixos DOP's

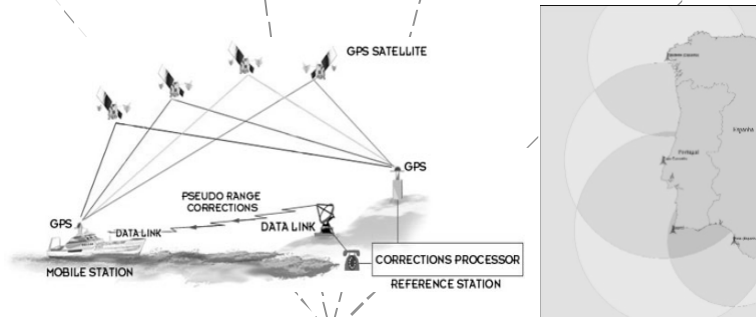


# GPS Diferencial



O GPS diferencial é constituído por 3 componentes principais:

- ✓ estação de referência;
- ✓ estação móvel;
- ✓ sistema de comunicação e transferência de dados (*data link*).



Sistema GPS

23/36

C. Antunes - FCUL

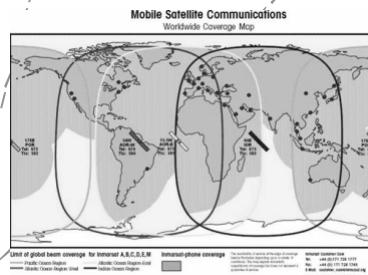
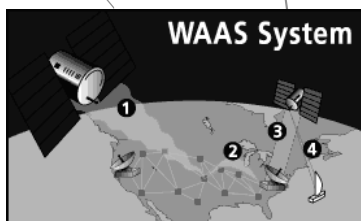


# Sistemas WAAS, EGNOS e MSAS



Sistemas auxiliares que permitem corrigir e melhorar o posicionamento:

- ✓ estações de referência em terra que determinam as correções;
- ✓ central de controlo e comunicação;
- ✓ satélites geoestacionário que difundem as correções via sinal GPS.



Sistema GPS

24/36

C. Antunes - FCUL



## Precisão do Posicionamento



- ✓ Absoluto c/ AS: **50 m** (em desuso desde 2000)
- ✓ Absoluto s/ AS: **5 m**
- ✓ Com sistema WAAS: **1.5 a 3m**
- ✓ Diferencial de curta distância: **0.8 a 1.5 m ± 50ppm**
- ✓ Relativo c/ fase da portadora: **1mm ± 1ppm a 15 cm**

Taxa mínimo de registo: 0.2 a 1 seg

Taxa padrão: c/ código – 1,2 ou 5 seg

c/ fase – 5, 15 ou 30 seg

Período de observação: c/ código – 5 seg a 1 min

c/ fase – 10 min a 24 h



## Vantagens & Desvantagens



- ✓ Funciona sob quaisquer condições atmosféricas
- ✓ Não necessita de inter visibilidade entre os pontos (só para relativo)
- ✓ Alcance quase ilimitado com cobertura global
- ✓ Funciona a qualquer hora do dia
  
- ✓ Necessita de perfeita inter visibilidade com os satélites acima do horizonte (sem ocultações)
- ✓ 4 satélites no mínimo
- ✓ Interferências com sinais electromagnéticos
- ✓ Dificuldades de funcionamento em zonas muito arborizadas e edificadas



## Aplicações



✓ Navegação



Sistema GPS

27/36

C. Antunes - FCUL



## Aplicações



- ✓ Geodesia
- ✓ Topografia
- ✓ Hidrografia
- ✓ Cartografia Digital
- ✓ SIG's
- ✓ Etc.



Sistema GPS

28/36

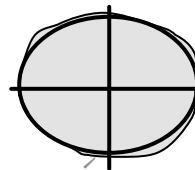
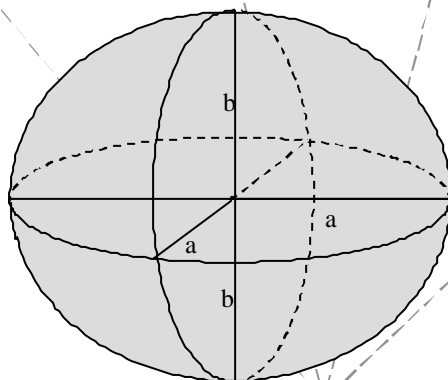
C. Antunes - FCUL



## Elipsóide de Revolução

### Forma da Terra

- ✓ O elipsóide de revolução é a forma geométrica que mais se aproxima à forma irregular da terra.



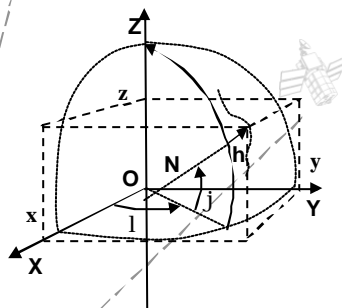
a - semi-eixo maior  
b - semi-eixo menor



## Coordenadas WGS84

### Geodésicas

- j - latitude:** ângulo entre a Normal ao elipsóide no ponto P e o plano do equador;
- l - longitude:** ângulo rectilíneo entre o meridiano internacional de referência e o meridiano do ponto P;
- h - altitude:** distância medida sobre a normal ao elipsóide do ponto P, desde a superfície do elipsóide até à superfície topográfica.



### Rectangulares ou cartesianas

- X:** distância OX medida sobre o eixo equatorial que intersecta o meridiano de referência das longitudes, desde a origem O até ao respectivo ponto de projecção;
- Y:** distância OY medida sobre o eixo equatorial perpendicular ao plano do meridiano de referência das longitudes, desde a origem O até ao respectivo ponto de projecção;
- Z:** distância OZ medida sobre o eixo de revolução (paralelo ao ERT), desde a origem O até ao respectivo ponto de projecção.



## Transformação entre Coordenadas WGS84

### Rectangulares ® Geodésicas

$$I_p = \arctg\left(\frac{y_p}{x_p}\right)$$

$$j_p = \arctg\left(\frac{z_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2} \left(1 + \frac{e^2 N \operatorname{sen} j}{z_p}\right)}\right)$$

$$h_p = \frac{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}}{\cos j} - N$$

$$\text{com } N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \operatorname{sen}^2 j}}$$

### Geodésicas ® Rectangulares

$$x_p = (N + h_p) \cos j_p \cos I_p$$

$$y_p = (N + h_p) \cos j_p \sin I_p$$

$$z_p = [N(1 - e^2) + h_p] \sin j_p$$



## Transformação entre diferentes Sistemas

### Transformação de HELMERT (com rotação dos eixos)

$$X_2 = (1 + a)(X_1 + qY_1 - yZ_1) + DX$$

$$Y_2 = (1 + a)(-qX_1 + Y_1 + gZ_1) + DY$$

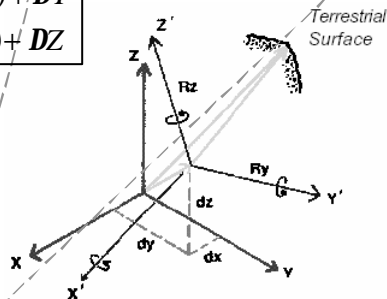
$$Z_2 = (1 + a)(yX_1 - gY_1 + Z_1) + DZ$$

### 7 Parâmetros de Transformação:

(DX, DY, DZ) - Translações

(g, y, q) - Rotações

(a) - Factor de Escala







# Transformação entre diferentes *Sistemas*

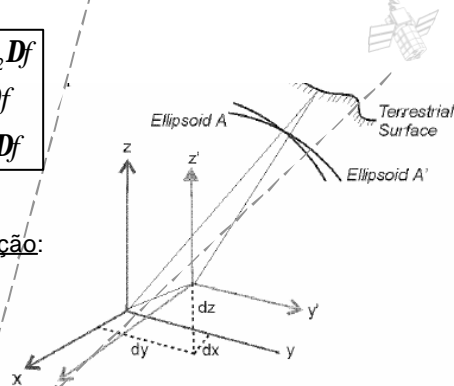
## Transformação de MOLODENSKY (sem rotação dos eixos)

$$\begin{aligned} X_2 &= X_1 + DX + c_1 Da + c_2 Df \\ Y_2 &= Y_1 + DY + c_3 Da + c_4 Df \\ Z_2 &= Z_1 + DZ + c_5 Da + c_6 Df \end{aligned}$$

### 5 Parâmetros de Transformação:

(*DX, DY, DZ*) - Translações

(*Da, Df*) - Factor de Escala



# Parâmetros de Transformação

## Transformação de HELMERT ou Bursa-Wolf

WGS84 para:	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)	Rx (")	Ry (")	Rz (")	Escala (ppm)
Datum Lx	+282.09	+72.19	-119.95	-1.529	+0.145	-0.890	+4.458
Datum 73	+231.03	-102.615	-26.836	+0.615	-1.98	+0.881	-1.786

## Transformação de MOLODENSKY

WGS84 para:	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)	$\Delta a$ (m)	$\Delta f$
Datum Lx	+304.05	+60.58	-103.64	+251	+1.4192702x10 <sup>-5</sup>
Datum 73	+223.24	-110.19	-36.65	+251	+1.4192702x10 <sup>-5</sup>



## Parâmetros de Projecção Cartográfica



### Sistema Hayford-Gauss

	$\varphi_0$	$\lambda_0$	Escala (ppm)	Falso M (m)	Falso P (m)
Datum Lx	39° 40' 0.000"	-8° 7' 54.862"	1.0	0	0
Militares	39° 40' 0.000"	-8° 7' 54.862"	1.0	+200000	+300000
Datum 73	39° 40' 0.000"	-8° 7' 54.862"	1.0	+180.6	-86.9

Projecção: Transversa Mercator

Elipsóide: Internacional

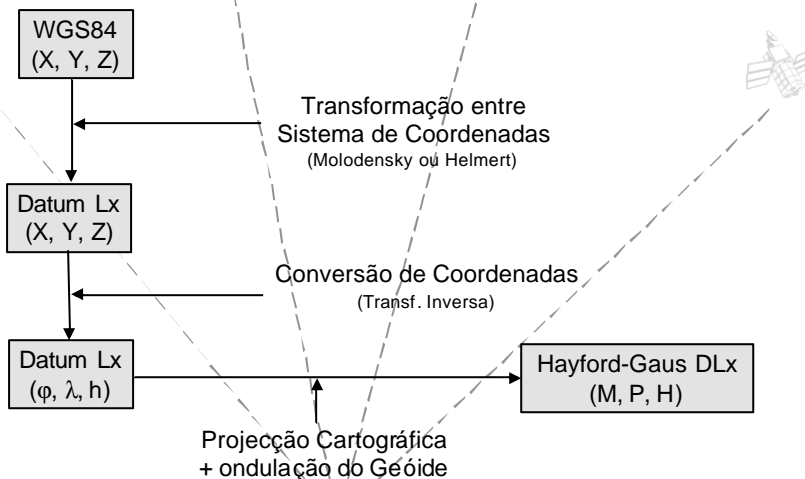
Sistema GPS

35/35

C. Antunes - FCUL



## Transformação WGS84 - DLx



Sistema GPS

36/36

C. Antunes - FCUL