

CAPÍTULO 3 – GEODÉSIA

"Geodésia é o ramo da matemática aplicada que determina, por meio de observações e medições, a exata posição de pontos, figuras e áreas de grandes porções da superfície terrestre, a forma e o tamanho da Terra e as variações da gravidade terrestre." [USA - *Committee on Geodesy, The National Research Council*, 1978, IBGE, 1998].

Desenvolvida no oriente médio, com o objetivo de levantar e dividir as propriedades em parcelas, tinha como usuários agrimensores romanos, os quais utilizavam fórmulas para o cálculo das áreas, geralmente empíricas, as quais podem ser encontradas nos livros gregos de Heron de Alexandria, que inventou a dioptra, primeiro instrumento geodésico de precisão, que também permitia o nivelamento, aumentando a série dos instrumentos geodésicos então existentes, como a mira e a trena, entre outros. A idéia de uma Terra esférica foi predominante entre os Gregos. Havia uma preocupação na época de determinar seu tamanho. Platão estimou a circunferência da Terra como sendo de umas 40000 milhas (64360 Km). Arquimedes estimou em 30000 milhas (48270 Km). Mas eram valores meramente especulativos. Eratóstenes, no século II a.C, determinou o tamanho da Terra usando medidas objetivas. Ele notou que no dia do solstício de verão os raios solares atingiam o fundo de um poço em Siena (atual Assuan, no Egito) ao meio dia (Figura 3.1). No mesmo instante, contudo, o Sol não estava exatamente no zênite na cidade de Alexandria, a norte de Siena; o Sol projetava uma sombra tal que ele pôde determinar o ângulo de incidência de seus raios: $7^{\circ} 12'$, correspondendo a $1/50$ de um círculo. Conhecido o arco de circunferência entre as duas cidades, ou seja, a distância entre elas, Eratóstenes pode então estimar a circunferência do globo. Como a distância era de aproximadamente 500 milhas = 804,500 Km (na direção norte-sul), a Terra teria $50 \times 500 = 25000$ milhas (40225 Km) de circunferência. Este é um valor bastante próximo do raio equatorial terrestre, 24901 milhas (40066 Km), valor adotado no World Geodetic System 1984 (WGS-84) (sessão 5.1).

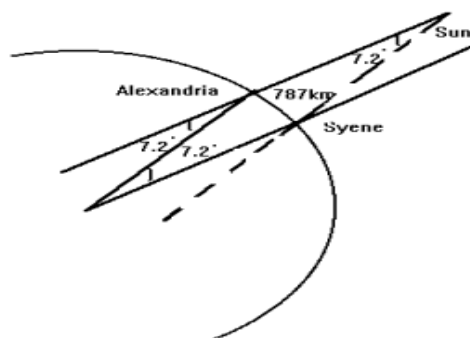


Figura 3.1 - O experimento de Eratóstenes

Na antiguidade, Hiparco, considerado pai da astronomia e trigonometria, foi o primeiro a propor o uso de duas coordenadas para definir um lugar no globo, determinando a latitude em um lugar sobre um meridiano e a longitude em um lugar sobre um paralelo. O cálculo da latitude era relativamente fácil e obtido com um instrumento conhecido como Astrolábio Planisférico, o qual era composto por um disco graduado contendo várias lâminas circulares graduadas à superfície das suas margens, as quais, através da alidade, linha definidora da medida, determinavam a altura dos astros, cada lâmina servindo para uma latitude [Associação Nacional de Cruzeiros, Lisboa, Portugal, 2001]. A longitude era grosseiramente obtida através do método da estima, que era a resultante do rumo do navio, da velocidade do mesmo (estimada pela experiência dos pilotos) e do tempo percorrido (medido por ampulhetas). Estas dificuldades, porém, só existiam no mar, onde não existem quaisquer referências a não ser os astros, e estes ainda móveis. Em termos de orientação em terra, não havia grandes problemas, uma vez que os pontos de referência se mantinham fixos.

Assim como Hiparco, Heron e Ptolomeu também determinavam a longitude geográfica observando eclipses lunares, no mesmo instante, em dois pontos cuja distância já era conhecida por medições. Estes métodos foram transferidos para a Idade Média através dos livros dos Agrimensores romanos e pelos Árabes, que também usavam o Astrolábio, o Quadrante e o Bastão de Jacobo (instrumentos de navegação), para tarefas geodésicas. Dentre os instrumentos de Geodésia, a partir do século XIII, encontra-se também a bússola.

Em 1617, quando o holandês W.Snellius inventou a triangulação para o levantamento de grandes áreas como regiões ou países, uma nova era da Geodésia estava começando. Tanto que nesta época, a Geodésia foi redefinida como “a ciência e tecnologia da medição e da determinação da figura terrestre”. Quando foi realizada uma medição de arco no sul de Paris, por J. Picard, uma disputa científica sobre a geometria da Terra se iniciava. O elipsóide de revolução, achatado nos polos, foi definido por Newton em 1687 e de Huygens em 1690. A forma de um elipsóide combinou também com algumas observações antes inexplicáveis, o atraso de um relógio pendular em Cayenne, calibrado em Paris, observado por J.Richter em 1672, ou o fato do pêndulo do segundo, cujo comprimento aumentava, quando aproximava-se da linha do equador. A “Académie des sciences” de Paris mandou realizar medições de arcos meridianos em duas diferentes altitudes do globo e também a re-medição do arco de Paris, que tinham como único objetivo a confirmação da tese de Newton e Huygens, onde foram aplicados os últimos conhecimentos da astronomia e os métodos mais modernos de medição da época, confirmando-se o achatamento do globo terrestre, e com isso, o elipsóide de revolução como figura matemática e primeira aproximação na geometria da Terra.

Em 1743, Clairaut publicou os resultados na sua obra clássica sobre a Geodésia. Nos anos seguintes a base teórica da Geodésia foi aperfeiçoada, em primeiro lugar por d'Alembert (Determinação do Achatamento da Terra através da Precessão e Nutação) e também por Laplace, que determinou o achatamento unicamente através de observações do movimento da Lua, tomando em conta a variação da densidade da Terra. O desenvolvimento do Cálculo de Probabilidades [Laplace, 1818] e do Método dos Mínimos Quadrados [Gauss, 1809] aperfeiçoaram a retificação de observações e melhoraram os resultados das triangulações. O século XIX começou com o descobrimento de Laplace, de que a figura física da Terra seria diferente do elipsóide de revolução, comprovado pela observação de desvios da vertical como diferenças entre latitudes astronômicas e geodésicas. Em 1873, J.B.Listings usou, pela primeira vez, o nome Geóide para a figura física da Terra. O final do século foi marcado pelos grandes trabalhos de medições de arcos meridianos dos geodestas junto com os astrônomos, para determinar os parâmetros dos elipsóides que tivessem a melhor aproximação com a Terra física. Os elipsóides mais importantes eram os de Bessel (1841) e de Clarke (1866 e 1880).

A Geodésia recebeu novos impulsos através do envolvimento com a computação, o que facilitou o ajustamento de redes continentais de triangulação, e dos satélites artificiais para a medição de redes globais de triangulação e para melhorar o conhecimento sobre o Geóide. H.Wolf descreveu a base teórica para um modelo livre de hipóteses de uma Geodésia tridimensional que, em forma do *World Geodetic System* 1984 (WGS-84), facilitou a definição de posições, medindo as distâncias espaciais entre vários pontos através do Global Positioning System (GPS) causando com isso, o fim da triangulação e também uma fusão entre essa nova Geodésia e a tradicional Topografia. [Enciclopédia geodésica, UFSC, 2003].

3.1 A FIGURA DA TERRA

Em 528 a.C., Pitágoras conceituou a Terra, como sendo um planeta de forma esférica. Uma estrela entre as estrelas onde todas se moviam em torno de um fogo central. Realmente, para um observador a uma distância muito grande da Terra, este, poderia vê-la como um ponto, mas à medida em que aproxima-se, esta poderia ter o formato de uma esfera, tal como dito por Pitágoras. Depois de sua teoria, várias outras foram surgindo no intuito de definir o formato e as dimensões do nosso planeta. Como a superfície terrestre sofre freqüentes alterações devido à natureza (movimentos tectônicos, condições climáticas, erosão, etc.) e a ação do homem, esta não serve bem para definir a forma da Terra. O matemático alemão Carl Friedrich Gauss, introduziu o conceito de que a forma da Terra seria a de um Geóide, que corresponderia à superfície equipotencial do campo da gravidade da Terra coincidente com as

superfícies imperturbadas dos oceanos e que se prolonga por sob os continentes de modo tal que a direção do campo da gravidade lhe é sempre perpendicular, e também sendo uma superfície de referência para a determinação das altitudes.

A superfície terrestre possuindo diferentes materiais em sua composição faz com que a força gravitacional atue com maior ou menor intensidade em diferentes locais. As águas dos oceanos procurando uma situação de equilíbrio, ajustam-se às forças que atuam sobre elas, inclusive no seu suposto prolongamento. A interação de forças buscando o equilíbrio faz com que o geóide tenha o mesmo potencial gravimétrico em todos os pontos de sua superfície.

Por razões de ordem prática, modelos com formas regulares foram adotados como superfície de referência da Terra. Modelo como uma Elipse, que achatada nos polos, corresponde a uma figura geométrica, que no giro em torno do seu semi-eixo menor forma um volume, o qual é chamado de Elipsóide de Revolução (figura 3.2). Muitos foram os intentos realizados para calcular as dimensões do elipsóide que mais se aproxima-se da forma real da Terra, e muitos foram os resultados obtidos (apêndice A). Sendo a forma geométrica regular que mais se aproximava da forma da Terra, o Elipsóide de Revolução foi utilizado como modelo para o cálculos de distâncias, azimutes e posições.

A forma e tamanho de um Elipsóide, bem como sua posição relativa ao geóide, define um Sistema Geodésico [IBGE, 1998].

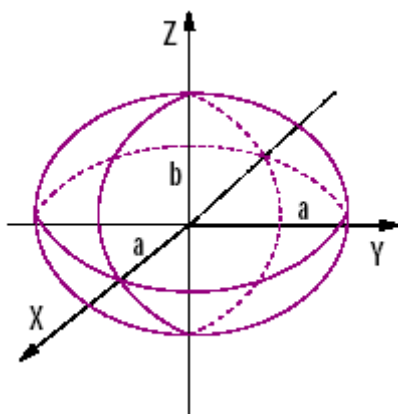


Figura 3.2 - Elipsóide de revolução achatado

$$a > b$$

$$\text{Achatamento} > 0$$

Fonte: Notas de aula do Prof. OLIVEIRA, L. C. , IME, 2005.

3.2 SISTEMA DE COORDENADAS

Toda informação com respeito à superfície da Terra, deverá estar associada a um sistema de coordenadas a qual deverá garantir a concordância entre as suas posições. Os conceitos referentes a movimento e posição não são absolutos, e para a sua descrição necessitam de um referencial que, sob a ótica matemática, está associada ao conceito abstrato de um sistema de coordenadas e, para uso prático, existe a necessidade de correlacionar o espaço abstrato com o espaço físico [OLIVEIRA, 1998].

3.2.1 Coordenadas Astronômicas

São coordenadas naturais. Representam um sistema físico, definido a partir de propriedades físicas e vinculadas ao campo gravífico. São elas:

- Latitude Astronômica (Φ) – É o ângulo que a vertical de um ponto na superfície da Terra forma com sua projeção equatorial, sendo consideradas positivas as latitudes no hemisfério norte.
- Longitude Astronômica (Λ) – É o ângulo plano que mede o diedro formado pelo meridiano origem (GREENWICH) e pelo meridiano astronômico que tem seu plano definido pela vertical do lugar e uma paralela ao eixo de rotação médio. O movimento do pólo, faz com que as coordenadas astronômicas variem com o tempo, devendo as mesmas, serem reduzidas à época convencional para a qual se fixou a posição do eixo médio (Figura 3.3).
- Azimute Astronômico (Z) – Ângulo que o meridiano astronômico de um ponto A forma com uma direção a um ponto B. Sendo contado em geodésia, do norte para leste (N-E-S-W).

Para se definir coordenadas tridimensionais (3D), é necessária uma terceira componente, a altitude ortométrica (H), que é a distância que a vertical do lugar de um ponto na superfície da Terra faz com o geóide [GEMAEL, 2002].

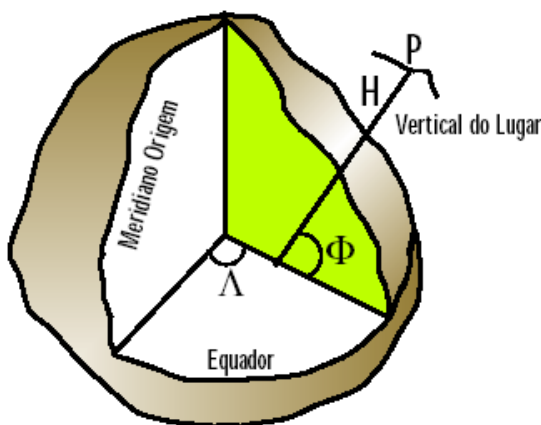


Figura 3.3 - Coordenadas Astronômicas.

Fonte: Notas de aula do Prof. OLIVEIRA, L. C. , IME, 2005.

3.2.2 Coordenadas Geodésicas

Sistema geodésico, conhecido como sistema de coordenadas curvilíneas (ϕ , λ e h), também podendo ser representado através das coordenadas cartesianas (X , Y , Z), mediante o uso das seguintes fórmulas:

$$X = (N + h) \cos \phi \cos \lambda$$

$$Y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda$$

$$Z = [N(1 - e^2) + h] \sin \phi$$

N = Raio de curvatura da seção normal contida no

meridiano de $P \Rightarrow N = a / (1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$

$$e^2 = 2f - f^2 \Rightarrow (1^a \text{ excentricidade})$$

- (ϕ) a latitude geodésica, que é o ângulo que a normal ao elipsóide, conduzida a partir de um ponto na superfície da Terra, faz com sua projeção no plano do Equador. Também considerada como latitude elipsóidica.

- (λ) a longitude geodésica, que é o diedro formado pelo meridiano geodésico (normal com o eixo de rotação) paralelo ao meridiano de origem (GREENWICH) e pelo meridiano definido pela projeção de um ponto na superfície terrestre. Também considerada como longitude elipsóidica (Figura 3.4).

- (h) é a altitude geométrica, que é a distância de um ponto na superfície terrestre até o elipsóide, contada ao longo da respectiva normal. Necessária para a definição das coordenadas tridimensionais (3D), assim como nas coordenadas astronômicas [GEMAEL, 2002].

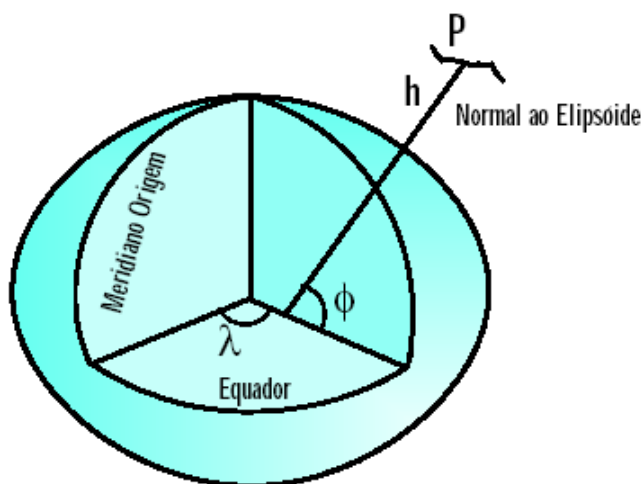


Figura 3.4 - Coordenadas Geodésicas.

Fonte: Notas de aula do Prof. OLIVEIRA, L. C. , IME, 2005.

3.3 SISTEMA REFERENCIAL GEODÉSICO

Uma informação associada ao espaço geográfico (seja através de documentos cartográficos ou por coordenadas) é, de uma maneira geral, indispensável ao bom planejamento e execução de um projeto. Uma informação contida num documento cartográfico qualquer, obrigatoriamente está relacionada a um sistema de projeção cartográfico e a um sistema geodésico vigente. Sendo assim, os sistemas geodésicos são utilizados para descrever as posições absolutas e relativas de elementos sobre a superfície da Terra ou próximo a ela e tendo como referência um sistema coordenado, que vai especificar a posição única de cada ponto do espaço através de um conjunto ordenado de números reais denominados coordenadas.

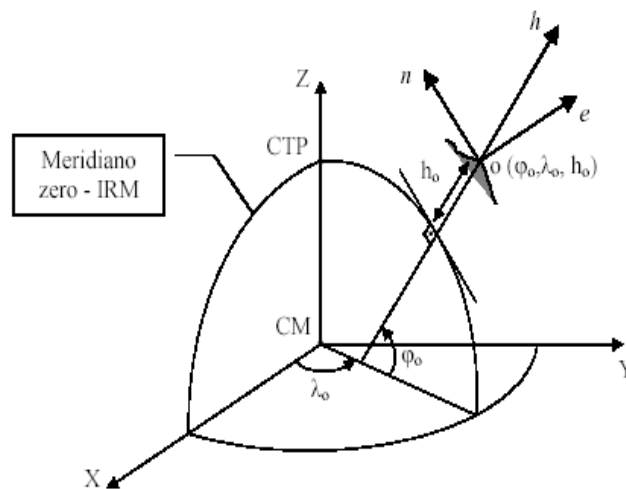


Figura 3.5 - Sistema Referencial Relativo com orientação Topocêntrica.

Fonte: COSTA, 1999.

A figura 3.5, apresenta um sistema de coordenadas com origem na superfície terrestre (ponto 0), tendo os eixos “*h*”, coincidente com a normal ao elipsóide, o eixo “*n*” com uma direção tangente ao meridiano geodésico e dirigido para o norte e o eixo “*e*” sendo perpendicular a “*h*” e “*n*”, fazendo assim com que o sistema seja dextrógiro; ou seja, seu sentido de rotação é anti-horário. O CTP – *Conventional Terrestrial Pole* e o CM o Centro de Massa.

Devido a alguns fenômenos dinâmicos envolvendo a Terra, seu meio ambiente e os corpos celestes em geral, como por exemplo: o movimento de placas na litosfera, marés oceânicas, rotação da Terra, movimentação do seu eixo de rotação, movimento dos planetas e dos satélites e vários outros, houve a necessidade de estabelecimento de referenciais diferentes.

Segundo OLIVEIRA (1998), algumas etapas são necessárias para o estabelecimento de um sistema de referência:

O **Conceito**: Ter um referencial cuja origem seguisse a lei newtoniana da inércia; ou seja, se mantivesse em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, tendo sua origem no centro de massa da Terra, seria o ideal. “Desde que o efeito relativista principal é causado pelo próprio campo gravitacional da Terra, um sistema geocêntrico é o mais adequado para a descrição do movimento dos satélites próximo à Terra”[HOFMANN-WELLENHOF et al. 1997, Apud OLIVEIRA, 1998]. Os eixos de um sistema de coordenadas geocêntrico permanecem paralelos no movimento da Terra ao redor do Sol, pois o mesmo é descrito pela translação sem considerar a rotação. Mas a força do movimento de translação da Terra, causa uma aceleração na origem e o torna “quase-inercial”. Só seria inercial, se a origem fosse transladada para o baricentro. Devido à necessidade de se ter um referencial cujos eixos coordenados sejam fixos no espaço, adota-se convencionalmente uma **definição** para o referencial, estabelecendo-se princípios que fixam a origem, a orientação e eventualmente a escala de sistemas coordenados, fazendo com que o mesmo seja considerado um sistema absoluto ou geocêntrico (Figura 3.6). Com a observação de pontos devidamente materializados sobre a superfície da Terra, obtém-se um conjunto de coordenadas de referência para os mesmos. Conjunto este que **materializa** uma rede de referência (Figura 3.7). Devido ao fato de as redes globais terem uma separação entre pontos na ordem de centenas e até milhares de quilômetros, para trabalhos regionais, que utilizarão coordenadas a partir de uma referência global, será necessário se fazer uma **densificação** da rede, com um espaçamento menor entre os pontos materializados.

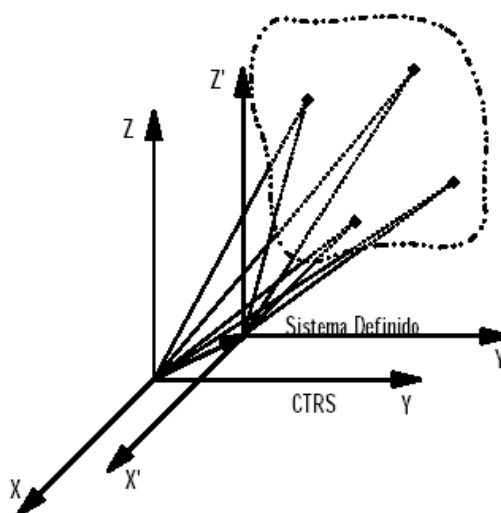


Figura 3.6 - Sistema de referência definido, onde sua existência é limitada ao plano abstrato.

Fonte: Notas de aula do Prof. OLIVEIRA, L. C. , IME, 2005.

Também eram definidos o posicionamento e a orientação do referencial, através de 6 (seis) parâmetros topocêntricos, como mostrados na Figura 3.8 e assim definidos:

- As coordenadas do ponto origem (Latitude e Longitude).
- Orientação azimutal inicial,
- Ondulação geoidal N^* (separação geóide-elipsóide).
- Componentes do desvio da vertical (meridiana e primeiro vertical).

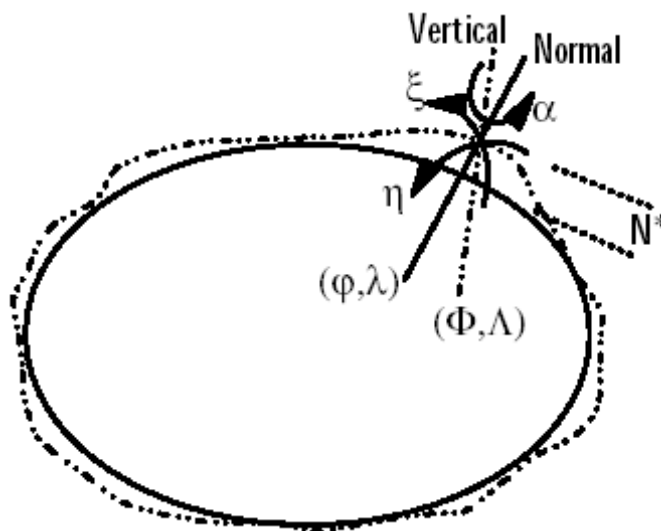


Figura 3.8 - Parâmetros topocêntricos

Fonte: Prof. OLIVEIRA, L. C. IME, 2005.

Estando definido o sistema, partia-se para a materialização do referencial através do cálculo das coordenadas dos pontos, usando-se observações de origem terrestre, ou seja, observações de distâncias, ângulos e azimutes. Essa materialização, formava a chamada rede de referência geodésica, que era um conjunto de pontos ou estações terrestres que viria a representar a superfície da Terra na forma pontual [CASTAÑEDA, 1986]. Devido ao fato de as redes horizontal e vertical caminharem separadamente, o posicionamento 3D de um ponto estabelecido pela geodésia clássica não era completo, faltando às vezes a altitude na rede horizontal, ou tendo esta sua altitude conseguida por processos menos precisos. Usando-se técnicas de posicionamento astronômico, definia-se a situação espacial de um elipsóide de referência, arbitrando-se que a normal ao elipsóide coincidisse com a vertical do ponto origem, e também as superfícies geóide-elipsóide, forçando assim, uma coincidência das coordenadas geodésicas e astronômicas.

A rede altimétrica se iniciou em 13 de outubro de 1945, no Distrito de Cocal, município de Urussanga, Santa Catarina, onde está localizada a referência de nível RN-1A,

com um nivelamento geométrico de alta precisão, dando início assim, ao estabelecimento da Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (sessão 3.8).

Em dezembro de 1946, foi feita uma conexão com a estação Maregráfica de Torres no Rio Grande do Sul, possibilitando assim o cálculo das altitudes das RRNN já implantadas.

Em 1958, já tendo mais de 30.000 quilômetros de linhas de nivelamento, o Datum Vertical de Torres foi substituído pelo Datum Vertical de Imbituba, em Santa Catarina. O Datum Vertical de Imbituba naquela época já possuía mais de nove anos de observações, muito mais do que o de Torres. Essa substituição proporcionou uma melhora no sistema de altitudes. Na década de 70, quando as redes de nivelamento geométrico chegaram aos estados do Acre e Roraima, se concluiu o estabelecimento da Rede Altimétrica.

Na década de 80, iniciou-se a informatização dos cálculos altimétricos, após 35 anos de ajustamentos manuais das observações de nivelamento e, graças a essa informatização, foi possível a implantação do projeto Ajustamento da Rede Altimétrica que começou em 1988, e que tinha o objetivo de homogeneizar as altitudes da Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Em 1993, com o objetivo de aprimorar o referencial da rede Altimétrica, a Fundação IBGE passou a operar a Estação Maregráfica de Copacabana, transformando-a em uma estação experimental para finalidades geodésicas. Atualmente, a Fundação IBGE opera uma estação no porto de Imbetiba, em Macaé, Rio de Janeiro, com a perspectiva de assumir a operação da Estação Maregráfica de Imbituba [IBGE, 2004].

3.5 SISTEMAS MODERNOS DE REFERÊNCIA

Assim como nos sistemas de referência clássicos, nos modernos também há necessidade de defini-los e materializá-los, representando a forma e dimensões da Terra em caráter global e fundamentado em um sistema de coordenadas cartesianas 3D com origem no centro de massa da Terra. Essas coordenadas são estabelecidas através de técnicas de posicionamento espacial de alta precisão, tais como:

- *Very Long Baseline Interferometry* - VLBI,
- *Satellite Laser Ranging* - SLR e
- *Global Positioning System* - GPS,

sendo que para a integração com os sistemas relativos com orientação topocêntrica existentes, há a necessidade de transformação para os mesmos.

Como a componente altimétrica fica referida à superfície do elipsóide, existe a necessidade de sua conversão para o Sistema Geodésico de Referência Vertical, através do conhecimento da ondulação geoidal ou mesmo transportada por métodos clássicos.

A *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG), em alguns períodos, adota um novo SGR, baseado nas últimas informações coletadas sobre o campo gravitacional terrestre. Atualmente, usa o *Geodetic Reference System 1980* (GRS80).

Os SGR modernos, também são definidos por constantes físicas, além das geométricas. Como a Terra é considerada um corpo com rotação e massa, a melhor aproximação física é definida através de quatro parâmetros (IBGE, 2004):

- Raio equatorial (o equivalente ao semi-eixo maior do elipsóide de referência, “a”),
- Constante gravitacional geocêntrica “GM” (com ou sem atmosfera),
- O achatamento terrestre “f”
- Velocidade de rotação da Terra “w”.

Estas constantes estão implicitamente relacionadas às órbitas dos satélites, que por sua vez são usadas para definir as coordenadas de pontos na superfície da Terra.

As coordenadas das estações que compõem a materialização de um sistema de referência terrestre geocêntrico, possuem quatro componentes, sendo três de definição espacial e uma de definição temporal. Eventualmente, as velocidades vem a descrever as variações dos valores das coordenadas com o tempo. A *International Association of Geodesy* (IAG), a *International Astronomical Union* (IAU) e a *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG), têm feito esforços no sentido da conceituação, definição e materialização de referenciais, deixando por conta das organizações nacionais e locais a sua densificação.

Na década de 90 podia-se distinguir quatro classes de sistemas de coordenadas associados à Geodésia, [OLIVEIRA, 1998]:

- Celestes - Posicionamento e estudo do movimento de planetas, estrelas e objetos extragalácticos. Através de técnicas espaciais de observação, atualmente são empregados os Quasares para a definição do Sistema Celeste, devido aos mesmos definirem direções fixas no espaço, ou seja, sem rotação. Têm como origem do sistema o Baricentro do sistema solar.
- Orbitais - Posicionamento e estudo do movimento de satélites naturais e artificiais em órbita terrestre. Acompanham o movimento de revolução (translação) da Terra em torno do Sol.
- Terrestres - Associados ao planeta Terra, acompanham os movimentos de rotação e de revolução e abordam os espaços:
 - Unidimensional (1D) - Sistemas altimétricos,
 - Bidimensional (2D) - Posição planimétrica,

- Tridimensional (3D) - Natureza plani-altimétrica,
- Quadridimensional (4D) - Quando se inclui a coordenada época, associada a dimensão tempo.
- Temporais - Estudo e determinação da dimensão tempo. Baseia-se na ocorrência de fenômenos astronômicos que são associados ao movimento de rotação e translação da Terra (tempo astronômico e tempo dinâmico) e físicos, associados as oscilações atômicas (tempo atômico). Um estudo maior sobre tempo, pode ser encontrado em MONICO, (2000), Posicionamento pelo Navstar - GPS, Sistema de Tempo.

Depois de algumas décadas de estudo e análise, valendo-se de técnicas espaciais, chegou-se à conclusão de que seriam suficientes apenas dois referenciais para a determinação de pontos sobre a superfície da Terra, ou melhor, a projeção desses pontos sobre a superfície de um modelo de referência adotado, no caso um elipsóide de revolução. Esses referenciais seriam: o Referencial Celeste (RC), que tem sua origem no baricentro do Sistema Solar com seus eixos orientados fixamente no espaço, e o Referencial Terrestre (RT), que acompanha a Terra em seu movimento de rotação em torno do seu eixo e de translação ao redor do Sol com sua origem no centro de massa da Terra.

3.6 REFERENCIAL CELESTE - RC

Como não se pode materializar de forma direta a origem e os eixos de um referencial, há a necessidade de se escolher uma estrutura física que sirva de base para a sua definição. Estando as coordenadas celestes amarradas a objetos observáveis, devido à dificuldade de se determinar a posição do Ponto Vernal e, por conseguinte, a posição de qualquer astro no céu relativo a este último, se usava um conjunto de estrelas, cujas coordenadas uranográficas, ascensão reta e declinação (apêndice D) eram catalogadas, associadas a valores de precessão e da obliquidade da Eclíptica de Newcomb e a teoria da nutação de Woolard. Usando um sistema de coordenadas associado à época de 1950, o mesmo era definido a partir de posições de estrelas publicadas no Quarto Catálogo Fundamental, o FK4, que era composto por um conjunto de 1535 estrelas [SEEBER, 1993, apud, BLITZKOW, 2002]. Em meados da década de 80, o *Astronomisches Rechen Institut*, compilou o Quinto Catálogo Fundamental, o FK5, que seria o resultado de 100 novos catálogos comparados com o antigo, o FK4, produzindo a melhora dos movimentos próprios individuais das estrelas. Usava valores convencionais de precessão *International Astronomical Union* (IAU) 1976, uma nova determinação do equinócio, do equador e a rotação do padrão local de repouso [KOVALEVSKY et al., 1989, apud, BLITZKOW, 2002]. Como são catálogos que listam estrelas muito próximas, qualquer sistema de coordenadas referidas à posição dessas estrelas, está sujeito a erros causados pelos

movimentos dessas estrelas na esfera celeste (movimentos próprios). Atualmente o deslocamento do FK5 em relação ao FK4, para a obtenção do equinócio, é da ordem de 0.0085" por século.

Em 1991, a *International Astronomical Union* (IAU), optou por objetos extragalácticos distantes que definissem de forma adequada um referencial celeste e adotou direções que fossem fixas em relação a um conjunto desses objetos [GONTIER et al., 1997, apud, BLITZKOW, 2004]. A vantagem fundamental do uso de objetos extragalácticos, é que suas distâncias são tão grandes, que seus movimentos próprios são indetectáveis, contrariamente ao que ocorre com as estrelas, o que garante uma estabilidade rotacional ao referencial. Além disso, as paralaxes diurna e anual são imperceptíveis. Os referidos objetos são conhecidos como Quasars (*quasi-stellar radio source*). A precisão típica na posição dos Quasars é de ± 0.3 mas (miliarcosegundo). Atualmente, a definição mais estável de coordenadas para a época de 2000 é baseada em aproximadamente 400 fontes extragalácticas que compõem o *Radio Optical Reference Frame* (RORF), que é um sistema de referência estável, deslocando-se a menos de 0.020" por século. As coordenadas dos catálogos estão referidas, por convenção, ao ano Juliano 2000 (J2000) [VASCONCELLOS, 2003 e SANTIAGO, B. UFRGS, 2005].

A escolha de objetos extragalácticos para a realização de direções fiduciais, só foi possível graças à técnica de alta precisão de observação do *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) , que é uma técnica geométrica que mede precisamente direções no espaço. A observação se dá, com o uso de um par de antenas que podem estar separadas por milhares de quilômetros, e cuja diferença no tempo de chegada nas duas estações, dos sinais de alta frequência emitidas pelos quasares, é medida com precisão de pico-segundos (a luz percorre 1mm em 3 pico-segundos). Possui um relógio que data os eventos, podendo reconstruir por correlação, qualquer tipo de atraso gravado nas duas estações.

Com a escolha dos Quasares pela *International Astronomical Union* (IAU), ficou definido que as direções fundamentais do RC permanecerão fixas no espaço, sendo independentes do modelamento do movimento dos objetos do sistema solar. Sendo estes objetos monitorados e suas posições eventualmente re-estimadas de acordo com a qualidade e a disponibilidade de informações. A direção dos eixos coordenados será mantida. A origem é o baricentro do sistema solar e seu plano primário próximo ao equador médio em J2000 [ARIAS et al., 1995; MC CARTHY, 1996, apud, BLITZKOW, 2004]. O *International Earth Rotation Service* (IERS) *Celestial Reference System* (ICRS) é realizado pelo IERS *Celestial Reference Frame* (ICRF), e possui as seguintes características:

- Origem no centro do sistema solar
- O eixo OX é orientado segundo o equinócio vernal do equador médio J2000.
- O eixo OZ é orientado para o polo convencional das efemérides na época J2000, o *Celestial Ephemeris Pole* (CEP).
- O eixo OY completando um sistema ortogonal dextrógiro.

3.7 REFERENCIAL TERRESTRE - RT

O Sistema de Referência Terrestre do IERS (ITRS), é definido conforme os critérios estabelecidos pelo IERS. Tem sua origem no centro de massa da Terra incluindo oceanos e atmosfera. Foi recentemente caracterizado pelas técnicas: *Satellite Laser Range* (SLR) e *Lunar Laser Range* (LLR). A orientação dos eixos foi definida pelo *Bureau International de l'Heure* (BIH), em 1984 e mantida pelo IERS dentro de ± 0.3 mas [IERS, 1997]. Durante muito tempo o eixo OZ foi orientado segundo a posição média do polo, na época chamado de *Conventional International Origem* (CIO), no período de 1900 a 1905. Em 1984, devido a melhoria do modelo de Nutação, foi introduzida uma nova orientação, fazendo com que o mesmo passasse a se chamar *IERS Reference Pole* (IRP). Consistente com o sistema BIH 1984, o eixo OX é orientado segundo o *IERS Reference Meridian* (IRM), e o eixo OY completa o sistema ortogonal dextrógiro.

Quando um referencial terrestre, também chamado de Sistema Terrestre Convencional (CTS), que é um sistema cartesiano tridimensional com origem no centro de massa da Terra, está associado a constantes físicas do campo gravitacional terrestre, recebe a denominação de Sistema Geodésico de Referência (SGR). Esses sistemas Internacionais de referência também são conhecidos com GRS e possuem as seguintes características:

- Massa elipsoidal equivalente à massa da Terra.
- Velocidade angular de rotação do elipsóide igual à da Terra.
- Origem do sistema cartesiano no centro de massa da Terra.
- O eixo OZ do sistema cartesiano, coincide com o eixo de rotação da Terra.

Tais condições fazem com que um SGR não seja definido somente pelo raio equatorial e pelo achatamento do elipsóide, mas também por quantidades físicas. Como exemplo, o Geodetic Reference System de 1980 (GRS80), recomendado pela IAG em 1980 [Torge, 1996, apud, BLITZKOW, 2002], o qual é definido pelas seguintes constantes:

- GM - Constante gravitacional da Terra (massa da atmosfera incluída): $0,3986005 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{s}^2$.

- Velocidade angular da Terra $-(\omega) : 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad. / s}$
- Achatamento $(1/f) : 298,257222101$
- Semi-eixo maior $(a) : 6378137,0 \text{ m}$

O *International Earth Rotation Service* (IERS), criado em 1987 pelas IUGG e IAU, substituiu o *International Polar Motion Service* (IPMS), e a Sessão de Rotação da Terra do BIH . O IERS, membro da *Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis* (FAGS), é o responsável:

- Pela definição e manutenção de um sistema de referência terrestre convencional, baseado em técnicas de observações de alta precisão da geodésia espacial;
- Pela definição e manutenção de um sistema de referência celeste convencional, baseado em fontes de rádio extragalácticas e a relação do mesmo com outros sistemas de referência celeste;
- Pela determinação dos parâmetros de orientação da Terra, *Earth Orientation Parameters* (EOP), que servem para conectar os dois sistemas em conjugação com um modelo convencional da precessão/nutação;
- Por organizar, analisar, coletar e arquivar dados e resultados apropriados das observações e distribuir os resultados que atendam às necessidades dos usuários.

A manutenção do ITRS é uma das atribuições do IERS, que é utilizado para a análise dos conjuntos individuais de uma das técnicas disponíveis no momento (VLBI, SLR, LLR, GPS, DORIS, PRARE), ou para a combinação das observações individuais visando um conjunto único de informações (coordenadas de estações, parâmetros de orientação, etc..)[MC CARTY, 1996, apud, BLITZKOW, 2002].

Características do ITRS:

- É geocêntrico, sendo o centro de massa definido para a Terra total, o que inclui os oceanos e a atmosfera.
- Sua orientação é aquela definida inicialmente pelo BIH em 1984.
- A evolução da orientação no tempo é garantida pela condição de não rotação da rede, com relação aos movimentos tectônicos sobre a Terra.

Com essas características, o sistema não deixa de ser convencional, o que faz com que seja comum chamá-lo de *Conventional Terrestrial Reference System* (CTRS). Esse sistema é materializado através de um catálogo de coordenadas dadas pelo conjunto (x, y, z) e velocidades (derivadas em relação ao tempo), num dado momento para um conjunto de estações. Para a utilização de coordenadas geográficas, se recomenda o uso do GRS80. As

materializações do ITRS são produzidas sob a sigla ITRFyy (sessão 6.3), sendo yy, os dois últimos dígitos do último ano em que as observações contribuíram para a realização do mesmo e cada ITRF correspondendo uma realização do ITRS. À partir do ano 2000, sua sigla passou a ser ITRFyyyy [VASCONCELLOS, 2003].

3.8 SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO – SGB

Um sistema geodésico é definido a partir de um conjunto de pontos geodésicos implantados na superfície terrestre. Tais pontos são determinados por procedimentos operacionais e coordenadas calculadas, segundo modelos geodésicos de precisão compatível com as finalidades a que se destinam [IBGE, 1983].

Dentro da superfície terrestre limitada pela fronteira brasileira, coube a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através do Decreto-Lei nº 9210, de 29 de abril de 1946, a missão institucional de estabelecer e manter as estruturas planimétricas e altimétricas do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), e atualmente, pelo Decreto-Lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967, que fixa as "Diretrizes e Bases para a Cartografia Brasileira".

O Datum planimétrico mais recente adotado por resolução da Fundação IBGE é o South American Datum, 1969 (SAD-69) e o Datum altimétrico é fornecido pelo marégrafo de Imbituba (SC).

É importante ressaltar, que o Sistema Geodésico Brasileiro já esteve associado a outros sistemas de coordenadas geodésicos, como o Itararé, Córrego Alegre e o Astro Chuá (todos utilizando como imagem geométrica terrestre o elipsóide de Hayford)[FERRARI, 1979 apud OLIVEIRA, 1998].

A rede planimétrica desde seu início em 17 de maio de 1944, quando foi implantado pelo Serviço de Geografia e Cartografia (SGC) do IBGE, vem sendo utilizada em várias aplicações, como por exemplo, servindo de apoio a mapeamentos, demarcação de unidades político administrativas, obras de engenharia, regulamentação fundiária, posicionamento de plataformas de prospecção de petróleo além de outras não menos importantes.

Até 1990, foram utilizados métodos clássicos para a determinação de coordenadas em um conjunto de vértices, cuja ocupação era imprescindível para a materialização do Sistema Geodésico de Referência.

Em 1991, passou-se a empregar a tecnologia de posicionamento geodésico por satélites artificiais através do GPS (sessão 3.9.1), para a densificação da componente planimétrica, gerando a rede nacional GPS, que é hoje a estrutura geodésica mais precisa no contexto nacional, a qual abrange as ilhas oceânicas brasileiras e nas quais, em 1993, foram estabelecidas estações, com o apoio da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do

Brasil. O uso da tecnologia GPS veio a revolucionar nesta última década as atividades de navegação e posicionamento. Os trabalhos geodésicos e topográficos passaram a ser realizados de forma mais rápida, precisa e econômica. Nas aplicações geodésicas e topográficas do GPS é utilizado normalmente o método relativo, que consiste no uso de dois receptores, ocupando o ponto de seu interesse e um marco do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) mais próximo. Este sistema possui uma rede ativa de estações de rastreamento contínuo da constelação de satélites, compostas por rastreadores geodésicos de alta precisão, formando a chamada Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), atualmente as estações da RBMC desempenham o papel do ponto de coordenadas conhecidas, eliminando a necessidade do usuário deslocar um receptor para um ponto que, muitas vezes, oferece grandes dificuldades de acesso. Além disso, os receptores que equipam as estações da RBMC são de alto desempenho, proporcionando observações de grande qualidade e confiabilidade.

Contando até o presente momento com 20 estações, a RBMC fornece dados necessários a utilização pública da tecnologia GPS no Brasil, além de ser o elo de conexão com os sistemas de referência internacionais [IBGE, 2004]. A rede ainda se encontra em evolução, pretendendo-se aumentar a quantidade de estações, objetivando uma distância entre as mesmas de 1500km na região amazônica e de 500 a 1000km em outras regiões. A Figura 3.9 apresenta a versão mais atual da RBMC, mostrando em azul as estações da Fundação IBGE, em vermelho as do SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia) e em verde as da CEMIG (Companhia de Eletricidade de Minas Gerais). A figura 3.10, mostra as estações em operação, em fase de teste e em fase de implantação.

Para sua implantação foram escolhidos locais em dependências de instituições públicas. O Centro de Controle da RBMC está sediado nas dependências da Fundação IBGE, na cidade do Rio de Janeiro, exercendo todo o controle operacional da Rede. O SGB, também possui uma rede passiva, cujas estações tem suas coordenadas determinadas, por métodos clássicos (triangulação, trilateração, poligonação, etc.) e também por tecnologia GPS. São estações, que podem ser ocupadas por usuários de acordo com suas necessidades em suas tarefas de posicionamento [VASCONCELLOS, 2003 e IBGE, 2004].



Figura 3.9 - Rede brasileira de monitoramento contínuo do sistema GPS
Fonte: IBGE, 2004



Figura 3.10 - Estações em operação, em fase de teste e em fase de implantação
Fonte: IBGE, 2004

As coordenadas das estações da RBMC são componentes importantes na composição dos resultados finais dos levantamentos a ela referenciados. Todas as suas estações fazem parte da Rede de Referência SIRGAS 2000, cujas coordenadas finais têm precisão da ordem

de ± 5 mm, configurando-se como uma das redes mais precisas do mundo. Desde 1997 as observações da RBMC vêm contribuindo para a densificação regional da rede do IGS (International GPS Service), garantindo uma maior precisão dos produtos do IGS, tais como órbitas precisas, sobre o território brasileiro.

A Fundação IBGE não tem o controle sobre a estação FORT (Fortaleza IGS) e não disponibiliza os arquivos de navegação dessa estação, sendo que os mesmos podem ser obtidos através das instituições *Crustal Dynamics Data Information System* (CDDIS), *Institut Geographique National* (IGN) ou *Scripps Institution of Oceanography* (SIO). As coordenadas das estações são apresentadas na Tabela 3.1, e informações adicionais sobre a RBMC podem ser encontradas no apêndice C - Estações RBMC.

Tabela 3.1
Estações estabelecidas da RBMC

Estação/Código	Latitude	Longitude
Fortaleza (IGS)/FORT	-03° 53' 37,44"	-38° 25' 30,95"
Brasília (IGS)/BRAZ	-15° 56' 49,30"	-47° 52' 38,74"
Curitiba/PARA	-25° 26' 52,36"	-49° 13' 49,70"
Pres. Prudente/UEPP	-22° 07' 09,97"	-51° 24' 28,97"
Bom Jesus da Lapa/BOMJ	-13° 15' 18,42"	-43° 25' 16,80"
Manaus/MANA	-03° 06' 56,83"	-60° 03' 56,83"
Viçosa/VICO	-20° 45' 39,65"	-42° 52' 10,47"
Cuiabá/CUIB	-15° 33' 17,40"	-56° 04' 09,71"
Imperatriz/IMPZ	-05° 29' 28,97"	-47° 29' 48,51"
Porto Alegre/POAL	-30° 04' 24,75"	-51° 07' 09,28"
Salvador/SALV	-13° 00' 29,60"	-38° 30' 43,20"
Recife/RECF	-08° 03' 01,98"	-34° 57' 04,30"
Crato/CRAT	-07° 14' 15,41"	-39° 24' 54,88"
Rio de Janeiro/RIOD	-22° 49' 02,45"	-43° 18' 21,07"
Santa Maria/SMAR	-29° 43' 06,37"	-53° 42' 57,80"
Belém/BELE	-01° 24' 30,38"	-48° 27' 43,62"
Varginha/VARG	-21° 32' 31,92"	-45° 26' 03,98"
Uberlândia/UBER	-18° 53' 20,66"	-48° 18' 59,46"
Montes Claros/MCAR	-16° 43' 11,76"	-43° 52' 51,25"
Governador Valadares/GVAL	-18° 51' 18,46"	-41° 57' 25,99"

Fonte: IBGE, 2004.

3.9 POSICIONAMENTO GEODÉSICO POR SATÉLITES ARTIFICIAIS

Em 1957, com o lançamento do SPUTNIK I, da União Soviética, a concepção de navegação utilizando sinais de rádio teve a sua origem. Com as transmissões de rádio do SPUTNIK I, cientistas perceberam o efeito Doppler nas mesmas, descobrindo que a medida da variação desse efeito era comparável à medida da variação da distância entre as fontes emissoras e receptoras de sinais. Assim sendo, ocuparam pontos com coordenadas conhecidas conseguindo determinar a órbita do satélite. Mais tarde foi feito o inverso, ou seja, a posição do receptor pôde ser determinada com o conhecimento das órbitas dos satélites, tendo como resultado a concepção de um método de navegação. A Marinha dos Estados Unidos da América, que sempre trabalhou na busca e no desenvolvimento de técnicas de navegação, principalmente em alto mar, propôs à Agência de Projetos de Pesquisas Avançadas que explorasse a técnica Doppler para desenvolver um sistema de navegação. Foi criado o sistema *Navy Navigation Satellite System* (NNSS), também conhecido como TRANSIT [VASCONCELLOS, 2003], o qual foi inicialmente utilizado no Brasil na década de 70 quando das operações de rastreamento de satélites artificiais. Foram inicialmente realizadas medições sobre a rede geodésica de alta precisão com o propósito de estimar parâmetros de transformação entre o SAD-69 e os referenciais adotados no sistema TRANSIT. Este sistema esteve operacional até o início de 1993, sendo largamente utilizado em geodésia de apoio de campo à aerofotogrametria de regiões de difícil acesso e aplicado no estabelecimento de estações na região amazônica, onde os procedimentos clássicos eram impraticáveis [COSTA, 1999]. Nesse sistema, como os satélites tinham suas órbitas muito baixas (altitude média, 1100 km) e eram poucos (8 satélites ativos em órbitas polares elípticas, quase circulares), não se tinha como obter posições com muita frequência, permitindo-se dois problemas: não havia cobertura mundial total e deixava um lapso de tempo considerável entre as passagens sucessivas dos satélites para um mesmo ponto na Terra. Faltava uma solução que oferecesse boa precisão, facilidade de uso e custos acessíveis para os usuários, o que se conseguiu com o NAVSTAR/GPS.

3.9.1 GLOBAL POSITIONING SYSTEM - GPS

Em 1970, com a proposta do GPS, surgiu a solução definitiva para o problema do posicionamento: o *Global Positioning System* (GPS), ou *Navigation Satellite With Time and Ranging* (NAVSTAR-GPS) que é um sistema de rádio navegação desenvolvido pelo *Department of Defense* (DoD), fusão de dois sistemas de navegação de abrangência global: *NAVSTAR* (Marinha) e *SYSTEM 621 B* (Força Aérea).

O princípio básico da navegação por GPS, consiste na medida de distâncias entre o usuário e 4 satélites. Conhecendo-se as coordenadas dos satélites num sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, três distâncias seriam suficientes para o cálculo das coordenadas, desde que não estivessem no mesmo plano, mas em razão do não sincronismo entre os relógios dos satélites e o do usuário, uma quarta medida é necessária. O sistema GPS permite a qualquer usuário ter à sua disposição, um mínimo de 4 satélites para serem rastreados, o que permite um posicionamento em tempo real, não havendo necessidade de intervisibilidade entre as estações e podendo ser utilizado sob qualquer condição climática. Tal como outros sistemas envolvidos em geodésia espacial, o GPS mede essencialmente o intervalo de tempo da propagação do sinal. Utiliza o tempo atômico, onde registra o instante da geração dos sinais, e o tempo dinâmico, onde expressa a equação do movimento dos satélites. Consiste em três segmentos principais: espacial, de controle e de usuários.

Segundo MONICO (2000), o segmento espacial do GPS consiste em 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, circulando a Terra em órbitas elípticas (quase circulares), inclinadas de 55° em relação ao equador (Figura 3.11). Cada plano contém 4 satélites visíveis com inclinação de 15° em relação ao horizonte, vinte quatro horas por dia, numa altura aproximada de 20200 km. Tem como função, gerar e transmitir os sinais GPS. As mensagens são transmitidas por códigos (C/A, P, Y) e enviadas por duas portadoras (L1 e L2), informando a saúde e a posição dos satélites (efemérides).

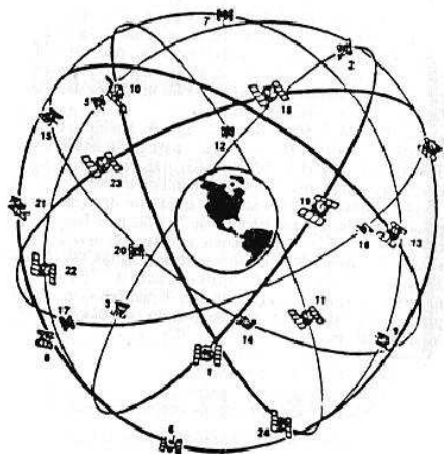


Figura 3.11 - Constelação de Satélites GPS

Fonte: GPS GLOBAL, 2004.

O segmento de controle tem cinco estações monitoras no mundo, Havaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia e Colorado Springs (Figura 3.12), que têm como principais tarefas:

- Monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites
- Determinar o sistema de tempo GPS
- Predizer as efemérides dos satélites
- Calcular as correções dos relógios dos satélites
- Atualizar periodicamente as mensagens de navegação de cada satélite



Figura 3.12 - Segmento de controle do GPS

Fonte: GEOCITES, 2004.

O segmento de usuários é constituído pelos receptores GPS, que servem a diferentes propósitos, podendo ser usados em navegação, geodésia ou outra atividade qualquer [MONICO, 2000].

Serviços oferecidos pelo GPS:

- *Standard Position Service* – SPS (Serviço de posicionamento padrão, para qualquer usuário)
- *Precise Position Service* – PPS (Serviço de posicionamento preciso, só para uso militar e usuários cadastrados)

Até 1º de maio de 2000, o SPS, proporcionava capacidade de acurácia horizontal e vertical dentro de 100 e 140 m, respectivamente, e o PPS entre 10 e 20 m. Hoje em dia, com a eliminação do erro deliberado que era introduzido no sinal (SA – *Selective Availability*) , já se tem, no SPS, uma capacidade horizontal entre 5 e 15 m e vertical entre 10 e 30 m. Já no PPS, um valor inferior a 1m, mas é só para uso militar.