

Referenciais Geodésicos

Baseado na Tese de Livre Docência de João Francisco Galera Monico
FCT/Unesp – Presidente Prudente, Junho de 2005

1. Introdução

Em qualquer atividade de posicionamento geodésico, especialmente nas de natureza espacial, é de fundamental importância que a definição e a realização dos sistemas de referência celeste e terrestre sejam apropriadas, precisas e consistentes. A definição e a realização são imprescindíveis para modelar as observáveis, descrever as órbitas dos satélites, representar, interpretar e, quando necessário, transformar os resultados.

A definição de um sistema de referência é caracterizada pela idéia conceitual do mesmo. Na literatura em inglês utiliza-se o termo *reference system*. Dentro do conceito da mecânica de Newton, um referencial ideal seria aquele em que a origem estivesse em repouso, ou em movimento retilíneo uniforme, caracterizando-o como um referencial inercial. No entanto, um sistema de referência geocêntrico possui aceleração em seu movimento de translação ao redor do sol, apesar de pequena. Trata-se, portanto, de um referencial *quase-inercial*. Um sistema de referência nessas condições é qualificado como dinâmico. Atualmente, um sistema inercial é definido por meio das posições de objetos extragalácticos, cujos movimentos próprios são considerados desprezíveis, se comparados com a acurácia das medidas realizadas (observáveis) sobre os mesmos. Sob tais circunstâncias, tem-se uma definição cinemática, a qual está relacionada apenas com os sistemas celestes. Logo a definição envolve fundamentos matemáticos e modelos físicos. Além disso, nos referenciais terrestres, fatores relacionados com a deformação da Terra em âmbito global, regional e local, bem como outros, devem ser considerados.

Em geral, cada instituição ou grupo de pesquisadores envolvidos com referenciais dispõe de uma solução específica para a definição do referencial, sendo denominada de TRS (*Terrestrial Reference System – Sistema de Referência Terrestre*) para o caso terrestre, e CRS (*Celestial Reference System – Sistema de Referência Celeste*) para o celeste.

Para fins operacionais, torna-se necessário adotar um referencial por convenção, quer seja terrestre ou inercial, dando origem ao sistema de referência convencional. Nesse caso, todos os modelos, constantes numéricas e algoritmos são claramente especificados. Eles proporcionam a origem, escala e orientação do sistema, bem como sua evolução temporal. Tem-se então o CTRS (*Conventional Terrestrial Reference System – Sistema de Referência Terrestre Convencional*) e o CCRS (*Conventional Celestial Reference System – Sistema de Referência Celeste Convencional*).

Quando um referencial é definido e adotado convencionalmente, a etapa seguinte é caracterizada pela coleta de observações a partir de pontos sobre a superfície terrestre (rede), ou próximo a ela, devidamente monumentalizados. Fazem parte ainda, o processamento e análise, bem como a divulgação dos resultados, que é, essencialmente, um catálogo de coordenadas associadas a uma época particular. As coordenadas podem vir acompanhadas de suas respectivas velocidades e precisão. Esse conjunto materializa o sistema de referência. Na língua inglesa utiliza-se o termo *reference frame*. Da mesma forma como apresentando no caso da definição, cada uma das instituições envolvidas com essa tarefa disponibilizará sua realização, que no caso terrestre é denominada TRF (*Terrestrial Reference Frame – Referencial terrestre realizado*). A combinação de todas as realizações resulta numa solução final denominada ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*).

Uma vez realizado ou materializado o referencial, um outro aspecto muito importante diz respeito à sua densificação, procedimento que, no caso terrestre, visa aumentar a densidade de estações. Logo, a densificação passa a ser uma expansão da materialização.

Em resumo, a definição de um sistema de referência diz respeito a um caso ideal, que na sua realização fica limitada em razão dos erros inerentes às observáveis utilizadas e da imprecisão das constantes adotadas por convenção. A realização, para o caso de um referencial terrestre, nada mais é que uma lista de coordenadas e velocidades dos objetos (estações) que compõem o sistema, também denominada de conjunto de coordenadas de referência ou rede. As informações sobre a qualidade dessas coordenadas e velocidades também fazem parte da realização, bem como os objetos e a descrição dos mesmos. Para o caso de um referencial celeste, a realização é uma lista de coordenadas ascensão reta e declinação de objetos extragalácticos.

A acurácia das coordenadas do sistema realizado deve ser compatível com a da tecnologia de posicionamento adotada; caso contrário, a qualidade dos resultados se deteriora. Um exemplo que comparece na literatura diz respeito à integração de levantamentos GPS de alta precisão a uma rede levantada por técnicas convencionais (triangulação, trilateração, poligonais, etc.). Nesse caso, a integração deteriora a qualidade dos resultados obtidos com o GPS.

Como sempre ocorrem melhorias na acurácia dos sistemas de medição e nos modelos e algoritmos, num determinado momento pode surgir a necessidade de uma nova definição (ou redefinição) dos sistemas de referência. Isso visa garantir que a acurácia proporcionada pelas tecnologias envolvidas nos sistemas de medição não seja deteriorada em razão da definição do referencial.

No posicionamento por satélites, os sistemas de referências adotados são, em geral, globais e geocêntricos, haja vista que o movimento dos satélites é ao redor do centro de massa da Terra. As estações terrestres são, normalmente, representadas num sistema fixo à Terra, e rotaciona com ela (sistema terrestre). O movimento do satélite é melhor descrito no sistema de coordenadas equatoriais (sistema celeste).

Definidos e realizados os dois referenciais, tem-se ainda que conhecer a relação entre eles para poder modelar adequadamente as observáveis. No ajustamento dos dados provenientes do posicionamento por satélite é essencial que posições dos satélites e estações terrestres sejam representadas no mesmo sistema de referência.

Um aspecto que reserva a atenção é que a grande maioria dos levantamentos realizados no mundo até pouco tempo atrás está referenciada a sistemas regionais (quasi-geocêntrico), tal como a maioria dos documentos cartográficos. No caso do Brasil, um dos referenciais do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) coincide com o Sistema de Referência da América do Sul (SAD 69: *South American Datum of 1969*), o qual não é geocêntrico. Dessa forma, a relação matemática entre os sistemas regionais e os usados em posicionamento com satélites também deve ser conhecida.

A tendência mundial aponta para a adoção de um sistema geocêntrico, não só para fins geodésicos, mas também para fins de mapeamento. Vários países estão desenvolvendo atividades visando atingir esse objetivo. No caso do Brasil, um referencial geocêntrico (seção 2.8.1) para fins de Mapeamento e de Geodésia foi adotado no início de 2005.

2. Sistemas de referências celeste e terrestre

Na Assembléia Geral da IAU (*International Astronomy Union* – Associação Astronômica Internacional), em 1991, através da resolução A4, foi adotada explicitamente a teoria da relatividade como sendo a base para a definição e realização de referenciais. Em termos de referencial celeste, essa resolução introduziu o BRS (*Barycentric Reference System* – Sistema de referência baricêntrico) e o GRS (*Geocentric Reference System* – Sistema de referência geocêntrico), com origem, respectivamente, no baricentro do sistema solar e no geocentro e com as direções dos eixos coordenados fixas em relação a objetos distantes no universo de modo a não apresentarem rotação global com respeito a uma série de objetos

extragalácticos. Adicionalmente estipulou que o plano principal (Equador - origem da declinação) e respectiva origem (ponto vernal – origem da ascensão reta) deveriam estar tão próximos quanto possível do equador médio e do equinócio dinâmico da época J2000. Logo, nesse sistema, o eixo X^c , origem da ascensão reta, aponta muito próximo ao equinócio dinâmico às 12hs TDB (*Barycentric Dynamical Time* – Tempo Dinâmico Baricêntrico) em 1º de janeiro de 2000, ou seja, no dia Juliano 2451545,0 que corresponde à época de referência J2000 (seção 2.3). O eixo Z^c aponta na direção do pólo de referência convencional, na mesma época, e o eixo Y^c completa o sistema de forma que seja dextrógiro. Esse sistema foi adotado na Assembléia Geral da IAU em 1997, sob a denominação de ICRS (*International Celestial Reference System* – Sistema de Referência Celeste Internacional) e substituiu o sistema FK5^(2.1) em 1º de janeiro de 1998. Com a aprovação das convenções IERS 2000, as siglas BRS e GRS passaram a ser denominadas BCRS e GCRS respectivamente (C advém de *Celestial* - Celeste).

No ICRS, quer seja o BCRS ou o GCRS, as direções fundamentais permanecerão fixas no espaço, independentemente do modelo que descreve o movimento dos objetos do sistema solar. Esses objetos serão monitorados e suas posições eventualmente re-estimadas de acordo com a qualidade e a disponibilidade de informações, mas as direções dos eixos coordenados serão mantidas fixas.

Para que as várias realizações do sistema celeste tenham continuidade, as orientações dos eixos do ICRS devem ser consistentes com o equador e equinócio na época J2000, tal como considerado no FK5. Desta forma, como as novas realizações do ICRS são de melhor qualidade que o FK5, elas podem ser consideradas como um refinamento do mesmo.

O ICRS é materializado por coordenadas equatoriais, ascensão reta e declinação de uma série de fontes de rádio extragaláctico *quasars* (*Quasi Stelar Rádio Source*),

^(2.1) A realização FK5 contém 1535 estrelas fundamentais, contendo, dentre outras informações, as coordenadas equatoriais na época J2000,

determinadas a partir da técnica de VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*). Realizações do ICRS, que é o referencial estabelecido pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service* – Serviço Internacional de Rotação da Terra e de Sistema de Referência), denominado ICRF (*IERS Celestial Reference Frame*), vinham ocorrendo anualmente entre 1989 e 1995. O IERS propôs que a versão de 1995 fosse adotada como sendo o ICRS, o que foi oficialmente aceito na assembléia da IAU de 1997. Nesse caso, uma realização foi adotada como definição. A última realização é de 1999 e conta com 667 objetos. A manutenção do ICRS requer que a estabilidade das coordenadas das fontes seja monitorada através de novas observações VLBI e novas análises. As atualizações comparecem nas publicações do IERS.

Uma realização do ICRS dentro do espectro visível é o catálogo HIPPARCOS (*High Precision Parallax Collecting Satellite*), o qual contém uma lista de coordenadas de 118218 estrelas para a época J1991,25, com precisão da ordem de 0,77 e 0,64 *mas* (milésimo do segundo de arco) em ascensão reta e declinação respectivamente. Essas coordenadas foram determinadas usando o telescópio óptico do satélite HIPPARCOS. Trata-se de uma realização de melhor qualidade que o FK5.

A vinculação do ICRF com um referencial prático de ser utilizado no posicionamento por satélite se concretiza através do ITRF (*IERS Terrestrial Reference Frame* – Realização do referencial terrestre do IERS).

O ITRS (*International Terrestrial Reference System* - Sistema de Referência Terrestre Internacional) é um sistema de referência espacial que rotaciona com a Terra em seu movimento no espaço. Idealmente, tem origem no centro de massa da Terra e orientação equatorial (eixo Z aponta na direção do pólo de referência convencional). De acordo com recomendação emanada da resolução N^º 2 da IUGG (*International Union of Geodesy and*

com incerteza da ordem de 20 a 30 *mas*.

Geophysics – Associação Internacional de Geodésia e Geofísica), adotada em Viena em 1991, esse sistema deve atender as seguintes definições:

- é geocêntrico, e o centro de massa é definido usando a Terra toda, incluindo oceanos e atmosfera;
- a escala é consistente com o TCG (Tempo Coordenado Geocêntrico) para um referencial geocêntrico;
- sua orientação inicial foi dada por aquela do BIH (*Bureau International de L'Heure*) na época 1984,0;
- sua evolução temporal em orientação é assegurada pelo uso da condição de uma rede que não rotaciona com respeito ao movimento tectônico horizontal sobre toda a Terra.

Em essência, o ITRS é um sistema fixo na Terra que rotaciona com ela. No que concerne à escala, ela está diretamente relacionada com a referência de tempo utilizada. Na determinação das órbitas dos satélites com alta precisão, onde comparece um sistema de tempo, os efeitos relativísticos devem ser levados em consideração. Maiores detalhes sobre o sistema de tempo utilizado serão apresentados na seção 2.3. A evolução temporal em orientação é garantida pela introdução da condição de um referencial NNR (*No Net Rotation* – Rede Sem Rotação). Essas duas últimas condições foram efetivamente implementadas no ITRF2000.

A realização do ITRS deve, de preferência, ser especificada em coordenadas cartesianas X , Y e Z . O eixo Z aponta na direção do CTP (*Conventional Terrestrial Pole* – Pólo terrestre convencional)^{2.2}, eixo X na direção média do meridiano de Greenwich e o eixo Y de modo a tornar o sistema dextrógiro. Se coordenadas geodésicas são necessárias, recomenda-se usar o elipsóide GRS 1980 (*Geodetic Reference System 80* – Sistema de Referência Global 80). O usuário deverá observar a distinção entre as siglas GRS 1980 e GRS

^{2.2} CTP é a nova denominação do CIO (*Conventional International Origin*).

(p. 22). Enquanto a primeira (GRS 1980) está associada a um referencial geodésico, GRS está vinculada apenas à origem geocêntrica do mesmo.

As realizações do ITRS são produzidas pelo IERS ITRS-PC (ITRS *Product Center*-Centro de produção do ITRS). Cada realização é composta por um catálogo de coordenadas e velocidades de um grupo de estações IERS. Em geral, essas estações têm sido levantadas com a tecnologia VLBI, SLR (*Satellite Laser Range*), GPS e DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*). Cada uma das realizações é designada por ITRF-yy (*International Terrestrial Reference Frame*) O número yy deve especificar os dois últimos dígitos do último ano cujos dados contribuíram com a realização em consideração. Mas para o caso do ano 2000, a designação foi ITRF-2000.

No posicionamento por satélite, os referenciais de interesse são geocêntricos, pois os satélites têm como origem de seu movimento o centro de massa da Terra. Logo, em termos de referenciais celeste e terrestre, o interesse é pelo GCRS e ITRS respectivamente.

2.1 Transformações de acordo com a Resolução IAU 2000

Com a introdução da resolução IAU 2000, que passou a vigorar a partir de 1º de janeiro de 2003, algumas modificações foram introduzidas nos modelos de precessão e nutação; consequência de melhorias na acurácia das observações envolvidas. Os modelos até então utilizados (IAU1976 para a precessão e IAU 1980 para a nutação) foram substituídos pelo IAU 2000A, podendo ser também utilizado o IAU2000B, dependendo da precisão exigida. Enquanto o primeiro proporciona precisão da ordem de 0,2 *mas*, no segundo esse valor aumenta para 1,0 *mas*.

Em face dessas alterações, ao realizar as transformações de precessão e nutação o que se obtém é um sistema de Coordenadas Celeste Intermediário (CCI), ao invés do verdadeiro, como citado anteriormente. Logo, o pólo celeste realizado é denominado CIP (*Celestial*

Intermediate Pole - Pólo celeste intermediário), em substituição ao CEP (*Celestial Ephemeris Pole* – Pólo celeste das efemérides). A direção do CIP na época J2000,0 tem que ser compensada em relação ao pólo do GCRS de forma consistente com o novo modelo de precessão e nutação. O movimento do CIP no GCRS (precessão e nutação) é realizado através dos modelos citados (IAU2000A ou IAU2000B) para períodos maiores que dois dias, acrescido de correções dependentes do tempo, as quais serão proporcionadas pelo IERS através de observações astro-geodésicas. Isso requer do IERS o monitoramento dessas correções. O movimento do CIP no ITRS (movimento do pólo) também é proporcionado pelo IERS, através de observações astro-geodésicas e modelos que incluem variações de alta freqüência. Logo, a nutação, para período menor que dois dias (nutatione forçada) é introduzida no modelo de movimento do CIP no ITRS.

Para realizar a transformação compatível com a nova resolução, mas utilizando as expressões baseadas nos modelos IAU 1976 e IAU 1980 para precessão e nutação respectivamente, deve-se proceder como apresentado anteriormente e aplicar correções ao modelo. A acurácia ficara restrita a do modelo IAU 2000B de precessão e nutação.

A transformação segundo o novo conceito é apresentada a seguir. A transformação de acordo com a simbologia adotada pelo IERS é dada por:

$$\vec{X}^T = W(t)R(t)Q(t)\vec{X}^c,$$

onde $W(t)$, $R(t)$ e $Q(t)$ representam, respectivamente, as matrizes de rotação resultante do movimento do pólo, ângulo de rotação da Terra e do movimento do pólo celeste no sistema celeste (precessão e nutação).

A matriz $W(t)$ é obtida a partir de

$$W(t) = R_3(s')R_2(-x_p)R_1(-y_p),$$

com s' sendo uma quantidade que proporciona a posição do TEO (*Terrestrial Ephemeris Origin* - Origem terrestre das efemérides) no ITRS. Essa quantidade só é sensível a grandes

variações no movimento do pólo, sendo que a mesma será menor que 0,4 mas até o fim do próximo século. Ela pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$s' = -47 \text{ uas } t,$$

onde uas representa micro segundos de arco.

A matriz $R(t)$ é obtida a partir do ângulo de rotação da Terra ($\theta(t)$). Esse ângulo é medido sobre o equador do CIP, entre o CEO (*Celestial Ephemeris Origin* - Origem das efemérides celeste) e o TEO. As figuras 1 (a) e (b) mostram os elementos envolvidos e a relação entre o CEO, TEO e $(\theta(t))$. Esse último elemento é obtido a partir de sua relação com o *UT1*:

$$\theta(Tu) = 2\pi(0,7790572732640 + 1,00273781191135448Tu),$$

com T_u = (Data Juliana em UTI – 2451545,0). Os termos CEO e TEO, de acordo com a resolução B1.8 da IAU 2000, referem-se a origens não sujeitas a rotação no GCRS e ITRS respectivamente.

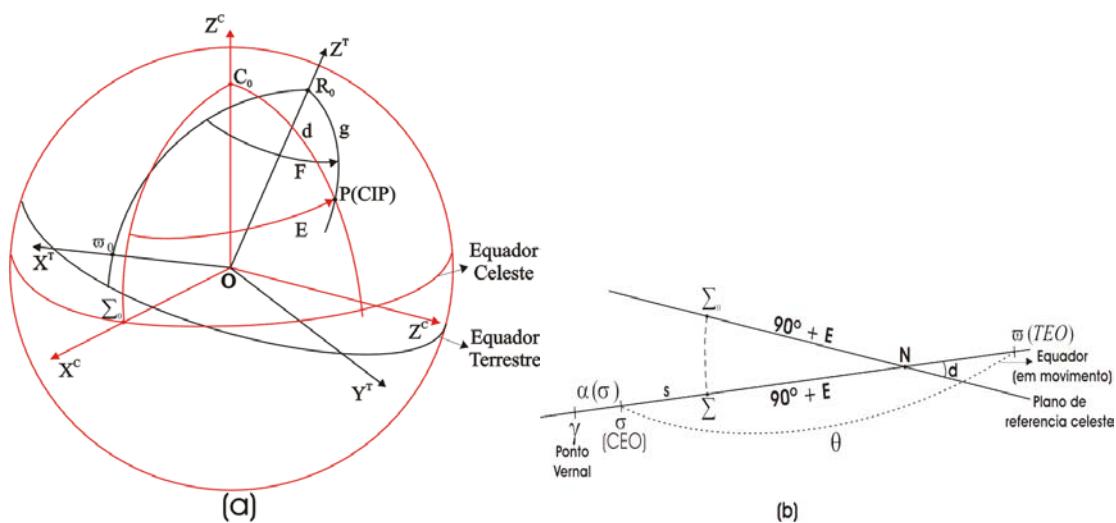


Figura 1 (a) e (b) - CIP, CEO, TEO e ângulo de rotação da Terra θ

A matriz $Q(t)$ é obtida a partir da seguinte expressão:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - ax^2 & -axy & x \\ -axy & 1 - ay^2 & y \\ -x & -y & 1 - a(x^2 + y^2) \end{bmatrix} R_3(s),$$

com $a = 1/2 + 1/8(x^2 + y^2)$. As coordenadas x e y proporcionam a posição do CIP no GCRS, baseadas nos modelos IAU 2000A e IAU 2000B. A quantidade s proporciona a posição do CEO no equador do CIP. Mas as análises das observações VLBI têm mostrado que ainda ocorrem deficiências no novo modelo. Desta forma, o IERS irá publicar as correções para serem aplicadas ao modelo. Tratam-se das correções do pólo celeste (*celestial pole offset*), denominadas de δx e δy , para serem aplicadas em x e y respectivamente.

É importante citar que o IERS disponibiliza o código de rotinas em linguagem Fortran que permitem implementar a resolução IAU 2000. Elas estão disponíveis em <ftp://maia.usno.navy.mil/conv2000/chapter5>. Algumas rotinas adicionais, necessárias para a completa implementação, estão disponíveis em <http://www.iau-sofa.rl.ac.uk>. Trata-se de uma série de rotinas que compõem o SOFA (*Standards of Fundamental Astronomy*). Nesse endereço pode-se também encontrar a própria implementação dos modelos IAU 2000.

Desde janeiro de 2003 os serviços do IERS estão publicando seus boletins (Bulletin A, Bulletin B e C04EOP-PC) contendo as quantidades δx e δy com respeito ao modelo de precessão e nutação IAU2000A, além de conter os parâmetros publicados até então.