

POSICIONAMENTO ABSOLUTO COM EFEMÉRIDES PRECISAS

CAMARGO, Paulo de Oliveira ⁽¹⁾; FERREIRA, Luis
Danilo Damasceno ⁽²⁾; MOG, Darvin Edison ⁽²⁾

- ⁽¹⁾ Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Depto de Cartografia
Caixa Postal 957. 19060-900 - Presidente Prudente - SP
- ⁽²⁾ Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia - Depto. Geociências
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Caixa Postal 19.011. 81531-990 - Curitiba - PR

ABSTRACT

The precision of GPS point positioning using the C/A-code is at or below the 40 m. However, the effect of Selective Availability (SA) can downsize the achievable precision up to 100 m. Users linked to the DoD-USA, typically from the military, have access to the Precise Positioning System (PPS). On the other hand, civilians have access to the Standard Positioning System (SPS). Today, with the availability of precise ephemerides and satellite clock correction information, one can obtain better results with point positioning. With the implementation of the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS (RBMC) and the consequent dissemination of precise ephemerides, based on the RBMC, by the IBGE, point positioning using precise ephemerides will become a common approach. This paper presents the observation equations, in a Kalman Filtering, for point positioning using precise ephemerides,

Keywords: GPS, Point Positioning, Precise Ephemerides

RESUMO

As coordenadas obtidas através do código C/A, a partir do emprego de um único receptor GPS, apresentam uma precisão melhor do que 40 m. Porém este erro devido à disponibilidade seletiva (SA) pode atingir até 100 m ou mais. O sistema militar do DoD-USA tem precisão melhor, pois eles utilizam do Serviço de Posicionamento Preciso (PPS), enquanto que os civis utilizam o Padrão (SPS). Contudo com a atual facilidade de obtenção de efemérides precisas e informações das correções dos relógios dos satélites, pode-se obter melhores resultados em posicionamento de pontos isolados; e quando a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo for implementada e o IBGE calcular efemérides precisas no âmbito nacional, este tipo de aplicação poderá tornar-se mais comum. Neste trabalho será apresentado as equações de observação de código, aplicadas ao Filtro de Kalman (Gelb, 1982), para posicionamento por ponto com efemérides precisas.

Palavras Chaves: GPS, Posicionamento por ponto, efemérides precisas.

1. INTRODUÇÃO

O GPS (Global Positioning System) é um sistema de posicionamento baseado em ondas de rádio com alcance global. Por ser de origem militar, o sistema tem condições de limitar a sua precisão para usuários civis não autorizados, os quais tem acesso apenas ao Serviço de Posicionamento Padrão (SPS). Este serviço fornece uma precisão para posicionamento absoluto, utilizando medidas do código C/A (código de fácil acesso), em tempo real de aproximadamente 100 metros quando a disponibilidade seletiva (SA) esta ativada; caso contrário fornece uma

precisão de 15 a 30 metros, enquanto que o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS), disponível apenas para usuários autorizados, por meio do código P (código Preciso) obtém-se precisões da ordem de 2 a 10 metros (Soares, 1996). A limitação causada pela chamada disponibilidade seletiva, imposta pelo Departamento de Defesa (DoD) dos EUA, utiliza dois efeitos: a manipulação das efemérides difundidas e a desestabilização do relógio dos satélites, designados respectivamente por erro "epsilon" e "dither". Isto faz com que os dados enviados pelo sinal do satélite cheguem adulterados, causando a diminuição da precisão anteriormente mencionada. Para o posicionamento de pontos isolados determinados por pós-processamento, resultados melhores podem ser obtidos utilizando-se de efemérides precisas para todos os satélites do sistema. Além da posição tridimensional (x, y, z) obtém-se também informações de correção dos relógios dos satélites, isto pode ser obtido via internet; os arquivos fornecidos são encontrados no endereço <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/>, e tem o seguinte padrões: IGS08380-6.SP3 - arquivo das efemérides GPS-IGS para os dias 0-6, semana 0838 no formato SP3, IGS08387.ERP - parâmetros de rotação da Terra (ERP) associados com as efemérides e IGS08387.SUM - relatório completo. Quando a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) for implementada, e o IBGE calcular efemérides precisas no âmbito nacional, este tipo de aplicação poderá tornar-se mais comum.

Este trabalho propõem o desenvolvimento de um programa para posicionamento de pontos através da técnica do Filtro de Kalman e utiliza as efemérides precisas que são fornecidas em intervalos de 15 minutos, no formato de divulgação (SP3), assim é necessário por meio de técnicas de interpolação ou propagação passá-las para o formato conhecido como SP1, ou seja para os intervalos de observações, geralmente de 15 segundos.

2. MODELO MATEMÁTICO

A pseudo-distância, derivada do código, é a distância medida entre o satélite e a antena do receptor, na época de transmissão e recepção dos sinais, isto corresponde ao produto da velocidade da luz pelo tempo de deslocamento necessário para a máxima correlação da seqüência de código emitido pelo satélite e a réplica gerada pelo receptor, considerando o relógio do satélite e do receptor sincronizados. Dependendo do receptor podem ser obtidas uma, duas ou três pseudo-distâncias, através dos códigos C/A e P₁ em L₁ e do código P₂ em L₂. Porém devido ao "Anti-Spoofing" (AS) os códigos P são encriptados, reduzindo a precisão.

Os relógios dos receptores e dos satélites não são sincronizados entre si e não coincidem com o sistema de tempo GPS. Devido ao não sincronismo entre os relógios dos receptores e dos satélites, dos quais derivam os códigos, a quantidade medida difere da distância geométrica entre o satélite e o receptor. Além disso a propagação através da troposfera e da ionosfera, que provoca um retardo, afeta diretamente a medida da pseudo-distância.

A expressão geral para a pseudo-distância, que representa a diferença de tempo, no escala de tempo do receptor, entre o tempo de recepção (t_r) do sinal no receptor e o tempo de transmissão (t^s) do mesmo pelo satélite, multiplicada pela velocidade da luz no vácuo, num sistema teórico livre dos erros pode ser dada por:

$$P_r^s = c (t_r - t^s), \quad (1)$$

que pode ser reescrita, agora considerando o efeito da atmosfera como:

$$P_r^s = \rho_r^s + c (dt^s - dt_r) + I_r^s + T_r^s + \varepsilon_p, \quad (2)$$

onde:

- ρ_r^s - representa a distância geométrica entre o satélite (s) e a antena do receptor (r);
c - velocidade da luz no vácuo;
 dt^s - estado do relógio do satélite no sistema de referência do relógio do satélite (t^s), em relação ao tempo GPS;
 dt_r - estado do relógio do receptor no sistema de referência do relógio do receptor (t_r), em relação ao tempo GPS;
 I_r^s - erro devido a ionosfera, atraso ionosférico;
 T_r^s - erro devido a troposfera, atraso troposférico; e
 ε_p - erros aleatórios e erros não modelados, tais como: multicaminho, ruído dos receptores, efemérides, efeito relativístico, etc.

O estado do relógio do satélite e do receptor representa o erro de sincronismo entre o sistema de tempo GPS e os respectivos relógios, e relacionam com o sistema de tempo GPS (T) através das expressões:

$$T^s = t^s - dt^s, \quad (3)$$

$$T_r = t_r - dt_r, \quad (4)$$

no instante de transmissão e recepção respectivamente. Assim tem-se que:

$$\rho_r^s = c (T^s - T_r), \quad (5)$$

que pode ser obtido através das componentes do vetor de posição do satélite (X^s, Y^s, Z^s) e do receptor (X_r, Y_r, Z_r), ambos no Sistema Convencional Terrestre (SCT) Geocêntrico, por meio da expressão:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}, \quad (6)$$

assim a equação da pseudo-distância passa a ser dada por:

$$P_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} + c(dt^s - dt_r) + I_r^s + T_r^s + \varepsilon_p. \quad (7)$$

Nesta equação as incógnitas são as coordenadas da estação (X_r, Y_r, Z_r); as coordenadas dos satélites (X^s, Y^s, Z^s) e os dt^s são obtidos a partir do arquivo de efemérides precisas, e não das efemérides difundidas junto com as mensagens de navegação, o dt_r pode ser representado por meio de um polinômio (Galo, 1989), cujos coeficientes (B_0, B_1, B_2) são considerados como incógnitas no ajustamento, ou obtido por meio de um software que converte os dados para o formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) (Gurtner e Mader, 1990); para a modelagem da correção ionosférica utiliza-se do modelo desenvolvido por Klobuchar (Hofmann et al., 1993) e a da correção troposférica por meio de um modelo, por exemplo o modelo de Goad e Goodman (Leick, 1995).

O Filtro de Kalman, que é um ótimo método para estimar o vetor de estado, que na comunidade geodésica é conhecido como vetor dos parâmetros com variação temporal, de um sistema dinâmico estocástico a partir de observações com flutuações probabilísticas, pode ser utilizado para posicionamento absoluto cinemático ou estático, bem como nos relativos. No caso

do modo absoluto estático ele funciona como um ajustamento seqüencial. O Filtro consiste de duas partes, que constituem uma predição e uma filtragem.

A predição fornece a estimativa para o vetor de estado para uma época t_k , baseados em dados anteriores a esta época, bem como a sua matriz variância-covariância (MVC) a partir das expressões (Camargo, 1992):

$$X_{k/k-1} = T_{k/k-1} X_{k-1/k-1}, \quad (8)$$

e

$$\Sigma_{X_{k/k-1}} = T_{k/k-1} \Sigma_{X_{k-1/k-1}} T_{k/k-1}^T + \Sigma_{W_k}. \quad (9)$$

A filtragem do vetor de estado da época t_k e sua MVC, com base nas observações e estimativas preditas para a época., são dados por:

$$X_{k/k} = X_{k/k-1} + K_k (L_k^b - A_k X_{k/k-1}), \quad (10)$$

e

$$\Sigma_{X_{k/k}} = (I - K_k A_k) \Sigma_{X_{k/k-1}}, \quad (11)$$

onde:

$$K_k = \Sigma_{X_{k/k-1}} A_k^T (A_k \Sigma_{X_{k/k-1}} A_k^T + \Sigma_{L_k^b})^{-1}. \quad (12)$$

A matriz K , conhecida como matriz ganho de Kalman, leva a uma estimativa ótima, ou seja, a uma estimativa de variância mínima.

O índice k nas equações acima refere-se a época t_k , que pode assumir valores entre t_0, t_1, \dots, t_n , não necessariamente eqüidistantes. Na equação (8) a matriz $T_{k/k-1}$ que interliga os dois vetores de estado é conhecida como matriz de transição e ela faz a transformação linear do vetor da época t_{k-1} para a época t_k , na equação (9), Σ_{W_k} é a MVC do vetor das correções ao modelo dinâmico que afeta o estado durante o intervalo entre as duas épocas. Este vetor é também designado por vetor dos ruídos brancos gaussianos do sistema, vetor do processo randômico gaussiano do sistema ou vetor das perturbações do modelo. Na equação (10) L_k^b , representa o vetor das observações de cada época e A_k a matriz das derivadas parciais das equações de observações em relação aos parâmetros.

Se o Filtro de Kalman for utilizado como ajustamento seqüencial, a matriz de transição torna-se uma matriz identidade e Σ_{W_k} deixará de existir, pois trata-se neste caso de um modelo não dinâmico, e sim estático.

A partir da equação (7), que representa um equação de observação de pseudo-distância, e das equações do Filtro de Kalman, na forma seqüencial, pode-se montar as matrizes que fornecem as coordenadas de um determinado ponto. Considerando por exemplo, que foram observados n satélites simultaneamente, a partir dos quais se obteve as pseudo-distâncias, numa determinada época, assim ter-se-á um sistema de n equações de observações correspondente à equação (7) a três incógnitas, que correspondem as coordenadas do ponto (X_r, Y_r, Z_r), admitindo que o erro de sincronização do relógio do receptor com respeito ao sistema de tempo GPS seja conhecido. Caso contrário terá que ser acrescentados três incógnitas, que correspondem aos coeficientes (B_0, B_1, B_2) do polinômio que modela este erro de sincronização.

A resolução do problema com o Filtro de Kalman, pressupõe que as condições iniciais sejam conhecidas, ou seja as coordenadas aproximadas da estação, bem como a sua MVC.

$$X_{0/0} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad e \quad \Sigma_{X_{k/k-1}} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_0}^2 & & \\ & \sigma_{Z_0}^2 & \\ & & \sigma_{Z_0}^2 \end{bmatrix}$$

A predição no caso de processamento absoluto terá o seguinte aspecto :

$$X_{k/k-1} = X_{k-1/k-1}, \quad (13)$$

e

$$\Sigma_{X_{k/k-1}} = \Sigma_{X_{k-1/k-1}}, \quad (14)$$

onde $X_{k/k-1} = [X_{k/k-1} \ Y_{k/k-1} \ Z_{k/k-1}]^T$; quando $k = 1$, atribui-se as condições iniciais na segunda parcela da expressão, caso contrário são os valores obtido na processo de filtragem. A mesma consideração é válida para a MVC.

No processo de filtragem, as matrizes e os vetores envolvidos, considerando que foram coletadas pseudo-distâncias de n satélites, terão os seguintes aspectos, de acordo com a equação (10):

$$\begin{bmatrix} X_{k/k} \\ Y_{k/k} \\ Z_{k/k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{k/k-1} \\ Y_{k/k-1} \\ Z_{k/k-1} \end{bmatrix} + K_k \left(\begin{bmatrix} P_r^{S1} \\ P_r^{S2} \\ \vdots \\ P_r^{Sn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{X_{S1}-X_{k/k-1}}{Dist_r^{S1}} & -\frac{Y_{S1}-Y_{k/k-1}}{Dist_r^{S1}} & -\frac{Z_{S1}-Z_{k/k-1}}{Dist_r^{S1}} \\ -\frac{X_{S2}-X_{k/k-1}}{Dist_r^{S2}} & -\frac{Y_{S2}-Y_{k/k-1}}{Dist_r^{S2}} & -\frac{Z_{S2}-Z_{k/k-1}}{Dist_r^{S2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{X_{Sn}-X_{k/k-1}}{Dist_r^{Sn}} & -\frac{Y_{Sn}-Y_{k/k-1}}{Dist_r^{Sn}} & -\frac{Z_{Sn}-Z_{k/k-1}}{Dist_r^{Sn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{k/k-1} \\ Y_{k/k-1} \\ Z_{k/k-1} \end{bmatrix} \right), \quad (15)$$

com :

$$dist_r^{Si} = \sqrt{(X_{Si} - X_{k/k-1})^2 + (Y_{Si} - Y_{k/k-1})^2 + (Z_{Si} - Z_{k/k-1})^2}, \quad \text{para } i = 1, \dots, n.$$

3. TESTES E RESULTADOS

Com o objetivo de testar o modelo proposto foi desenvolvido um programa que envolve todas as equações apresentadas; e os dados utilizados foram obtidos pela estação PARA do Laboratório de Geodésia por Satélite pertencente ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná (CPGCG/UFPR). A pseudo-distância utilizado no processamento foi obtida a partir do código C/A, o arquivo RINEX foi montado por meio de um programa da TRIMBLE, que calcula o erro de sincronismo do relógio do receptor. Nos gráficos abaixo podem ser vistos as diferenças das coordenadas obtidas pelo método proposto em relação a coordenadas fixa da estação PARA.

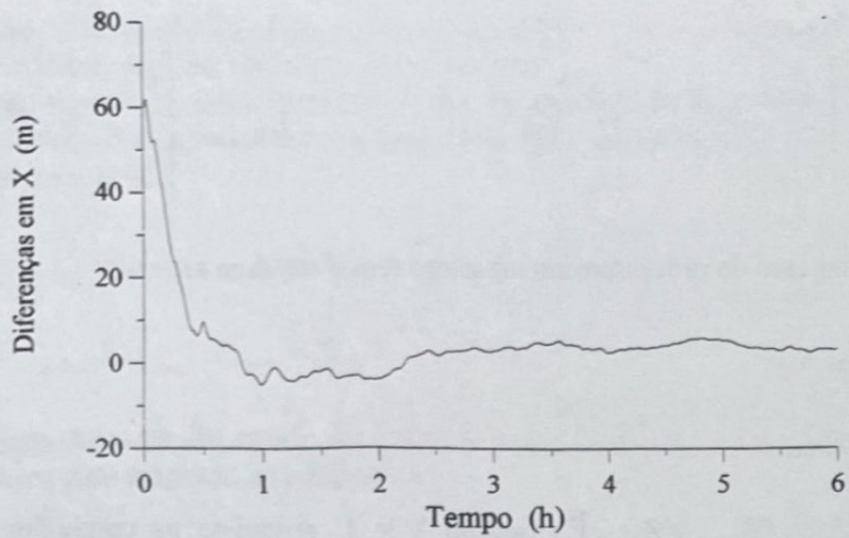


Fig. 1 - Gráfico das diferenças entre as coordenadas X

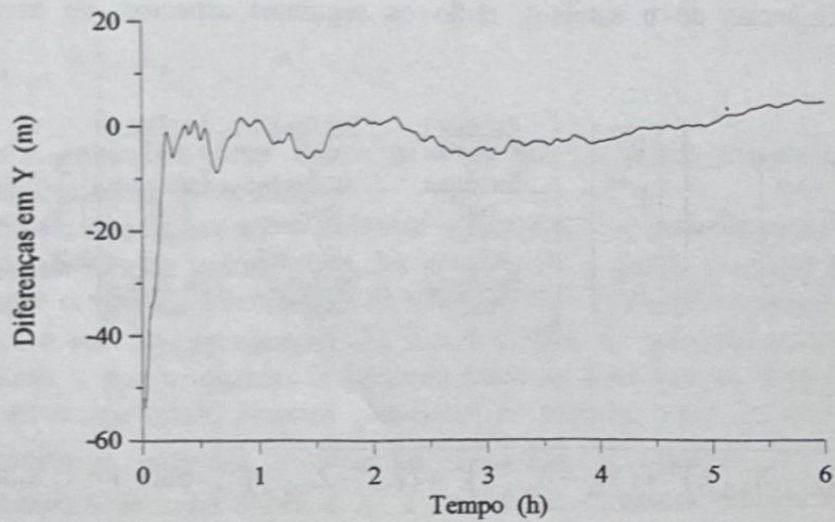


Fig. 2 - Gráfico das diferenças entre as coordenadas Y

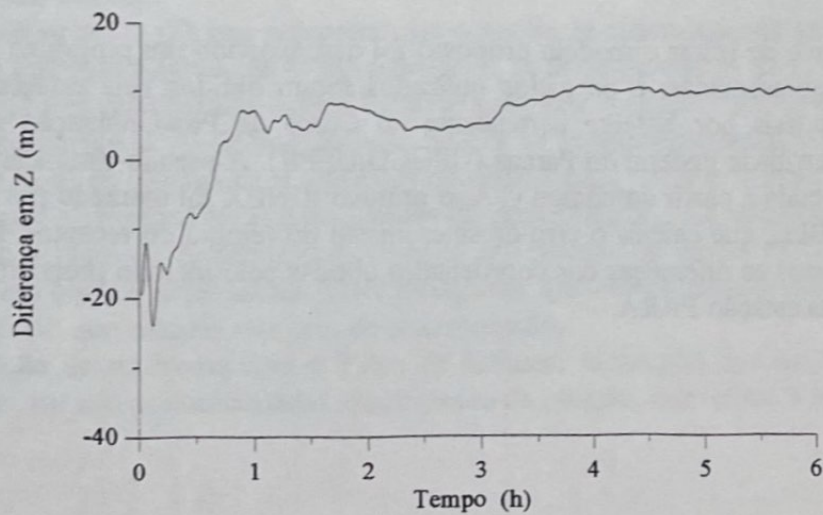


Fig. 3 - Gráfico das diferenças entre as coordenadas Z

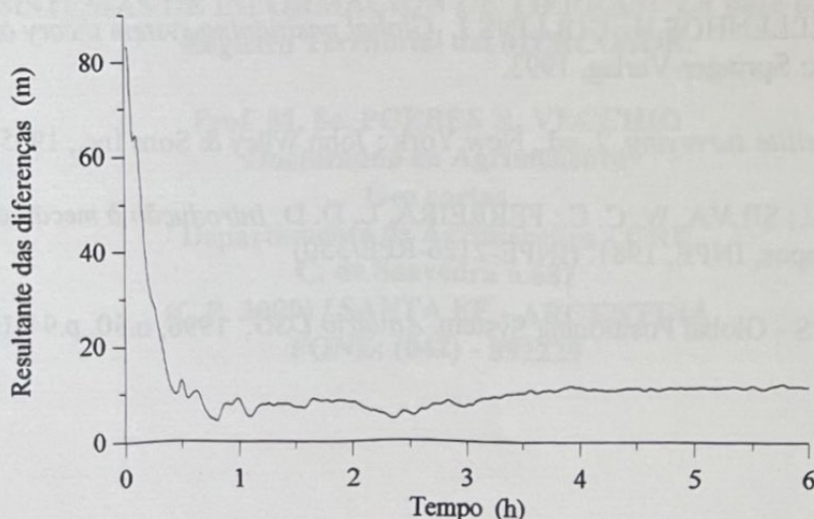


Fig. 4 - Gráfico das resultantes das diferenças

4. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

O Filtro de Kalman apresenta qualidades desejadas para o processamento de dados GPS, pois ele é recursivo no sentido de que não há necessidade de se armazenar todas as informações recebidas; isto significa que o algoritmo trabalha com as últimas estimativas e as informações mais recentes, sendo muito empregado para processamento em tempo real; é ótimo no sentido de que as estimativas são de variância mínima. Porém, para a sua utilização, é necessário o conhecimento da dinâmica do sistema e do processo de observações (modelos funcionais), das descrições estatísticas das correções das incertezas do sistema dinâmico e das observações (modelos estocásticos), e de informações disponíveis sobre as condições iniciais das variáveis de interesse. No algoritmo do Filtro é fácil de implementar controle de qualidade, e assim detectar observações eivadas de erros grosseiros. Esta implementação consiste numa segunda etapa deste trabalho.

As coordenadas no formato SP1 foram obtidas através de um propagador desenvolvido no CPGCG/UFPR, baseado no método de três vetores de posições para determinação de órbita (Pilchowski et al., 1981).

Com base no experimento realizados obteve-se a precisão conseguida pelo usuário Serviço de Posicionamento Preciso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMARGO, P. O. *Controle de qualidade aplicado ao Filtro de Kalman*. Curitiba, 1992. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- GALO, M. Exatidão do posicionamento pelo GPS, utilizando observações de pseudo-distância. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, XIV. *Anais da SBC*. Gramado/RS, 1986, v.1, p.181-188.
- GELB, A. et al. *Applied optimal estimation*. 7. ed., Cambridge: The M.I.T. Press, 1982.
- GURTNER, W.; MADER, G. *The RINEX format: current status, future developments*. Ottawa: GPS'90, 1990, p.977-992.

HOFMANN, B.; WELLENHOF, H.; COLLINS, J. *Global positioning system theory and practice*.
2. ed., New York: Springer-Verlag, 1993.

LEICK, A. *GPS satellite surveying*. 2. ed., New York : John Wiley & Sons Inc., 1995.

PILCHOWSKI, H. U.; SILVA, W. C. C.; FERREIRA, L. D. D. *Introdução à mecânica celeste*.
São José dos Campos, INPE, 1981. (INPE-2126-RPE/350)

SOARES, S. M. GPS - Global Positioning System. *Anuário DSG*, 1996, n.30, p.94-100..