

Receptor GPS em Software

Fabício de Araújo Carvalho, Alexandre Boa Ventura Oliveira, F. Walter

Resumo – O atual estágio de desenvolvimento do receptor GPS em Software é apresentado, destacando as características do sinal GPS e as etapas de processamento em software: correlator e a interface com o usuário. O uso do receptor para o estudo dos erros devido à atmosfera também é mostrado.

Palavras-chave – GPS, Correlator, Receptor por Software, DSP, correlação, PRN.

Abstract – The current development of GPS software receiver is presented, detaching the characteristics of the GPS signal and the stages of processing in software: correlator and the interface with the user. The use of the receiver to study errors due to the atmosphere also is shown.

Keywords - GPS, Correlator, Software Receiver, DSP, correlation, PRN.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um receptor GPS em “software” para o sinal L1 é descrito. Para o teste do seu funcionamento foram gerados os dados transmitidos pelos satélites GPS incluindo os efeitos do canal entre o transmissor (satélite) e o usuário (receptor), tais como: o atraso produzido pela atmosfera (ionosfera mais a troposfera) e o efeito Doppler. O receptor consiste basicamente de um correlator e de uma interface com o usuário mostrando sua posição.

II. SINAL GPS

Os sinais transmitidos pelos satélites GPS transportam as informações necessárias para que receptores possam determinar a sua localização. A informação é uma seqüência de dados binários representados na expressão:

$$D_i(t) = \sum_k d_{ik} \prod \left[\frac{t - kT_b}{T_b} \right] \quad (1)$$

onde: $D_i(t)$ é o trem de pulso para o $i^{\text{ésimo}}$ satélite; d_{ik} é o valor do bit k ; e T_b o período do pulso retangular (50 Hz) representado por Π [..].

Os bits de dados modulam um código pseudo-aleatório (PRN), o qual é responsável pelo espalhamento espectral do sinal.

As portadoras, L1 e L2, transmitidas pelos satélites estão na banda 1 a 2 GHz e são moduladas por seqüências PRN distintas.

Estas portadoras utilizam a mesma freqüência de referência (10,23 MHz) que ao ser multiplicada por um fator de 154, para L1, e 120, para L2, gera as freqüências de 1.575,42 MHz e 1.227,6 MHz, respectivamente. A freqüência de referência é também empregada para obter a taxa do código PRN e dos dados de navegação.

O código PRN utilizado pela componente em fase do sinal L1 (sinal de interesse) é denominado por código C/A (Coarser Acquisition) e apresenta uma taxa de 1,023 MHz. O código C/A pertence à família de códigos de Gold, podendo ser representado por:

$$C_i(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_{in} \prod \left[\frac{t - nT_{chip}}{T_{chip}} \right] \quad (2)$$

$C_i(t)$ representa o código C/A do $i^{\text{ésimo}}$ satélite, sendo c_{in} igual 1 ou 0, com duração T_{chip} (1/ 1,023 MHz) e N o comprimento do código (1023 “chips”).

O termo “chip” é usado amplamente na área de navegação global por satélites (GPS, GLONASS e Galileo) para distinguir o bit de código do de informação (usado para os dados de navegação).

O sinal $C_i(t)$ é periódico (3) e se repete a cada intervalo de duração T_p , que corresponde a $T_{chip} \times N$.

$$C_i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} c_{in} \prod \left[\frac{t - nT_{chip} - kT_p}{T_{chip}} \right] \quad (3)$$

Tabela I: Polinômios geradores de código PRN

Reg.	Polinômio
G1(t)	$1 \oplus x^3 \oplus x^{10}$
G2(t)	$1 \oplus x^2 \oplus x^3 \oplus x^6 \oplus x^8 \oplus x^9 \oplus x^{10}$

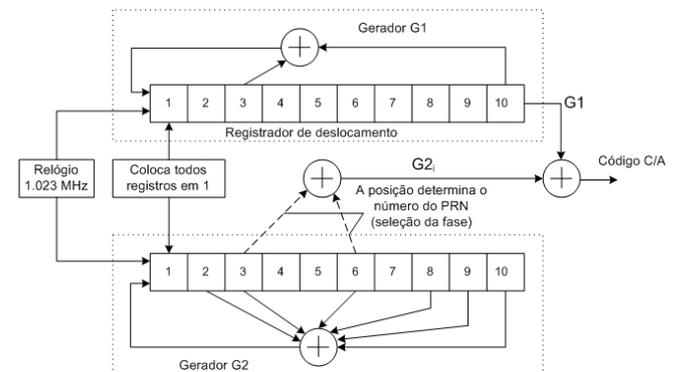


Fig. 1 Gerador do código C/A. A seleção de fase é definida pelo par de células utilizadas como saída no gerador G2(t).

O código C/A é gerado através de dois geradores de deslocamento linear, contendo, cada um, dez células. O

número “n” de células determina o comprimento do código, resultando, para n = 10, em um período de 1 ms ($N = 2^n - 1 = 1023$). Estes geradores são descritos através dos polinômios: G1(t) e G2(t) mostrados na Tabela I.

O polinômio indica a operação soma módulo-2, \oplus , entre as células do registrador, identificadas através de seu expoente. O algoritmo gerador do código C/A é ilustrado na Figura 1 [1]. São gerados no sistema GPS 36 códigos C/As através da operação soma módulo-2 e de uma adequada realimentação e seleção de fase.

O espectro para o código C/A pode ser observado no gráfico da Figura 2.

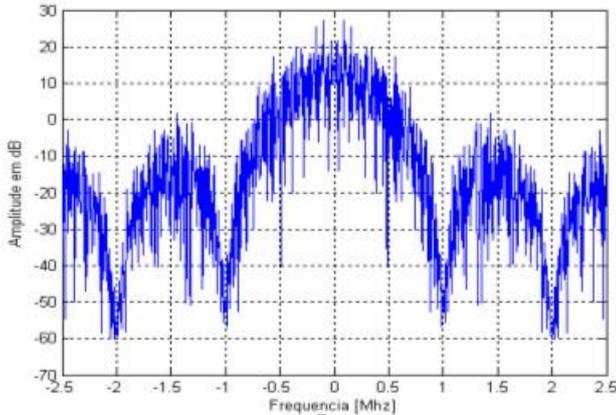


Fig. 2. Espectro de frequência do código C/A (PRN 2) em banda base. Largura de faixa de 2,046 MHz.

O código C/A foi adotado devido às suas características de autocorrelação e correlação cruzada (Figuras 3 e 4).

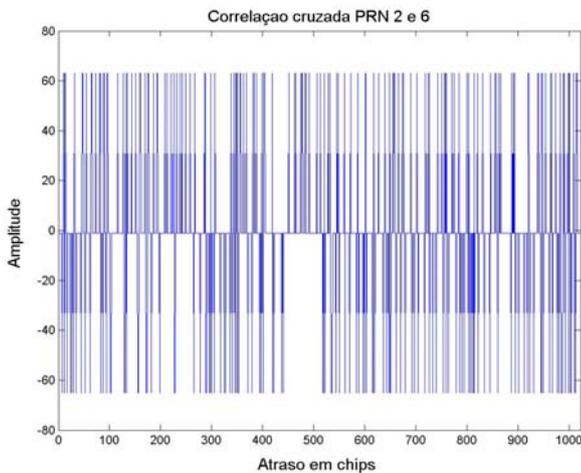


Fig. 3. Correlação cruzada entre os PRNs 2 e 6, com passo de código inteiro.

A correlação para códigos distintos apresenta baixos valores de amplitude: -65, -1 e 63.

No caso da autocorrelação, o valor de amplitude chega a 1023 (para códigos alinhados), mas os valores para atrasos do código superiores a um chip são semelhantes ao da correlação cruzada.

A grande diferença entre o pico de máxima correlação e os picos de correlação cruzada corresponde ao ganho de processamento obtido durante os processos de aquisição e o de rastreamento.

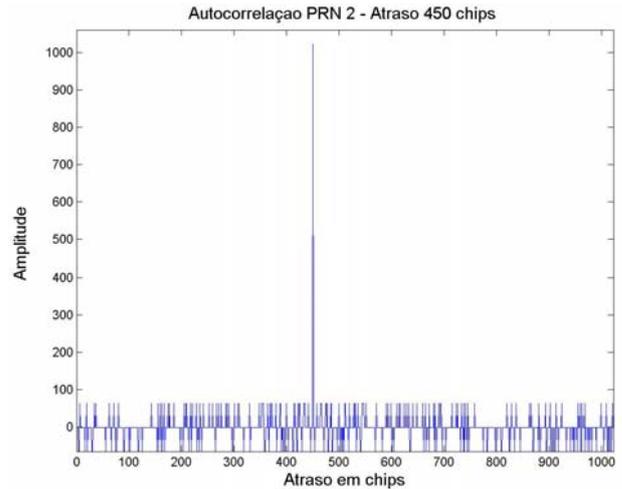


Fig. 4. Autocorrelação para o PRN 2, com atraso de 450 chips evidenciando o pico de correlação.

O sinal transmitido, mostrado na Figura 5, é um sinal BPSK e pode ser representado pela eq. (4):

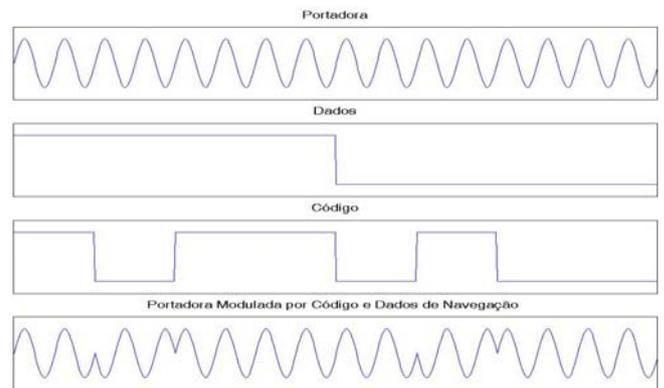


Fig. 5. Ilustração do sinal GPS. De cima para baixo: portadora, dados, código PRN e sinal L1 em fase.

$$L_i(t) = \sqrt{2P_c} \underbrace{C_i[t - \tau(t)] \cdot D_i[t - \tau(t)]}_{\text{Sinal de interesse } S_i(t)} \cos(2\pi(f_{L1} + f_{Di})t + \theta_i) \quad (4)$$

onde: L_i é o sinal recebido; $\tau(t)$ o atraso do sinal, P_c a potência recebida; $C_i(t)$ o código C/A; $D_i(t)$ os dados de navegação; f_{L1} a frequência da portadora L1; e f_{Di} a frequência Doppler [2].

O sinal GPS é simulado para uma avaliação do correlator, [3] sendo composto pelos sinais de um número variável de satélites, cada sinal, caracterizado por um único código C/A e um dado valor de Doppler e atraso, bem como dados de navegação que indicam sua posição.

O Doppler na frequência de portadora se deve ao movimento relativo entre satélite e receptor e varia de ± 5 kHz em relação à frequência central, podendo chegar a ± 10 kHz para usuários com alta dinâmica.

III. SINAL RECEBIDO

Ao ser recebido pela antena do receptor, o sinal GPS apresenta uma potência da ordem de 10^{-16} watts (-160 dBw), bem abaixo do ruído térmico presente no meio (cerca de -141 dBw). Este valor de ruído é calculado em função da

largura de faixa, B, do sinal de interesse (2,046 MHz do código do C/A), através da expressão: $N_{ent} = kTB$, onde k corresponde à constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K) e T à temperatura dada em Kelvin.

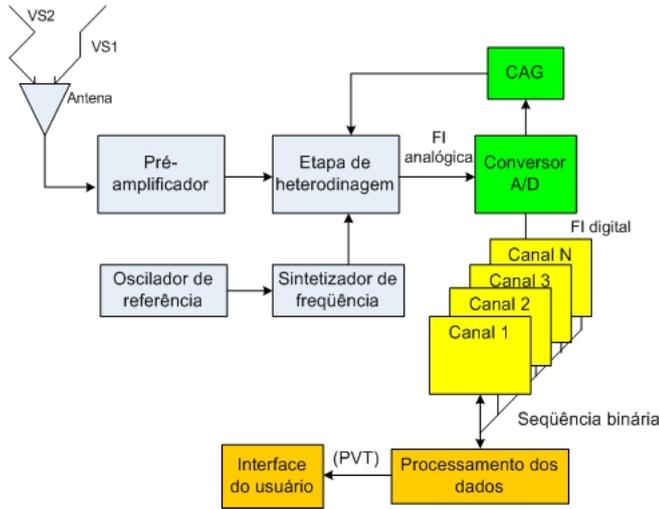


Fig. 6. Diagrama em blocos de um receptor GPS típico. Os blocos em azul correspondem à etapa de heterodinagem, seguida pelo conversor A/D sinalizado em verde. A etapa de correlação em amarelo ilustra os N canais operando paralelamente, seguido pelo processamento da mensagem de navegação, em laranja.

O processo de condicionamento do sinal é normalmente implementado em duas ou três etapas de heterodinagem, durante as quais o sinal GPS sofre sucessivas ampliações obtendo um ganho final aproximado de 100 dB e uma FI aproximadamente 1000 vezes inferior que a RF recebida. Tal processo pode ser abstraído através da análise espectral do sinal (Figura 7):

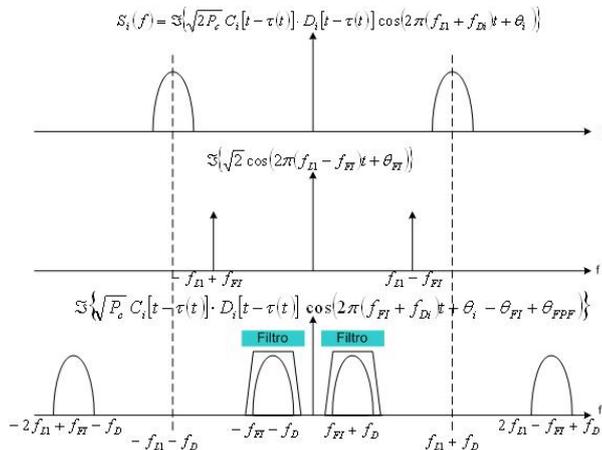


Fig. 7. Análise espectral da heterodinagem e escolha da FI inferior através de um filtro passa faixa.

Após o condicionamento do sinal, a última FI (analógica) deve ser então digitalizada para que o restante do processamento possa ser feito através de software.

A Figura 8 ilustra a digitalização da FI analógica através da subamostragem. A FI analógica adotada foi de 21,25 MHz e o conversor A/D de 5 Msps com palavra de 16 bits. Alguns cuidados são levados em consideração para que os processos, de aquisição e de rastreamento não sejam prejudicados pela digitalização.

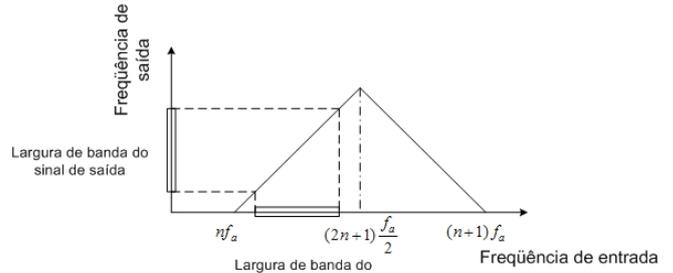


Fig. 8 Forma correta da subamostragem, evitando o aliasing.

O primeiro deles é respeitar o critério de Nyquist e certificar que a taxa de amostragem não seja um múltiplo da taxa do código C/A. É importante também adotar o mesmo referencial de tempo para o *downconverter* e para o conversor A/D. Caso o conversor seja de 1 bit é necessário o uso do CAG (controlador de ganho automático).

IV. PROCESSAMENTO DO SINAL

A primeira etapa de processamento por software ocorre no correlator implementado em um DSP, o TMS 320C6711. Nele o processamento é dividido em etapas, denominadas por: Aquisição, Confirmação, Alinhamento e Rastreamento, cada qual com uma função específica [4].

A Aquisição tem como função estabelecer um alinhamento grosseiro entre o sinal BPSK gerado internamente (no correlator) com a FI digitalizada. Para tal, o correlator consulta o almanaque (dados das efemérides de todos os satélites, enviados junto com as mensagens de navegação) os prováveis PRNs visíveis (satélites) e os aloca nos canais disponíveis. Alocados os PRNs tem início à busca bidimensional para identificar o atraso do código e a frequência de portadora (Figura 9).

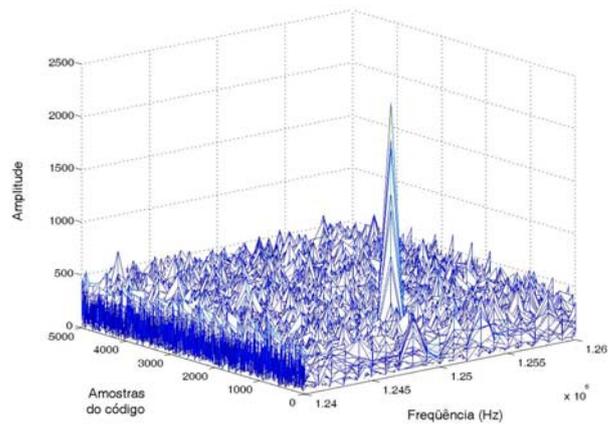


Fig. 9. Resultado do processo de correlação. Busca bidimensional. Atrazo de 1000 amostras e Doppler de 1kHz.

No final da aquisição, os dados de atraso e do Doppler, são transferidos para a etapa de Confirmação.

A etapa de Confirmação reduz a probabilidade de falso alarme gerado pelo ruído através do uso do algoritmo de detecção Tong [5]. Durante esta etapa são realizadas as correlações entre o sinal recebido com o sinal interno gerado com os parâmetros, fornecidos pela etapa anterior. Este processo de confirmação é repetido até que o número de



Fig. 13. Dados de efemérides (Segundos da semana GPS: 404582) extraídos dos sub-quadros 1, 2 e 3 da Figura 11. A posição do satélite calculada é mostrada como X, Y e Z, bem como as coordenadas geográficas correspondente ao datum WGS-84, Latitude, Longitude e Altitude.

Cada sub-quadro é composto por 10 palavras e cada palavra possui 30 bits. A Figura 12 mostra as palavras 1 e 2, usadas para identificar o sub-quadro.

Cada sub-quadro começa com um cabeçalho (preâmbulo) dado pelo conjunto de bits [10001011] na primeira palavra (telemetria – TLM). Na segunda palavra HOW (do Inglês – “hand over word”) os bits 20 – 22 são a identificação dos sub-quadros. A Figura 11 mostra os sub-quadros 1, 2 e 3 completos de um satélite GPS.



Fig. 14. Interface para visualização da posição dos satélites no Laboratório GNSS do ITA (SOW - 471395) para o dia 20 de abril de 2007. A Distribuição geométrica: HDOP (Horizontal Dilution Of Precision) - 0,67; GDOP (Geographic DOP) - 1,72; PDOP (Position DOP) - 1,55; e o VDOP (Vertical DOP) – 1,40 são mostradas.

O GPS em software extrai os dados de navegação (efemérides) dos sub-quadros 1, 2 e 3 e calcula a posição de cada satélite. A Figura 13 mostra os dados de efemérides extraídos da mensagem de navegação apresentada anteriormente (Figura 11), outros detalhes do GPS em software para plataforma PC podem ser encontrados em [5].

VI – INTERFACE DO GPS EM SOFTWARE

As interfaces para visualização dos dados GPS foram desenvolvidas em Labview 8[®]. A Figura 14 mostra a posição dos satélites calculada utilizando-se os dados de efemérides extraídos da mensagem de navegação (sub-quadros 1, 2 e 3).

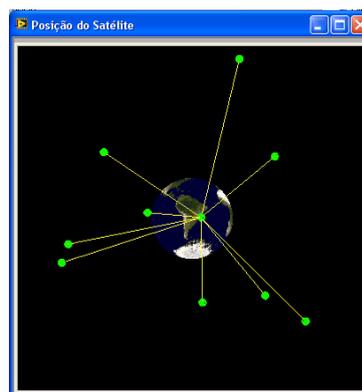


Fig. 15. Interface para visualização da posição dos satélites em formato 3D no ITA (SOW - 471395) para o dia 20 de abril de 2007.

Na Figura 14 o centro em vermelho corresponde ao ponto real onde se encontra a antena GPS no ITA (Latitude: 23°12'34,199772”, Longitude: 45°52'28,503880” e Altitude: 603,0675). O centro dos círculos representa o elevação de 90° e cada círculo subsequente representa uma diferença de 10° na elevação (80°, 70°, ... , 0°). A Figura 15 mostra a visualização em 3D da posição dos mesmos satélites da Figura 14.

A Figura 16 mostra a posição do usuário calculada utilizando-se os 9 satélites da Figura 14.

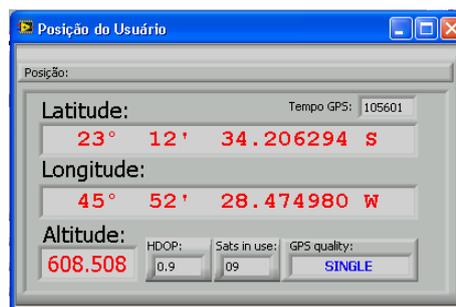


Fig. 16. Interface para a visualização da Latitude, Longitude e Altitude calculada pelo GPS em software.

VII – ESTUDO DOS ERROS NO SISTEMA GPS

Com o GPS em software é possível avaliar o efeito de erros como o da troposfera e ionosfera [6]. A Figura 17 mostra o cálculo da posição do usuário quando existe a presença do efeito da troposfera e da ionosfera juntos. O CEP (Circular Error Probability), probabilidade de erro em um círculo em torno da posição real no plano xy calculado foi de 9,6876 m em relação à posição real. O SEP (Spherical Error

Probable), erro provável em torno de uma esfera que tem como centro a posição real (plano xyz) foi de 33,5392 m.

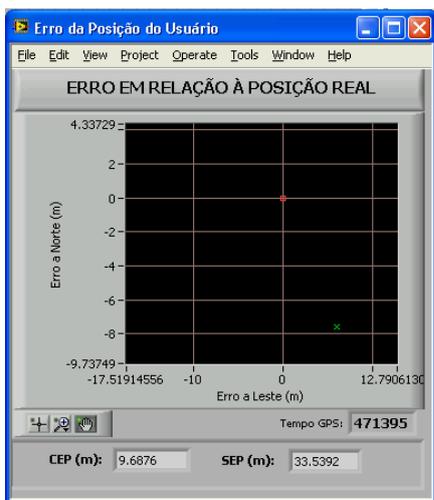


Fig. 17. Cálculo da posição do usuário sob o efeito da troposfera e da ionosfera. Ponto vermelho corresponde à posição real no ITA (X= 4083783,9004, Y= -4210399,3147, Z= -2498296,1764) e o ponto verde a posição calculada. CEP = 9,6 m e SEP= 33,5 m.

A Figura 18 mostra o erro em X, Y e Z da posição calculada em relação à posição real quando existe a presença dos erros da troposfera e da ionosfera.

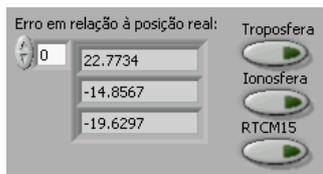


Fig. 18. Erro em X, Y e Z quando existe o efeito da troposfera e da ionosfera.

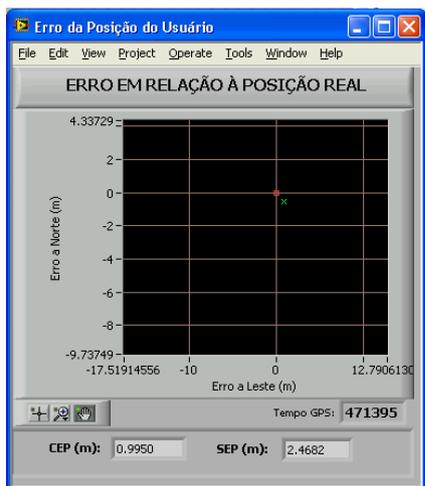


Fig. 19. Cálculo da posição do usuário sem o efeito da troposfera e da ionosfera. Ponto vermelho corresponde à posição real no ITA (X= 4083783,9004, Y= -4210399,3147, Z= -2498296,1764) e o ponto verde a posição calculada. CEP = 0,9950 m e SEP= 2,4682 m.

A Figura 19 mostra o cálculo da posição do usuário quando os efeitos da troposfera e da ionosfera são retirados. O erro da ionosfera de cada satélite foi extraído utilizando-se a

relação entre as pseudodistâncias medida em L1 e L2. O erro da troposfera de cada satélite foi calculado através do modelo de Hopfield. [7]. O CEP calculado foi de 0,995 metros em relação à posição real. O SEP foi de 2,4682 metros.

A figura 20 mostra a mesma avaliação anterior quando os erros da troposfera e da ionosfera são excluídos. Pode-se observar uma grande aproximação para as coordenadas reais X, Y e Z.

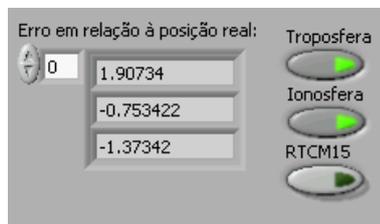


Fig. 20. Erro em X, Y e Z quando não existe o efeito da troposfera e da ionosfera.

VI – CONCLUSÕES

O receptor por software para processamento em tempo real se mostra uma ferramenta para a criação e validação de novos algoritmos de processamento, além de ter o caráter educativo, permitindo a utilização de novas técnicas para filtragem adaptativa, para redução do problema de multicaminho e erros da ionosfera e troposfera (dutos troposféricos). Esta mesma metodologia está sendo aplicada para receptores GLONASS e futuramente para o Galileo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi patrocinado por UNPD, ICAO e CTA/DECEA, através dos Projetos: “Formação de Recursos Humanos e Pesquisa para Aviação Civil”, Projeto CNS/ATM, e teve o apoio da FINEP através do Projeto Pseudo-Satélite (#01.04.0441.00) e RHODES (#01.05. 0154.00).

REFERÊNCIAS

- [1] J. B. Y. Tsui, *Fundamentals of Global Positioning System Receivers, A software approach*. Wiley Interscience Publication, 2000.
- [2] F. Walter, “ET-274, Notas de Aula”. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2003.
- [3] Carvalho, F. A. e F. Walter, “Receptor GPS por Software em Tempo Real. Parte I: Geração dos Sinais”, Anais do 12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA / 2006, São José dos Campos, SP, Brasil, out., 16 a 19.
- [4] Carvalho, F. A. e F. Walter, “Receptor GPS por Software em Tempo Real. Parte II: Correlator”, Anais do 12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA / 2006, São José dos Campos, SP, Brasil, out., 16 a 19.
- [5] Villalba, C., L. F. e F. WALTER: Receptor GPS por Software. In: 20º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – XX SBRT, Belém, PA, set, 2004.
- [6] Oliveira, Alexandre Boa Ventura; Moraes, Thiago Nunes de; Walter, Fernando. Global Behavior of Equatorial Anomaly since 1999 and Effects on GPS Signals. In: 11TH SAINT PETERSBURG INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS, 2004, Saint Petersburg, Russia, 2004.
- [7] Parkinson, Bradford W.; Spilker Jr. James J., *Global Positioning System: Theory and Applications- vol 1*. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Hopfield model, pp 534- 538, 1996.