

Sistema para Apontamento Programado de uma Antena

Leonardo L. O. Pires, Emanuel I. R. Gomes, Armando C. D. Rocha

Resumo - A necessidade do apontamento óptimo de uma antena a um satélite e métodos para o conseguir são assuntos explorados. O hardware e em particular o software de uma implementação económica e robusta levada a cabo para uma antena parabólica de 3,5 m são descritos.

Abstract - The requirement of automatic antenna tracking on Earth-Satellite links and approaches used to cope with the problem are discussed. The hardware and mainly the software of a cheap and reliable implemented solution for a 3,5 meter parabolic antenna are described.

I. INTRODUÇÃO

O uso de satélites para serviços de telecomunicações fixos ou móveis, detecção remota, apoio à navegação e outras aplicações tem conhecido um aumento substancial. As órbitas utilizadas são dos mais diversos tipos mas neste caso vamos apenas referir-nos a órbitas geoestacionárias (ou quasi-geoestacionárias) que são usadas em telecomunicações e experiências de propagação na troposfera. A recepção de sinais de um satélite geoestacionário não é contudo sempre uma tarefa tão simples como os habituais sistemas domésticos instalados correntemente para recepção de TV deixariam prever. Os problemas encontrados para aplicações mais específicas são discutidos e uma solução suficiente para um determinado objectivo é apresentada.

A. Órbita geoestacionária e satélites geoestacionários

Um satélite descrevendo uma órbita circular executada no plano equatorial, no sentido directo e num período de 24 horas diz-se geoestacionário. O satélite, visto por um observador terrestre, apresenta uma elevação e azimute constantes. Contudo esta órbita ideal (válida apenas para dois corpos isolados, esféricos e homogéneos) é perturbada principalmente pelas forças gravíticas do Sol e da Lua - não coplanares com o plano da órbita -, pela pressão da radiação solar e pela não esfericidade da Terra.

A nave tenderá a descrever uma órbita ligeiramente elíptica num plano com uma inclinação em relação ao plano equatorial (desvio Norte-Sul) e a ser arrastada na direcção Este-Oeste. Um observador terrestre verá, excepto quando estiver sobre uma linha de longitude igual ao do ponto sub-satélite, uma variação periódica simultânea do azimute e da elevação.

Por outro lado os binários no satélite tendem a prejudicar o correcto apontamento da plataforma das antenas que em si é um problema distinto do anterior mas não menos grave.

Enquanto este segundo problema é resolvido com sistemas inerciais que usam o princípio da conservação do momento angular, as correcções de posição exigem acelerações lineares que são conseguidas por jactos de gás. O esgotamento deste combustível dita a vida útil do satélite pelo que novos métodos vêm sendo desenvolvidos para melhorar este desempenho [1].

Os desvios E-W devem ser periodicamente corrigidos por forma a cumprir os exigentes regulamentos aplicáveis contudo a correcção N-S pode ser suprimida prolongando a vida útil da nave. Esta solução foi aplicada no satélite Olympus, está a ser aplicada ao ACTS[2], ITALSAT1 e outros satélites. No momento actual a supressão destas manobras leva a um acréscimo da inclinação do plano da órbita de 0.8º/ano. Variações desta amplitude causam flutuações do azimute e elevação bastante gravosas para estações terrestres com antenas possuindo larguras de feixe muito estreitas (tipicamente inferiores a 1º).

B. Influência da órbita no sinal recebido por uma antena

A cobertura de determinada área da Terra não depende das variações de posição do satélite já que o mecanismo de apontamento da plataforma das antenas é bastante eficaz. As variações do nível de sinal recebido dependerão no entanto bastante da directividade da antena da estação terrestre (normalmente mais directiva que a do satélite).

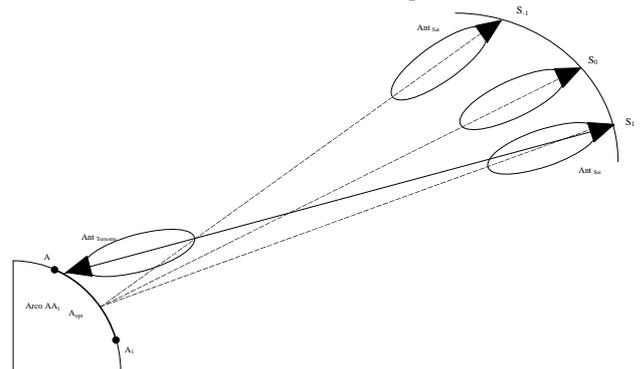


Fig 1 – Diagrama ilustrando a vantagem do apontamento de uma antena

A Fig 1 ilustra, num esquema a duas dimensões, o problema do apontamento de uma antena da estação terrestre. A antena do satélite Ant_{Sat} oscila entre as posições S_1 , S_0 e S_{-1} . O sinal máximo recebido é conseguido apenas para o ponto A_{opt} e a cobertura será satisfatória no arco AA_1 cuja extensão depende da directividade da antena do satélite. O apontamento óptimo da antena terrestre Ant_{Ter} exige que ela seja

sucessivamente apontada para S_1 , S_0 e S_{-1} sob pena do sinal recebido sofrer uma redução importante que será particularmente grave para um feixe muito estreito. A perda de sinal é quantificável se o diagrama de radiação das antenas for conhecido.

Repare-se que a supressão da variação do sinal recebido só será cancelada completamente se a antena terrestre estiver colocada sobre o ponto de recepção óptimo. Se a estação terrestre se situa numa zona de fraca cobertura observará o diagrama de radiação do satélite sobre um dos flancos onde a variação do ganho é bastante acentuada.

A redução do ganho, para uma antena de elevada directividade efectuando a recepção de um sinal com um ângulo pequeno θ em relação à máxima direcção de radiação, é dada por:

$$\Delta G = 12 \left(\frac{\theta}{\theta_{HPBW}} \right)^2 \text{ [dB]} \quad (1)$$

onde θ_{HPBW} é a largura de feixe a 3dB (HPBW). A largura de feixe a 3dB diminui com a relação λ/D onde D é o diâmetro da antena. A título de exemplo para uma antena de 3,5 m este valor será inferior a 1° para 12GHz.

II. APONTAMENTO DE UMA ANTENA

A recepção óptima do sinal, para os fins em vista, tem duas vantagens:

- A relação Sinal/Ruído é máxima o que permite medir atenuações mais elevadas.
- O sinal apresenta menores variações de amplitude pelo que o estabelecimento de patamares de referência para medições de propagação, designadamente atenuação, é mais fiável.

O apontamento da antena é assim desejável e consiste em manter o eixo óptico da antena alinhado com a posição do satélite independentemente do movimento de ambos.

Vários processos de apontamento são possíveis e o respectivo desempenho mede-se pelo erro de apontamento. As necessidades vão desde a ausência de apontamento por não ser necessário dada a elevada largura de feixe da antena em relação às excursões angulares do satélite, até ao apontamento com uma precisão de algumas centésimas da HPBW. Classificando os sistemas de um ponto de vista operacional podemos distinguir dois tipos: o apontamento em malha aberta e em malha fechada.

A. Apontamento em malha aberta

Normalmente a órbita do satélite é completamente caracterizada por seis parâmetros os quais são medidos em estações terrestres de controlo e telemetria (na Europa Darmstadt-Alemanha e Fucino-Itália). Aos interessados são fornecidas equações simples que permitem calcular o azimute e elevação num dado instante de tempo. Periodicamente o sistema de apontamento da antena calcula a elevação e azimute do satélite e ajusta as coordenadas desta recorrendo a um sistema mecânico previamente calibrado. O apontamento é então executado

em malha aberta sem determinar o erro de apontamento entre a posição real do satélite e a posição apontada.

O apontamento programado é usado em estações cujas antenas tem uma elevada razão λ/D e conseqüentemente um lóbulo principal relativamente largo.

B. Apontamento Automático em Malha Fechada

Neste caso é o próprio sinal recebido do satélite que será usado para determinar direcção de chegada da frente de onda.

Para antenas com um baixo valor de λ/D , e desta forma uma pequena largura de feixe relativamente ao movimento aparente do satélite, o seguimento é obtido alinhando de uma forma contínua a direcção da antena com uma baliza colocada no satélite. A precisão depende do método usado mas pode ser tão boa quanto 0.005° .

Um dos métodos mais conhecidos, podendo os outros ser considerados de alguma forma variantes, é o da pesquisa cónica (*conical scan*) [3]. O eixo óptico da antena é variado sobre um cone com uma abertura de uma fracção da HPBW por forma a tentar identificar a direcção mais favorável. A partir do momento em que o sinal recebido não apresenta variação durante o varrimento significará que o eixo do cone coincide com a perpendicular à frente de onda.

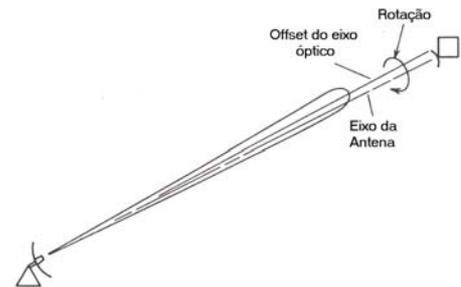


Fig 2 – Apontamento automático por pesquisa cónica

O método mais preciso é o chamado monopulso, Fig 3, cujo nome advém do facto de um conjunto de dados obtidos no mesmo instante de tempo ser suficiente para conseguir os objectivos. O sistema usa, em cada uma de duas direcções ortogonais e num plano perpendicular ao eixo óptico da antena, duas antenas escravas iguais possuindo um eixo óptico ligeiramente desalinhado (uma para a esquerda outra para a direita) do da antena principal.

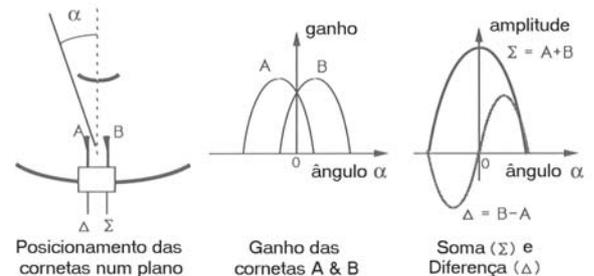


Fig 3 – Apontamento automático por mono-pulso

A diferença dos sinais recebidos por um par destas antenas escravas será nulo se a frente de onda for

perpendicular ao eixo óptico da antena principal. O sinal resultado do quociente do sinal diferença e soma é, nas condições usuais de funcionamento, independente da amplitude do sinal recebido é proporcional ao erro de apontamento sendo por isso usado para comandar os eixos de azimute e elevação.

Métodos semelhantes, designados por extracção de modos, obtêm a referência anterior explorando a excitação de modos superiores no alimentador da antena quando a onda recebida provém de uma direcção distinta da do eixo óptico dispensando deste modo as antenas escravas[4]. Qualquer um dos métodos requer hardware de microondas bastante sofisticado, elevada precisão mecânica e electrónica RF dispendiosa dada a sensibilidade exigida para processar os fráquíssimos sinais soma e diferença das antenas. Normalmente o custo destes sistemas só os torna acessíveis a operadores de telecomunicações.

II. DESCRIÇÃO DO HARDWARE

O hardware não foi desenvolvido no âmbito deste projecto[5] tendo sido efectuadas apenas algumas intervenções que aumentaram significativamente a operacionalidade do sistema e a compatibilidade com o software de apontamento programado.

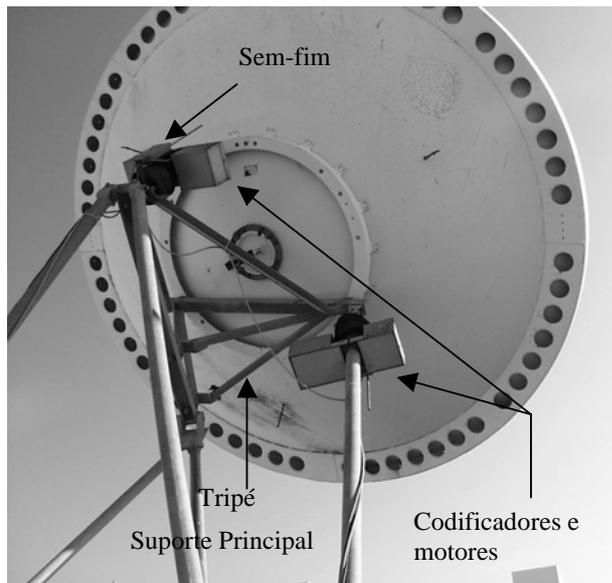


Fig 4 – Montagem da antena e H/W do sistema

A antena, Fig 4, está montada sobre um suporte principal de cinco braços dois dos quais são telescópicos. Uma variação significativa do azimute ou elevação pode ser efectuada alterando o comprimento destes braços. O reflector por sua vez está aparafusado num tripé com dois parafusos “sem-fim” cuja alongação pode ser alterada com o auxílio de duas manivelas permitindo deste modo uma variação da elevação e azimute da ordem de +/-3.5°.

Ao eixo dos parafusos “sem-fim”, anteriormente movimentados por manivelas, foram aplicados motores de corrente contínua e acoplados codificadores ópticos de código Gray (256 posições) que permitem determinar a posição angular dos eixos. Os codificadores não permitem

contar o número de voltas pelo que esta facilidade terá que ser implementada por software. Um codificador deste tipo era bastante mais dispendioso.

O diagrama de blocos do hardware do sistema consta da Fig 5.

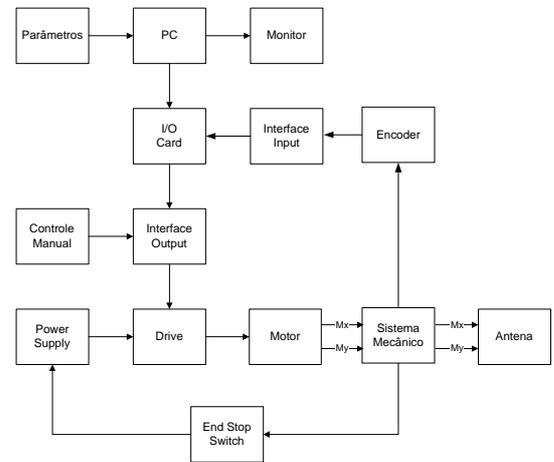


Fig 5 – Diagrama de blocos do hardware para apontamento da antena

A interface do sistema com o PC é feito por uma placa I/O que permite efectuar a leitura dos codificadores e comandar os drives dos motores. O PC determina a posição do satélite e desencadeia a movimentação dos motores para apontar a antena para uma nova posição.

Para facilitar algumas manobras preparatórias temos a possibilidade de actuar movimentar directamente os motores através de botoneiras. Por motivos de segurança colocaram-se interruptores de fim de curso que limitam as excursões do “sem-fim” evitando que a antena se solte do tripé.

III. SOFTWARE

Em linhas muito gerais o objectivo será implementar um sistema de apontamento programado ou em malha aberta. O valor do azimute e elevação do satélite são conhecidos e dados por uma equação do tipo

$$\begin{cases} Az = A_1 t + A_2 \sin \omega t + A_3 \cos \omega t \\ Ev = E_1 t + E_2 \sin \omega t + E_3 \cos \omega t \end{cases} \quad (1)$$

onde t é o tempo relativo ao instante em que as equações iniciam o seu período de validade (tempo GMT). Os parâmetros são actualizados sempre que uma melhor estimativa esteja disponível ou seja efectuada uma manobra de correcção de posição da nave.

O software deverá não só efectuar o apontamento programado mas também oferecer um conjunto de facilidades que permitam efectuar a calibração do sistema, assegurar um funcionamento contínuo e retomar o funcionamento normal após falhas de energia ou interrupções. Uma interface gráfica deverá facilitar a interacção com o utilizador.

A. Contexto geral

Os dois “sem-fim” não permitem actuar independentemente no azimute e na elevação e, por conseguinte, deve ser estabelecida uma relação entre ambos. Um aproximação que deu resultados suficientemente precisos foi supor uma relação linear entre a posição angular do eixo dos sem-fim (ou eixo dos motores) e o azimute e elevação. Graficamente, Fig 6, poderemos imaginar um referencial M_x e M_y que corresponde à posição angular dos motores e outro referencial E_l e A_z que corresponde à elevação e azimute.

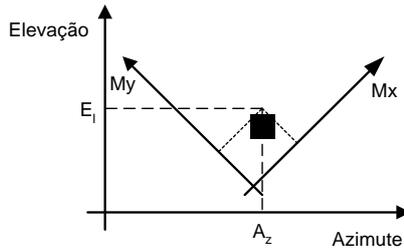


Fig 6 – Relação de M_x , M_y com A_z e E_l

Desta forma a dependência entre as coordenadas geográficas (Elevação e Azimute) e as coordenadas posicionais (M_x e M_y) é:

$$\begin{cases} E_l = AM_x + BM_y + C \\ A_z = DM_x + EM_y + F \end{cases} \quad (3)$$

Os símbolos de A a F são coeficientes a determinar experimentalmente e dos quais dependem a tradução fiel da posição angular dos motores em azimute e elevação. Deste modo, o controlo de uma antena por simples indicação de coordenadas angulares, em termos de elevação e azimute, requer sempre a necessidade da informação posicional dos motores dessa antena. No entanto, esta informação posicional associada ao resto do “hardware” tem apenas um formato numérico, necessitando por isso de se proceder a uma calibração de modo estabelecer uma correspondência entre aqueles dois tipos de informação.

B. Interface gráfica

A interface ilustrada na Fig 7, desenvolvida no âmbito do projecto, teve como objectivos principais ser simples no seu manuseamento, fornecer a maior quantidade de informação possível e assistir o operador em todas as fases preparatórias.

A interacção com o programa faz-se do seguinte modo:

- Os quatro botões de pressão permitem efectuar as tarefas principais do programa tais como mover a antena para uma dada elevação e azimute, calibrar o sistema, desencadear o modo programado ou abandonar o programa.
- Os botões de pressão permitem movimentar cada um dos motores nos dois sentidos para efectuar a calibração.

- As áreas reservadas à fórmula de seguimento e de seguimento futuro permitem introduzir os parâmetros da equação (1).

O acompanhamento do estado do sistema pode ser efectuado observando:

- O canto superior direito onde pode monitorar-se o nível de sinal recebido (digitalizado numa ADC de 12 bits), a trajectória teórica prevista para vários dias e os sucessivos posicionamentos que vão sendo concretizados. O nível de sinal ajudará a estimar a qualidade do apontamento ao satélite.
- O canto inferior direito onde pode ler-se a posição actual da antena, o número de minutos decorridos desde o início do prazo de validade da equação em uso e o minuto absoluto para o qual a necessidade de novo apontamento será averiguada.

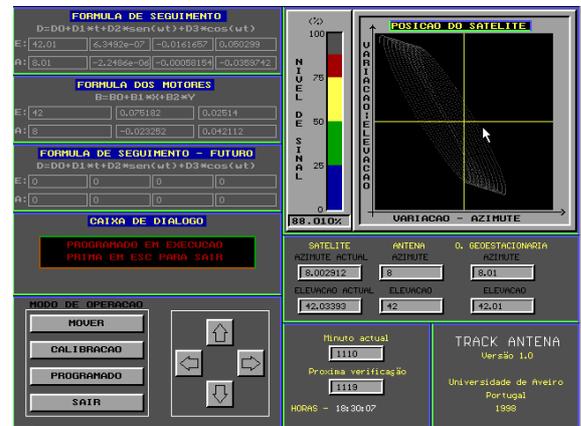


Fig 7 – Interface gráfica do programa

C. Descrição do funcionamento

O diagrama de blocos da Fig 8 ilustra a execução do programa. O programa começa por tentar ler os ficheiros que caracterizam completamente o último estado da antena: calibração, posição da antena, fórmula de seguimento, etc. Se a informação é suficiente para caracterizar a situação actual da antena será possível retomar o seguimento programado caso contrário terá que se efectuar uma nova calibração.

No modo (*Programado*) o programa calcula o azimute e elevação actuais consultando o relógio do PC, fórmula de seguimento (equação 2) e respectiva data inicial de validade. A futura posição angular dos motores é determinada usando a equação 3 (resolvida em ordem a M_x e a M_y) e a respectiva posição actual. Doravante este processo é repetido com uma periodicidade mínima escolhida pelo operador e os sucessivos movimentos efectuados são representados graficamente por um ‘o’ no gráfico do canto superior direito. O operador pode ainda introduzir, neste modo de operação, os coeficientes futuros para o cálculo da posição do satélite que serão automaticamente recolhidos e considerados logo que os anteriores tenham perdido a validade.

A movimentação da antena (*Mover*) fora do modo programado e com o sistema já calibrado permite

movimentar a antena para uma elevação e azimute introduzidos pelo utilizador. Esta facilidade permite ainda readquirir a posição absoluta do satélite e actualizar os parâmetros sem necessariamente ter que proceder a nova calibração do sistema.

A calibração (*Calibração*) destina-se a obter os coeficientes da equação **Error! Reference source not found.** e será efectuada movimentando os motores para duas posições distintas medindo de seguida o acréscimo daí resultantes na elevação e azimute em relação a uma referência arbitrária. Esta referência deverá ser tanto quanto possível próxima do ponto de funcionamento nominal do sistema para garantir a qualidade da linearização. A antena será de seguida movimentada para um ponto óptimo de recepção e o seguimento iniciado.

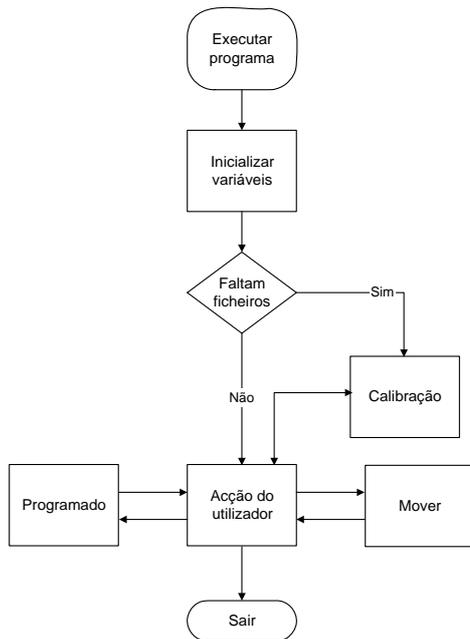


Fig 8 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados

IV. ALGUNS DETALHES DE IMPLEMENTAÇÃO

O relógio do computador deve ser acertado pelo tempo GMT pois as equações do satélite são referidas a este padrão. A utilização da hora actual poderia ser implementada facilmente recorrendo ao offset entre os dois padrões.

Um ponto crítico foi o ajuste da velocidade dos motores de forma a todo o sistema poder funcionar sob o controlo do software e sem ambiguidades. Uma elevada velocidade angular conduz a que a posição do codificador para a qual os motores devem ser parados não seja detectada pelo software. Neste caso, na melhor das hipóteses, os motores só serão parados após terem completado uma volta adicional. Por outro o ajuste para uma velocidade muito lenta conduz a que por vezes o binário de arranque não seja suficiente para pôr os motores em movimento.

Também foi verificado que no período de tempo entre a ordem de arranque de qualquer um dos motores e a

primeira leitura possível da posição dos codificadores estes avançavam um determinado número de posições que não eram detectadas pelo software. Para evitar este problema, de consequências análogas ao anterior, foi decidido efectuar a movimentação dos motores apenas quando a posição final de ambos diferisse da inicial um número mínimo de posições dos codificadores.

V. TESTES E RESULTADOS

O software foi testado durante vários dias e as sucessivas etapas foram registadas num ficheiro relatório. Na Fig 10 podemos observar a típica excursão em forma elíptica (cada dia uma elipse) para o azimute e elevação prevista pelas equações paramétricas (t é o parâmetro) para seis dias consecutivos e os apontamentos discretos efectuados pela antena.

Repare-se que junto aos extremos da elipse o seguimento não foi tão assíduo devido à impossibilidade, neste período de tempo, de movimentar um dos motores que requeria uma alteração da posição angular inferior à mínima possível ou detectável. De facto poderia verificar-se que as coordenadas do satélite variam na perpendicular a um dos eixos M (Fig 6) e, numa situação extrema, se a trajectória fosse linear e paralela a um destes eixos o sistema deixaria de operar. Embora a amplitude das variações de ganho representadas na Fig 10 não sejam significativas elas ilustram as consequências que poderiam advir em casos encontrados usualmente.

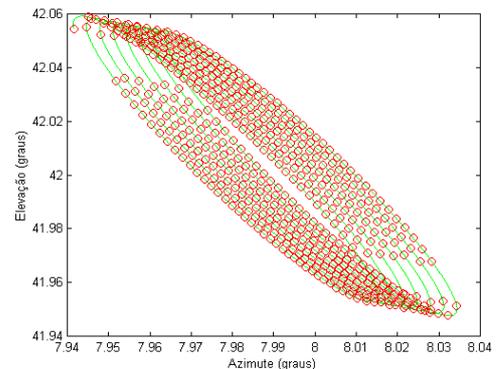


Fig 9 – Órbita prevista e seguida pela antena com movimentação simultânea dos motores

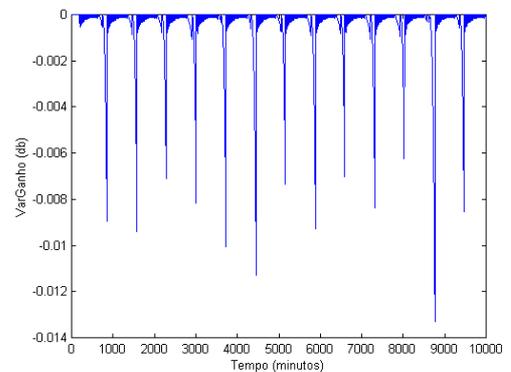


Fig 10 – Variação do ganho com movimentação simultânea dos motores

Após os testes preliminares, que conduziram à detecção do problema, optou-se por uma nova abordagem à actualização do apontamento da antena. Assim nesta segunda fase foi decidido movimentar os motores de uma forma independente bastando para tal que a excursão mínima de um deles estivesse assegurada.

Atendendo aos motivos anteriores pode-se concluir que a movimentação de apenas um dos motores é bastante vantajoso uma vez que o mesmo é, nestas circunstâncias, determinante para conseguir o apontamento quase óptimo. Os resultados obtidos em termos dos posicionamentos efectuados são evidenciados na Fig 11 e as contrapartidas em termos de ganho constam da Fig 12: os “tempos mortos” desapareceram e como resultado as variações de ganho efectivo da antena foram bastante reduzidas.

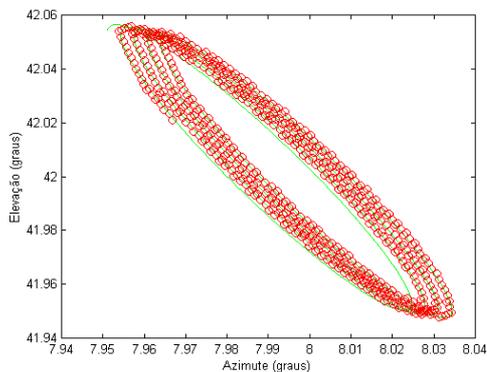


Fig 11 – Órbita prevista e seguida pela antena com movimentação independente dos motores

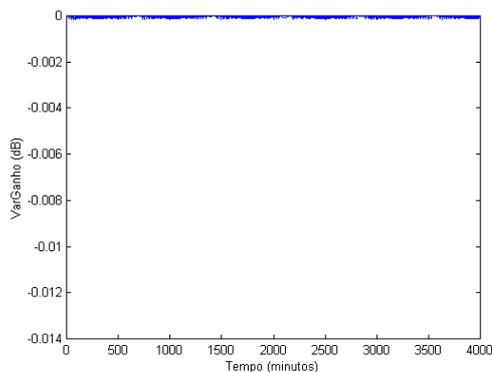


Fig 12 – Variação do ganho entre a posição da antena e do satélite com movimentação independente dos motores

VIII. CONCLUSÕES E ALGUMAS SUGESTÕES

O sistema de seguimento melhora a recepção do sinal uma vez que permite efectuar o acompanhamento ou seguimento de um satélite pseudo-geostacionário mantendo dentro do possível a antena apontada na direcção de recepção de máxima potência.

Comparando o nosso sistema de seguimento automático com os vários tipos de sistemas existentes no mercado, podemos dizer que este não é o que permite o menor erro de apontamento, mas tendo em conta a relação de preço/precisão ele poderá conseguir um bom desempenho. Para este efeito é no entanto necessária uma calibração

muito cuidada e a aquisição de uma referência absoluta poderá ser bastante trabalhosa mas será utilizável durante grandes períodos de tempo.

O sistema é relativamente simples e fiável, não necessita de uma manutenção cara e contínua.

Um ponto não completamente esclarecido prende-se com a reduzida velocidade que teve que ser imposta aos motores dada a clara dificuldade do software em efectuar a leitura dos codificadores com a rapidez desejada embora fosse desenvolvido completamente em DOS. Tal facto, apesar do PC ter uma frequência de relógio muito aquém das possibilidades actuais, parece ser devido à inclusão da parte gráfica no software. Eventualmente uma detecção da condição de paragem dos motores mais tolerante, embora menos precisa, poderia ser benéfica já que cada salto do codificador traduz-se em poucos segundos na variação nos ângulos de apontamento da antena.

A inclusão de algum hardware adicional e o desenvolvimento de software apropriado poderia auxiliar a detecção preliminar de fim de curso e evitar a necessidade de intervenção manual do operador para desbloquear o hardware. A implementação de um sistema similar ao varrimento cónico é possível com o hardware disponível e poderia vir a facilitar a aquisição da posição absoluta do satélite durante a fase preparatória.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Palutan, D. de Martino, S. Falzini and M. Melis, “Geostationary Station Keeping by Ion Thrusters: generic algorithms optimisation”, *International Journal of Satellite Communications*, Vol. 14, 1-9, 1996.
- [2] Ernest K. Smith, *Propagation Corner*, *IEEE-APS Magazine*, Vol. 40, Nr 3, June, 1998.
- [3] Timothy Pratt, Charles W. Bostian, “*Satellite Communications*”, Wiley, 1986.
- [4] G. Maral, M. Bousquet, “*Satellite Communication Systems*”, Wiley, Second edition.
- [5] Miguel Sampaio, Relatório Interno “Hardware para sistema de apontamento de antenas parabólicas”, 1992