

Sistema Automático de Apontamento de Antena para Receptores Satelitais nas Bandas C e Ku

Anderson S. de Jesus², Rebeca N. Rodrigues², Adolpho N. G. Ferreira², Victor H. Valente²,
Wheidima C. Melo^{1,2}, Eddie B. L. Filho³, Waldir S. S. Júnior³

¹Escola Superior de Tecnologia, Universidade Estadual do Amazonas (EST/UEA), Manaus-AM

²Manaus Instituto de Tecnologia (MIT), Manaus-AM

³Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Amazonas (PPGEE/UFAM), Manaus-AM

Resumo— Atualmente, serviços de TV via satélite apresentam ampla abrangência e permitem o envio de informações audíveis e visuais a áreas distantes, aproveitando as vantagens proporcionadas por satélites geostacionários. Entretanto, a simples ativação de receptores não é o suficiente, pois também é necessário ter sinal nas suas entradas de radiofrequência, provenientes de antenas previamente apontadas. Além disso, mesmo que apontamentos sejam feitos, há aplicações nas quais estações terrestres apresentam variações, como montagens em tetos de carros e em barcos, o que demanda correção constante. Os métodos aplicados a esse problema são complexos, adequados a sistemas de alto desempenho e geralmente exigem vários elementos de recepção, com o intuito de prover sinais de erro através de comparações com referências espacialmente distribuídas. Este artigo considera tal problema e propõe uma metodologia simples, a qual pode ser vista como uma simplificação viável dos métodos existentes que utiliza grande parte dos módulos já presentes em receptores comerciais, resultando em baixo custo. Por fim, resultados experimentais demonstram a sua eficácia e aplicabilidade.

Palavras-Chave— Televisão Digital, Comunicação via Satélite, Apontamento de antena, DTH

Abstract— Currently, satellite TV services present great coverage and allow the transmission of audio and video information to distant locations, with the advantages provided by geostationary satellites. Nonetheless, beyond device activation, RF signals at system inputs are also necessary, which is obtained from aligned antennas. In addition, even with such setup, there are applications where earth stations present variation, such as car-roof mount and boat antennas, which demand constant correction. The existing schemes applied to those are complex, suitable to high performance systems, and generally need many reception elements, which provide error signals through spatially distributed references. The present article address this problem and proposes a simple methodology, which can be seen as a viable simplification of the existing methods that uses many modules available in commercial receivers, leading to low cost. Finally, experimental results demonstrate its effectiveness and applicability.

Keywords— Digital Television, Satellite Communications, Antenna Alignment, DTH

Wheidima C. Melo, Escola Superior de Tecnologia, Universidade Estadual do Amazonas (EST/UEA) e Manaus Instituto de Tecnologia (MIT). Anderson S. de Jesus, Rebeca N. Rodrigues, Adolpho N. G. Ferreira, Victor H. Valente, Manaus Instituto de Tecnologia (MIT). Eddie B. L. Filho e Waldir S. S. Júnior, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Amazonas (PPGEE/UFAM). E-mails: anderson.souza@mit-am.org.br, rebeca.rodrigues@mit-am.org.br, adolpho.ferreira@mit-am.org.br, victor.valente@mit-am.org.br, wmelo@uea.edu.br, eddie.filho@tpv-tech.com, waldirjr@ufam.edu.br. Este trabalho foi financiado por Flex Imp. Exp. Ind. e Comércio de Máquinas e Motores Ltda. (Flex), Manaus Instituto de Tecnologia (MIT) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM).

I. INTRODUÇÃO

As comunicações constituem um dos aspectos mais relevantes da sociedade moderna [1], pois conectam locais distantes e interligam redes originalmente disjuntas, de modo a partilhar e sincronizar informações. Um dos mais importantes sistemas de comunicações atualmente empregados é o via satélite [1], [2], que é composto basicamente por estações terrestres (transmissoras, receptoras e de controle), no solo do planeta Terra, e satélites, localizados em sua órbita. Devido a isso, tal sistema envolve engenharia espacial e demanda recursos sofisticados e de alta tecnologia [2], [3].

Em geral, conforme mostrado na Fig. 1, satélites para comunicações podem ser geostacionários (*geostationary Earth orbit*, GEO), que têm órbita circular e permanecem fixos em relação ao planeta terra, de órbita baixa (*low Earth orbit*, LEO), na qual eles estão a uma distância relativamente curta, de órbita média (*medium Earth orbit*, MEO) e de órbita elíptica (*highly elliptical orbit*, HEO), sendo esta última caracterizada por altas velocidades no apogeu e baixas no perigeu [2], [3]. Além disso, a órbita de um satélite define os aspectos de engenharia para o projeto do seu sistema de comunicações.

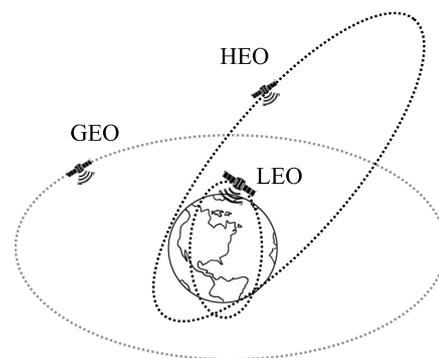


Fig. 1. Satélites de comunicações em diferentes órbitas (GEO, LEO, HEO).

Para um enlace via satélite operar satisfatoriamente, as suas estações terrestres devem ter a capacidade de se comunicar de forma adequada, estabelecendo assim um canal de comunicação [4], [5]. Devido a isso, tais estações (que podem ser responsáveis por enviar e/ou receber sinais) devem possuir antenas, que precisam ser direcionadas (ou apontadas) a satélites.

Nas órbitas LEO, MEO, e HEO, onde satélites estão em constante movimento, em relação a uma dada região da terra, há necessidade de ajustes de antena e também de *handover*, quando o sistema precisa entrar em sincronismo com outro satélite [3]. Por outro lado, a órbita GEO funciona como se o respectivo satélite estivesse estacionário, o que remove a necessidade de ajustes. Além disso, vale ressaltar que um único apontamento de antena é normalmente realizado, durante a montagem desta [2], a não ser que a estação terrestre seja móvel ou a antena tenha um diâmetro muito grande, o que geralmente leva a larguras de feixe bem estreitas [6]. De fato, este é o principal motivo para o uso da órbita GEO em transmissão de sinais de TV (*e.g.*, *direct to home*, DTH) [7] nas bandas C e Ku, pois assim o equipamento terrestre usado torna-se simples, barato e de fácil instalação.

Tradicionalmente, o apontamento de antenas, em sistemas que utilizam satélites geoestacionários, é realizado por operadores humanos e considera o ajuste de três parâmetros: ângulo de azimute, ângulo de elevação e rotação de conversor de baixo ruído (*low noise block*, LNB), sendo este último à polarização do sinal, geralmente com a ajuda de um indicador de sinal. Este último, por sua vez, proporciona um retorno visual ou audível da potência recebida, mas geralmente não identifica o satélite. Com consequência, há sempre perigo de apontamento para um satélite diferente do pretendido.

Sendo assim, receptores para serviços nas bandas C e Ku, com satélites geoestacionários, não funcionam apenas com a sua ativação/energização, pois também precisam receber sinal de uma antena previamente apontada. Tal situação é ainda mais crítica em sistemas nos quais a estação de recepção está em movimento (*e.g.*, aplicações náuticas ou rodoviárias [8]) ou quando os respectivos satélites não se encontram em órbitas geoestacionárias, como já mencionado.

Com base no que foi explanado, é extremamente importante contar com sistemas de controle de apontamento [4], [9], [10], [11], [12], [13], [14], que automaticamente estabeleçam comunicação com um dado satélite. Para isso, é necessário o emprego de técnicas de estimação de desvio entre feixe de radiofrequência (RF) e antena receptora, que sejam capazes de quantificar tal parâmetro e gerar sinais de correção.

Este artigo ataca o problema exposto e propõe uma metodologia simples para apontamento de antena, que permite controlar dispositivos (com motorização adequada) e executar um correto alinhamento, utilizando parte dos módulos já existentes em receptores comerciais. Vale ressaltar que a inclusão de tal abordagem em *Set-top Boxes* (STBs) os torna mais complexos, pois além de apresentarem circuitos de recepção de sinal de RF, decodificador de canal/mídias e saídas de áudio e vídeo, eles também executarão algoritmos de busca e identificação de sinal, de modo a controlar uma antena. Como consequência, tal desenvolvimento é de aplicação prática direta e pode adicionar diferencial competitivo a um dado produto.

O restante do artigo está organizado como segue. A seção II descreve o que já existe e ajuda na avaliação da metodologia proposta, a qual é descrita na seção III. A seção IV apresenta resultados de experimentos reais com um receptor comercial. Finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção V.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Geralmente, sistemas de pontamento de antena e rastreamento, com o objetivo de controlar e adaptar estações terrestres, são necessários nos seguintes casos: largura de feixe menor que 5° , operação com satélites em órbita inclinada e comunicação com elementos não geoestacionários (*e.g.*, em órbitas LEO, MEO e HEO) [6].

De fato, satélites geoestacionários simplificam a necessidade de correção de apontamento, pois parecem estacionários em relação ao planeta terra, mantendo a sua órbita dentro de uma precisão de $\pm 0,05^\circ$ [6]. Tal comportamento afeta diretamente o ganho do sistema, o que pode ser modelado pela fórmula

$$\Delta G \approx -3 \left(\frac{\Theta}{\Theta_{3dB}} \right) dB, \quad (1)$$

onde ΔG é a variação de ganho, Θ_{3dB} é a abertura circular na qual o ganho está $3dB$ abaixo do esperado (apontamento perfeito) e Θ é o erro de apontamento. Tipicamente, o limite desejado (erro de apontamento) é aquele no qual a variação de ganho resultante é menor ou igual a $0,5dB$, quando não há correção, o que resulta em um desvio de $0,4082\Theta_{3dB}$. Por outro lado, se $\Delta G = 0,5dB$ e o desvio é o máximo esperado, ou seja, $\Theta = 0,1^\circ (\pm 0,05^\circ)$, $\Theta_{3dB} = 0,25$.

Com isso, é fácil perceber que um pequeno erro de apontamento pode atingir severamente a potência de sinal recebida e, em casos onde haja variação ou quando a mesma antena precisa operar com satélites distintos, uma diferença de $\pm 0,1^\circ$ pode ocorrer, o que exigiria correção. Tal operação pode ser obtida com uma montagem com motorização para variação de azimute e elevação e o problema mencionado é ainda mais importante em órbitas não geoestacionárias. Sendo assim, a não ser que o feixe de antena da estação terrestre seja mais largo que a inclinação do satélite, um sistema de rastreamento e apontamento será necessário.

Tradicionalmente, tal sistema pode ser classificado como manual, monopulso, sequencial e de compressão eletrônica de feixe [12]. Obviamente, a abordagem manual é muito indicada para a fase de instalação/posicionamento inicial, mas torna-se ineficaz se mais que duas correções, por dia, precisarem ser feitas. Os três últimos são sistemas automáticos e consistem em malhas fechadas, que dependem da recepção de um sinal de referência para a obtenção do erro de apontamento. Este último é então enviado a controles de posicionamento de antena que, por sua vez, reagem para reduzi-lo.

Sistemas monopulso empregam técnicas de comparação de amplitude, fase ou ambos, mas a sua forma mais simples consiste na primeira opção, através de recepção com vários elementos que criam padrões de antena com sobreposição, em um único pulso. Sistemas sequenciais utilizam um receptor de apenas um canal e empregam medições multiplexadas no tempo e distribuídas espacialmente, de modo a gerar informação de rastreamento. Finalmente, a compressão eletrônica de feixe emprega técnicas de chaveamento eletrônico para implementar medições espaciais simultâneas.

Como é possível notar, a abordagem mais eficaz é a monopulso [10], [15], [16], a qual é usada em uma diversidade de sistemas (*e.g.*, GEO e LEO). Além disso, ela é implementada através de algoritmos específicos [9], [11], [13], [14] em plataformas adequadas, para que produzam direcionamentos

satisfatórios, além de terem características adaptativas, devido aos desvios que podem ocorrer. Entretanto, ela é complexa [11] e dependente de vários sistemas na estação terrestre, o que inviabiliza aplicações para usuários domésticos.

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar uma metodologia simples, que pode ser vista como uma simplificação das abordagens existentes, assume um certo comportamento de erro e permite a sua implementação em receptores comerciais. De fato, se a necessidade de várias medidas do sinal de referência (simultâneas ou multiplexadas) for desconsiderada e a recepção do próprio sistema for utilizada para se arbitrar sobre a correção de apontamento, o que inclusive já é feito para sistemas DTH [7], a maior parte dos módulos exigidos para apontamento automático já estaria disponível, faltando apenas um de análise e atuadores e servos para posicionamento.

III. A METODOLOGIA PROPOSTA

Para permitir o correto apontamento de uma antena, é necessário avaliar um sinal de referência e realizar ajustes de azimute (movimentação no plano horizontal) e elevação (movimentação no plano vertical). De forma geral, se o apontamento da antena for para qualquer ponto da constelação de satélites, será necessário empregar ajustes de azimute e elevação nas faixas de 0° a 360° e 0° a 90° [7], respectivamente.

Diante do exposto, um esquema automático de apontamento de antena pode ser dividido em três subsistemas: o mecânico, que movimenta a antena mencionada, o de recepção, que adquire um sinal de referência para guiar o apontamento, e o de controle, que conecta os dois primeiros e rege todas as ações tomadas. O primeiro pode ser realizado com uma estrutura de fixação e sustentação de antena, composta por atuador eletromecânico para deslocamento no plano de elevação, eixo de transmissão, motor de passo e uma base móvel para deslocamento no plano de azimute. O segundo, por sua vez, exige recepção de RF e geração de informação de avaliação. Finalmente, o terceiro pode ser implementado através de um processador, que avalia o sinal recebido e coordena o subsistema mecânico.

Em princípio, os sistemas mecânico e de controle representam novos módulos a serem implementados. Isso também é verdade em relação ao sistema de recepção, para o qual supõe-se um novo hardware, com construção específica e elementos similares aos encontrados na abordagem de apontamento apresentadas (e.g., monopulso e sequencial). Entretanto, vale lembrar que o próprio receptor comercial já possui circuitos de decodificação padronizados, capazes de reconhecer os respectivos sinais a serem tratados.

Sendo assim, se for considerado que não há necessidade de alta precisão, que o sinal desejado tem características específicas (e.g., taxa de correção de erro, modulação, etc.), capazes de distingui-lo de outros feixes, e que pode até haver um apontamento inicial, é possível utilizar o próprio sistema de recepção nativo para aquisição de sinal de referência. Em resumo, ao invés de se empregar um módulo específico, é possível configurar um receptor para um dado canal e então procurar um feixe que atenda a essas características.

O que foi apresentado acima serviu de inspiração para a metodologia proposta, que consiste na adequação de receptores comerciais, com a inclusão de um módulo de controle capaz

de avaliar a operação desses, em resposta a posicionamentos de antena. Quando uma recepção sem erros é alcançada, novos ajustes são cancelados, até que haja modificação nas condições do sinal recebido. Na Fig. 2, apresenta-se o diagrama em blocos de um sistema de apontamento automático genérico baseado nessa metodologia, onde informações (e.g., relação portadora ruído, erro de sinal demodulado e nível de sinal) são colhidas do módulo de recepção de um dispositivo comercial, mais especificamente da malha amarrada por fase (*phase-locked loop*, PLL) e do decodificador de canal, e avaliadas, o que leva à uma modificação na posição da antena.

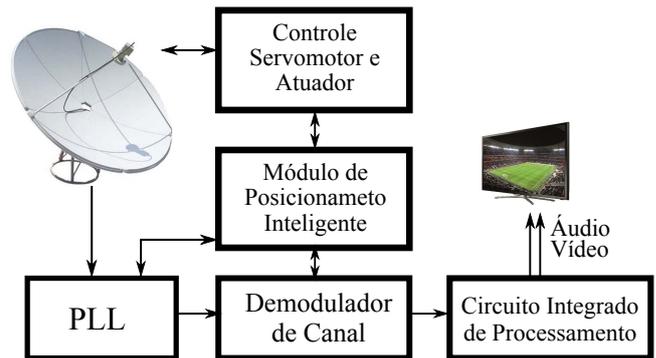


Fig. 2. Diagrama em blocos de um sistema de apontamento genérico com a metodologia proposta.

Em resumo, a metodologia proposta consiste na adição de módulos de movimentação mecânica e controle, sendo este último composto por unidade central de processamento (*central processing unit*, CPU) e memória, cujo objetivo é avaliar informações já disponibilizadas pelo próprio receptor e reposicionar a sua respectiva antena. Tal componente inclui controle de motores e coleta e processamento de sinais digitais e valores de registros (colhidos da parte de recepção de RF).

É possível argumentar que apontamentos baseados em um esquema tão simples não são acurados como os providos de abordagens tradicionais, porém, considerando-se algumas condições de contorno, como um posicionamento inicial, é possível obter resultados satisfatórios. Além disso, as principais vantagens resultantes são a utilização da infraestrutura já existente, que era apenas empregada na própria decodificação do sinal, e a integração direta com sistemas comerciais, o que leva a custos comparativamente mais baixos.

A. Algoritmo de apontamento automático de antena

O algoritmo presente no módulo de controle inicia com a obtenção da posição geostacionária do satélite que transmite o sinal de TV desejado. Na etapa seguinte, realiza-se o referenciamento do sistema, no qual o magnetômetro, dispositivo utilizado para conferir se o deslocamento angular no plano de azimute está correto, é calibrado e os valores de referência para o controle de motores de passo são determinados.

Ao final dessas etapas iniciais, o algoritmo poderá realizar a sintonia do sinal. Para isso, é necessário primeiramente descobrir a posição atual do sistema (latitude e longitude), por meio da leitura dos dados provenientes de um sistema de posicionamento (*global positioning system*, GPS) e do ângulo de azimute atual obtido pela leitura de um magnetômetro. Com

base nessas informações e na posição do satélite, o movimento necessário para o apontamento da antena é calculado e executado, através do acionamento de motores de passo, de modo que o erro de posicionamento fique na faixa de 2° .

Se após o apontamento de antena a qualidade de sinal não estiver satisfatória, o que é avaliado com os dados obtidos da recepção de RF comercial (circuitos de PLL e decodificação de sinal), inicia-se a sintonia fina. Tal processo ajusta o posicionamento da antena, percorrendo uma trajetória elíptica em torno do apontamento anterior, onde a área de varredura é limitada a uma faixa de 7° (empiricamente determinada, com base nos satélites disponíveis) de deslocamento angular de azimute e elevação. Durante cada ponto da trajetória, avalia-se a qualidade do sinal recebido: se o mesmo satisfizer as condições do algoritmo, a varredura é encerrada.

Finalmente, uma vez definido um apontamento de antena, o algoritmo continua monitorando a qualidade de sinal, de modo a permitir ajustes, caso o sinal deixe de ser sintonizado. A Fig. 3 mostra um resumo do algoritmo, em diagrama de fluxo.

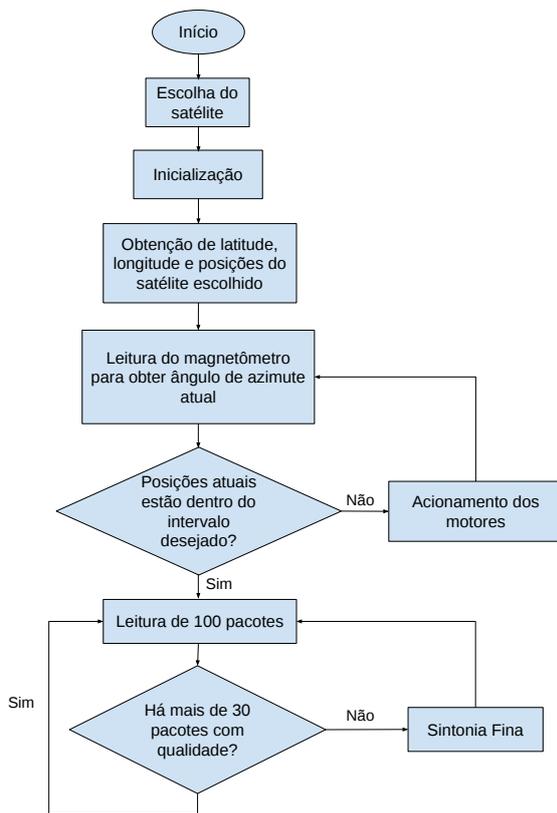


Fig. 3. Diagrama de fluxo do algoritmo proposto.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A. Premissas e integração com sistemas comerciais

Para comprovação da metodologia proposta, utilizou-se um receptor comercial no padrão *digital video broadcasting - satellite* (DVB-S), do fabricante Century (modelo *MidiaBox HDTV-b2*), com o objetivo de se adquirirem sinais de satélite

e obter informação sobre eles. Os dados lidos da recepção de RF são relativos a erros em pacotes de feixe de transporte (*transport stream*, TS), normalmente disponibilizados por receptores, através de um pino do demodulador de canal.

O módulo de controle foi implementado com a plataforma de desenvolvimento LPC1768, que utiliza o microcontrolador ARM *cortex-M3*. O protótipo final pode ser visualizado na Fig. 4.

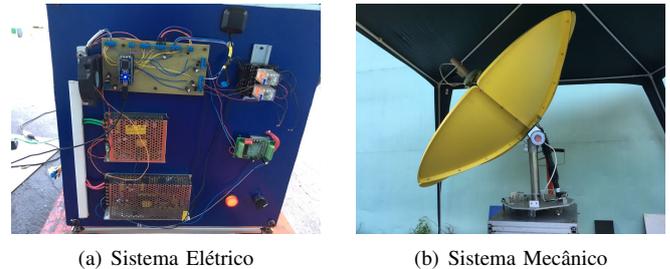


Fig. 4. Subistemas da metodologia proposta.

A plataforma LPC1768 é protagonista do sistema proposto, pois é nela que o algoritmo de rastreamento está embarcado. Além disso, o controle do motor de passo e do atuador eletromecânico, que é necessário ao apontamento de antena, também está implementado nela. Para isso, as suas saídas digitais são conectadas a interfaces que ajustam valores de corrente, com o intuito de proporcionar o correto funcionamento de dispositivos.

A base desta etapa é o de TS, obtido do pino *TS_ERR* do demodulador de canal presente no receptor mencionado, que informa se pacotes de TS do sinal recebido contém erro ou não, o que tem relação direta com o correto apontamento de antena. Esse pino é ativado toda vez que não há erro no pacote transmitido e foi conectado a uma entrada digital da plataforma LPC1768, de tal modo que tornou-se possível monitorar quando há pacotes válidos e, conseqüentemente, quando a qualidade do sinal está satisfatória. Vale mencionar que tal abordagem permite fácil integração com praticamente qualquer sistema, pois o pino de erro mencionado está normalmente presente e advém diretamente da parte de decodificação (mais especificamente, da correção de erros).

Como alguns pacotes podem ser aleatoriamente perdidos, a análise feita a partir da informação de erro de pacote deve ser realizada por um período de tempo, o que evita movimentações desnecessárias de antena. Empiricamente, determinou-se que se durante 10s o pino de *TS_ERR* for lido 100 vezes e em 30 delas obtém-se erro, o apontamento da antena está satisfatório e o usuário não perceberá problemas, ou seja, neste caso, o receptor e o satélite estão alinhados (*lock*).

B. Erros de apontamento e tempo de aquisição

Durante os testes realizados, a estrutura de antena não foi movimentada, ou seja, simulou-se apontamento automático para recepção fixa. Como os canais de TV abertos, no Brasil, são transmitidos pelo satélite *StarOne-C2*, a eficiência do algoritmo foi testada com base na posição do mesmo, ou seja, 70° W. Vale ressaltar que a localização do sistema de sintonia define os deslocamentos de azimute e elevação que, neste trabalho, ficam em torno de -57° e 12° , respectivamente.

A Tab. I apresenta os resultados dos deslocamentos angulares realizados pelo sistema proposto, com relação ao apontamento inicial e à posição depois da sintonia fina, que correspondem, respectivamente, ao posicionamento segundo as coordenadas do satélite *StarOne-C2* armazenadas na LPC1768 e ao ajuste para garantia de qualidade do sinal recebido. Adicionalmente, apresenta-se a magnitude do vetor erro, em relação à posição do satélite. O segundo e os quatro últimos erros proporcionados pela sintonia fina são menores, o que seria esperado, porém, todos os outros são maiores. De fato, a metodologia proposta não minimiza o erro em relação à posição conhecida do satélite, mas sim procura uma recepção sem erros de pacotes de TS. Realmente, esses resultados foram manualmente confirmados e mostraram que, para aquelas situações e localizações, os apontamentos encontrados pela sintonia fina proporcionaram um sinal estável e sem erros. Além disso, nota-se que não houve variação de elevação, pois a variação angular de azimute foi suficiente para melhorar a qualidade do sinal.

É importante destacar que, em média, o processo de apontamento inicial, que é baseado na posição do satélite, demorou cerca de 2,5 min para finalizar os deslocamentos angulares de azimute e elevação, ao passo que o algoritmo de ajuste fino sempre reposicionou a antena em um tempo igual ou inferior. Portanto, o tempo total utilizado pelo sistema foi sempre inferior a 5 min, o que é razoavelmente rápido, principalmente levando-se em consideração o tempo normalmente utilizado por um técnico especializado, que é aproximadamente igual a 30min, ou seja, o sistema proposto mostrou-se 5x mais rápido que o ajuste manual.

TABELA I

RESULTADOS PARA O APONTAMENTO INICIAL E AJUSTE FINO.

Apontamento Inicial		Sintonia Fina		Magnitude do Erro	
Azim.	Elev.	Azim.	Elev.	A. Inicial	Sin. Fina
-58.1158	12.2257	-61.2592	12.2257	0.7802	3.9212
-58.6818	12.1298	-58.6589	12.1298	1.3532	1.3304
-58.4330	12.2530	-58.5624	12.2530	1.0952	1.2246
-57.4047	12.1773	-57.6976	12.1773	0.1329	0.3771
-57.7577	12.2165	-58.2664	12.2165	0.4261	0.9310
-57.2201	12.2680	-58.9089	12.2680	0.1208	1.5706
-56.3418	12.1486	-56.4999	12.1486	1.0069	0.8508
-56.2187	12.1313	-57.4144	12.1313	1.1312	0.1782
-55.8656	12.3084	-56.8884	12.3084	1.4728	0.4503
-55.3349	12.1265	-57.1169	12.1265	2.0103	0.2768

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, uma nova metodologia para apontamento de antena foi apresentada, a qual pode ser facilmente integrada a sistemas comerciais DVB-T existentes. Na verdade, dado que o pino de erro de TS é amplamente disponibilizado pelos circuitos integrados de decodificação de canal de diversos padrões de TV digital, uma grande gama de receptores poderia utilizá-lo, o que resultaria em grande aplicabilidade prática.

É importante mencionar também que a metodologia proposta é muito interessante para usuários não estacionários, devido à necessidade contínua de correção, mas também pode ser aplicada a usuários residenciais, se houver viabilidade econômica ou de modelo de negócios.

Os testes reais apresentados também demonstram a sua eficácia e corroboram a importância desse desenvolvimento, com tempos de aquisição menores que 5 min. Além disso, uma das suas principais vantagens é o baixo custo de implementação, o que facilitaria o seu emprego sistemas de TV por assinatura.

Com relação a trabalhos futuros, outras informações da recepção de RF serão utilizadas, como a relação portadora ruído (*carrier to noise ratio*, CN) e o nível de sinal, geralmente obtidos de registros do demodulador de canal e do circuito de PLL, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada com recursos da indústria Flex Imp. Exp. Ind. e Comércio de Máquinas e Motores Ltda, localizada no Pólo Industrial de Manaus (PIM), do Manaus Instituto de Tecnologia (MIT) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM).

REFERÊNCIAS

- [1] E. M. Rogers, *Communication Technology*, ser. Series in communication technology and society. Free Press, 1986.
- [2] D. Roddy, *Satellite Communications*, ser. McGraw-Hill telecommunications. McGraw-Hill Education, 2001.
- [3] A. Jamalipour, *Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Networks*, ser. Artech House telecommunications library. Artech House, 1998.
- [4] H. D. Curtis, *Orbital Mechanics for Engineering Students*. Elsevier Aerospace Engineering Series, 2010.
- [5] P. Burzigotti, A. Ginesi, and G. Colavolpe, "Advanced receiver design for satellite-based automatic identification system signal detection," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 30, no. 2, pp. 52–63, March 2012.
- [6] B. Elbert, *The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook*, ser. Artech House Space Technology and Applications. Artech House Publishers, 2014.
- [7] B. R. Elbert, *The Satellite Communication Applications Handbook*, ser. Artech House space technology and applications library. Artech House, 2004.
- [8] L. Low, R. Langley, R. Breden, and P. Callaghan, "Planar roof mounted automotive antenna," in *Proc. Loughborough Conf. on Antennas and Propagation*, April 2007, pp. 109–112.
- [9] W. Gawronski, "Control and pointing challenges of large antennas and telescopes," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 276–289, March 2007.
- [10] H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan, and M. A. Hein, "A dual-band multimode monopulse tracking antenna for land-mobile satellite communications in Ka-band," in *Proc. Int. European Conf. on Antennas and Propagation*, March 2012, pp. 2357–2361.
- [11] P. Besso, M. Bozzi, M. Formaggi, and L. Perregini, "Pointing enhancement techniques for deep-space antennas," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 211–218, 2010.
- [12] G. J. Hawkins, "Tracking systems for satellite communications," *IEE Proceedings F. (Communications, Radar and Signal Processing)*, vol. 135, pp. 393–407, October 1988.
- [13] T. Dousset, C. Renard, H. Diez, J. Sarrazin, and A. C. Lepage, "Compact patch antenna for automatic identification system (ais)," in *Proc. Int. Symp. on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, June 2012, pp. 1–5.
- [14] A. Razi, M. B. Menhaj, and A. Mohebbi, "Intelligent position control of earth station antennas with backlash compensation based on mlp neural network," in *Proc. Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications*, July 2009, pp. 265–270.
- [15] M. B. Nasrollahnejad, N. S. Arabi, Y. Mokhtari, and P. Moharlooei, "Leo satellite tracking using monopulse," *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 11, pp. 723–726, 2012.
- [16] S. Lacheta, P. K. Gupta, and J. K. Hota, "Generic digital monopulse tracking receiver for advanced communication satellites," in *Proc. Int. Conf. on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECT)*, July 2015, pp. 1–5.