

Análise da antena cruz dupla para recepção de imagens meteorológicas via satélite em VHF

Igor Andrade Araujo e Maurício Henrique Costa Dias

Resumo—Este artigo analisa a antena cruz dupla para recepção de imagens meteorológicas via satélite em VHF (137-138 MHz) quanto à sensibilidade de seu desempenho aos principais parâmetros de construção. Foram variadas a espessura dos elementos, a distância entre eles, a altura do conjunto e o ângulo entre as antenas. Esses dois parâmetros são os mais críticos quanto à radiação. Verificou-se que com ângulo em torno de 35° em cada cruz, com relação ao eixo vertical, e uma altura próxima a 2 m, obtém-se uma boa relação de compromisso entre ganho e polarização, em conformidade com os requisitos esperados.

Palavras-Chave — Antena cruz dupla, antenas VHF, rádio definido por software, imagens meteorológicas.

Abstract—This paper analyzes the double cross antenna for reception of satellite meteorological images in VHF (137-138 MHz), as to the sensitivity of its performance to the main parameters of construction. The thickness of the elements was varied, the distance between them, the height of the set and the angle between the antennas. These two parameters are the most critical for radiation. It was verified that with an angle close to 35° in each cross, referenced to the vertical axis, and a height around 2 m, a good compromise between gain and polarization is achieved, in compliance with the expected requirements.

Keywords — Double-cross antenna, meteorological images, software defined radio, VHF antennas.

I. INTRODUÇÃO

O conceito de rádio definido por software (SDR – *Software Defined Radio*), concebido originalmente na década de 1990 [1], ganhou força ao longo dos anos e se incorporou definitivamente ao contexto das radiocomunicações. Hoje, a grande maioria dos dispositivos de comunicação sem fio incorpora, em maior ou menor grau, a arquitetura SDR: *smartphones*; roteadores sem fio; rádios militares; decodificadores de TV digital; etc.

Ao longo da presente década, o conceito de SDR se tornou ainda mais difundido com a adaptação de *dongles* de recepção de TV digital de baixo custo para uso genérico como receptor de rádio banda-larga [2]. O leque de aplicações potenciais desses dispositivos é considerável, atraindo grande interesse em diversos segmentos da sociedade, com ou sem fins comerciais. De forma colaborativa, o conhecimento sobre o uso dos dispositivos conhecidos de forma geral como RTL-SDR cresceu rapidamente [3], [4].

Uma das aplicações mais populares dos RTL-SDR é a de recepção de imagens de satélites meteorológicos da *National Oceanic and Atmospheric Administration* dos EUA (NOAA) [5]. Há diversos relatos de projetos de estações terrestres para recepção de imagens analógicas transmitidas no modo APT (*Automatic Picture Transmission*), com banda de 34 kHz e portadora entre 137 e 138 MHz, como em [6], [7], e [8].

Um elemento importante nesses projetos é a antena, com requisitos particulares de polarização e ganho para poder captar adequadamente o sinal emitido por satélites que se deslocam em órbitas polares [9]. Dependendo das condições do local de recepção, dos demais dispositivos incorporados ao projeto da estação, e da qualidade desejada das imagens, até mesmo uma antena dipolo em ‘V’ pode servir. Na maioria dos casos, entretanto, recomenda-se o uso de antenas com polarização circular à direita num feixe ao redor da direção vertical (olhando para o céu), com ganho maior ou pouco menor que o unitário. Configurações como a helicoidal quadrifilar [10], o dipolo cruzado [11] e a cruz dupla (DCA – *Double-Cross Antenna*) [12] são as mais referenciadas.

No escopo da aplicação de recepção de imagens via satélite em questão, pouco se discute sobre o projeto e a configuração da antena nos trabalhos pertinentes. Entretanto, percebe-se em vários desses relatos que as distorções nas imagens podem ter sido consequência de desempenho insuficiente da antena. Tipicamente, antenas de polarização circular mantêm esse comportamento em larguras de feixe (angular) e de banda limitadas [11], sendo o desempenho final sensível a variações de alguns parâmetros de construção da antena ou do conjunto de antenas. Essa sensibilidade foi percebida empiricamente no decorrer de um projeto recente de estação terrestre de recepção de imagens meteorológicas APT em VHF [13], em que uma antena DCA foi utilizada, configurada como em [12]. Em que pese o objetivo de recuperação de imagens de boa qualidade ter sido alcançado, ficou a percepção de que a antena poderia apresentar melhor desempenho se ajustada adequadamente.

Este trabalho tem por objetivo, portanto, avaliar a sensibilidade do desempenho da antena DCA quanto aos parâmetros principais de configuração, quando empregada para recepção de imagens em modo APT dos satélites de órbita polar da NOAA, em VHF (137-138 MHz). Em particular são considerados: a espessura dos dipolos; a distância entre cada par de dipolos (cruz); a altura do centro do conjunto com relação ao solo; e o ângulo interno de cada cruz. O desempenho é avaliado quanto ao casamento de impedância, ao ganho e à polarização. A análise é realizada com base no método dos momentos [11], no software livre 4NEC2 [14].

A seção II descreve a antena DCA, confrontando-a com os requisitos da aplicação em questão, apresentando também um protótipo que foi montado. A metodologia de análise adotada é brevemente descrita na seção seguinte. Na seção IV, os resultados da análise de sensibilidade são apresentados e discutidos. Por fim, a seção V conclui o trabalho.

II. ANTENA CRUZ DUPLA

Inicialmente, é importante destacar os requisitos que a aplicação em questão demandam da antena. Para captar as imagens dos satélites NOAA de órbita polar (4 em operação

Igor A. Araujo, Maurício H. C. Dias, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), campus Maracanã, Av. Maracanã, 229, Rio de Janeiro-RJ, e-mails: aigor1058@gmail.com, mauricio.dias@cefet-rj.br.

atualmente [9]), a antena deve estar sintonizada na frequência de referência $f_0 = 137,5$ MHz (a portadora exata varia de satélite para satélite, sempre entre 137 e 138 MHz), e o diagrama de radiação de ganho da antena nessa faixa deve apresentar polarização circular à direita ao longo da trajetória do satélite, ou seja, da direção Norte-Sul [12].

A antena cruz dupla é formada por 4 dipolos de meia onda, dispostos como na ilustração da Fig. 1 (a). Ela pode ser descrita como composta por dois pares de dipolos ortogonais, sendo que cada par forma uma cruz quando se observa a sua projeção no plano perpendicular ao eixo que as une. A Fig. 2 reproduz a mesma antena desenhada no software 4NEC2. Os eixos x e y na Fig. 2 equivalem aos eixos Oeste-Leste e Sul-Norte, respectivamente. Com isso, o par (1, 2) forma uma cruz no plano xz , e o par (3, 4) forma outra cruz no plano yz .

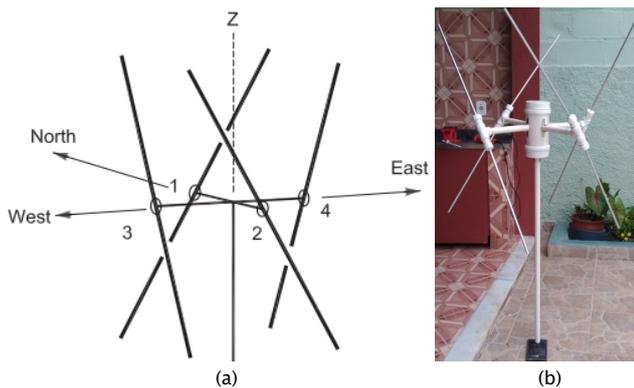


Fig. 1. Antena DCA: (a) desenho descritivo (adaptado de [12]), (b) protótipo próprio.

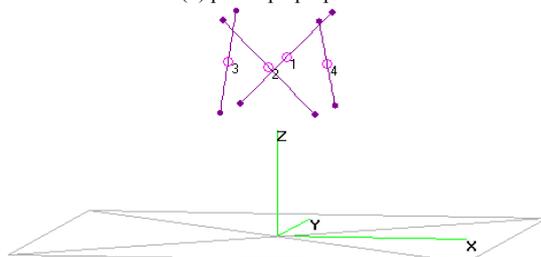


Fig. 2. Desenho da antena DCA no 4NEC2.

A distância d entre os dipolos do par (3, 4) é a mesma que a entre os dipolos do par (1, 2). Tipicamente, $d \cong \lambda_0/4$, com λ_0 igual ao comprimento de onda associado a f_0 . O ângulo da cruz virtual que cada par de dipolos forma (tomado entre um dos dipolos e o eixo z) deve ser $\alpha \cong 30^\circ$, e o conjunto deve estar alinhado com o Norte da Terra, conforme a orientação da Fig. 1 (a), para captar adequadamente os sinais dos satélites NOAA. Nessa configuração proposta, a impedância de entrada em cada dipolo fica próxima de 50Ω na ressonância [12].

Para obter radiação com polarização circular em um feixe de observação centrado no eixo z , é preciso impor correntes de alimentação de mesma amplitude nos 4 dipolos, mas com diferença de fase entre elas. Tomando a fase da corrente de alimentação da antena 1 como referência, a polarização circular à direita é obtida impondo 180° de diferença de fase na antena 2, 90° na antena 3, e -90° na antena 4 [12].

No escopo mais amplo do trabalho relatado em [13], uma antena DCA foi construída artesanalmente, seguindo as recomendações de [12]. Os dipolos foram montados com tubos de alumínio com raio $r = 6,5$ mm e comprimento $l = 1$ m cada. A distância entre os dipolos do par (1, 2) e do par (3,4) foi $d = 52$ cm. O centro do conjunto ficava a uma altura $h = 1,63$ m do chão, e o ângulo α próximo a 30° .

A antena montada foi levada para medida do coeficiente de reflexão (S_{11} – referência de 50Ω), e foi simulada no 4NEC2. As respostas de S_{11} medida e simulada são apresentadas na Fig. 3, onde se percebe boa concordância. Embora a ressonância tenha ficado cerca de 2 MHz abaixo da desejada, o casamento de impedância continua muito bom entre 137 e 138 MHz, com $S_{11} < -12$ dB. Na simulação, considerou-se $\alpha = 29^\circ$, 21 elementos por dipolo (para solução pelo método dos momentos, inerente ao software) e demais dimensões como já relatado. Considerou-se a presença de plano terra infinito condutor imperfeito (condição “moderada”, com condutividade $\sigma = 3$ mS/m e permissividade relativa $\epsilon_r = 4$) [14].

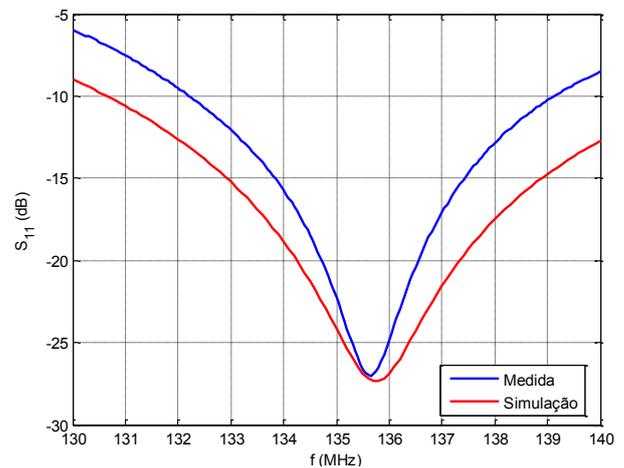


Fig. 3. Respostas de S_{11} da antena DCA montada: medida e simulação.

Dada a boa concordância observada na Fig. 3, e sem meios adequados para medir diagrama de ganho, considerou-se o modelo validado parcialmente para fins da análise pretendida neste trabalho. Como o método dos momentos calcula os campos elétricos radiados pela estrutura, e tanto a impedância de entrada quanto o ganho são funções desses campos, a concordância de S_{11} é um bom indicativo de que o ganho simulado é uma boa aproximação do real [11]. Com isso, do mesmo modelo simulado foram gerados diagramas de radiação em f_0 , ilustrados na Fig. 4: (a) ganho total; (b) razão axial (AR); (c) tilt ou diferença de fase. A polarização da antena é caracterizada por essas duas últimas métricas, sendo circular à direita quando a AR é unitária e o tilt de -90° [11].

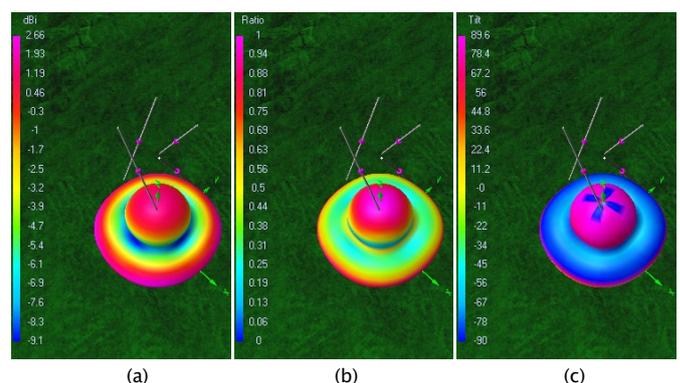


Fig. 4. Simulação dos diagramas de radiação da antena DCA montada, em 137,5 MHz: (a) ganho total (dB); (b) AR; (c) tilt (graus).

Observa-se que o diagrama de ganho incorpora o efeito do solo esperado para antenas dipolo em alturas entre λ_0 e $\lambda_0/2$ (2,18 e 1,09 m, respectivamente) [11]. Percebe-se a presença de um nulo num ângulo intermediário, tomando qualquer plano de corte vertical, decorrente dessa altura. O ganho total no cone de cerca de $\pm 30^\circ$ ao redor do eixo z é maior que o unitário, o que é desejável. A razão axial, por sua vez, apresenta valores

acima de 0,5 (-3 dB) nesse mesmo cone do ganho, também desejável para polarização circular. O tilt, no entanto, não apresenta o desempenho desejado, com valores próximos a $+90^\circ$ na maior parte do cone destacado, o que corresponde à polarização circular à esquerda. Interessante perceber como, dependendo do alinhamento da antena com o eixo y, o tilt pode ser de $\pm 90^\circ$ naquele cone, ou seja, há uma grande sensibilidade da antena a esse alinhamento, algo que foi percebido em alguns testes realizados ao longo do trabalho desenvolvido em [13].

III. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Percebida a conveniência da análise de sensibilidade da antena a certos parâmetros de configuração, foram escolhidos, de forma “ad hoc”, os parâmetros geométricos principais da antena, a saber: a altura do centro do conjunto (h); o raio dos dipolos (r); a distância entre os dipolos de cada cruz virtual (d); e o ângulo de cada cruz virtual (α). A análise de sensibilidade foi feita variando-se esses parâmetros no modelo em 4NEC2 criado para este trabalho, discutido na seção II.

Na primeira bateria, foram testadas 4 alturas, com valores em torno de $\lambda_0/2$ e λ_0 : 0,9 m; 1,4 m; 1,9 m; e 2,4 m. Foram fixados: $r = 6,5$ mm; $d = 52$ cm; e $\alpha = 30^\circ$. Já na 2ª rodada, observou-se o desempenho da antena com a variação do raio dos dipolos, com r (mm) igual a: 0,5; 3,5; 6,5; 9,5; 12,5. Aqui, foram fixados: $h = 2$ m; $d = 52$ cm; e $\alpha = 30^\circ$.

A distância d (cm) foi testada nos seguintes valores: 36; 44; 52; 60; 68. Nessa bateria, foram fixados: $h = 2$ m; $r = 6,5$ mm; e $\alpha = 30^\circ$. Por fim, os testes de sensibilidade a α tomaram os seguintes ângulos: 10° ; 20° ; 30° ; 35° ; 40° ; e 50° . Aqui, foram fixados: $h = 2$ m; $r = 6,5$ mm; e $d = 52$ cm.

Em todas as simulações foi mantida a mesma segmentação dos fios (21 elementos), que representava boa relação de compromisso entre tempo de simulação e convergência do método numérico. A condição de solo moderado e o comprimento dos dipolos ($l = 1$ m) também foram mantidos.

Duas figuras de mérito foram geradas para cada caso: S_{11} , na faixa de 130 a 150 MHz; e diagramas de radiação 3D, em f_0 , de ganho total, AR e tilt. Desses diagramas, e considerando a referência usual dos ângulos do sistema de coordenadas esféricas (θ - elevação, ϕ - azimute), cortes verticais em $\phi = 90^\circ$ foram destacados, por corresponder à orientação de maior interesse (alinhamento com Norte da Terra). Alguns cortes horizontais em $\theta = 30^\circ$ também foram destacados, por corresponderem ao feixe de observação desejado para aplicação ($\pm 30^\circ$ em torno do eixo vertical).

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A. Variação da altura

As respostas de S_{11} para as alturas testadas apresentaram diferenças pouco significativas para a aplicação em questão. Nos 4 casos, $S_{11} < -15$ dB entre 135 e 139 MHz, ou seja, a variação de altura pouco afetou o casamento de impedância.

O desempenho de radiação, por outro lado, foi bastante sensível à variação de alturas, como observado nas Figs. 5 a 7. Lembrando que o feixe mais importante é o que corresponde ao intervalo $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$, o desempenho de ganho e de razão axial em todas as alturas seria compatível. Em ambas as métricas, o melhor desempenho é visto em $h = 1,9$ m.

O tilt se mostrou a métrica mais crítica, como ilustrado na Fig. 7. Percebe-se que, na altura de melhor desempenho de ganho e AR, o tilt apresenta inversão de sinal (de -90° a 90°)

próximo à direção de alinhamento com a trajetória do satélite ($\phi = 90^\circ$), para $\theta \approx 30^\circ$. Ainda assim, das 4 alturas avaliadas, apenas em 1,9 m o desempenho de tilt foi satisfatório. Esse comportamento de polarização é melhor visualizado na Fig. 8. Analisando o feixe de $\pm 30^\circ$ ao redor do eixo vertical, o tilt varia, mas fica próximo de -90° . O desempenho se degrada para alturas mais baixas, como a do teste do protótipo (Fig. 4), e acima de 2,2 m. Vale destacar que, em todas as alturas testadas, o tilt cai para cerca de -45° em $\theta = 0^\circ$, degradando o casamento de polarização nessa posição.

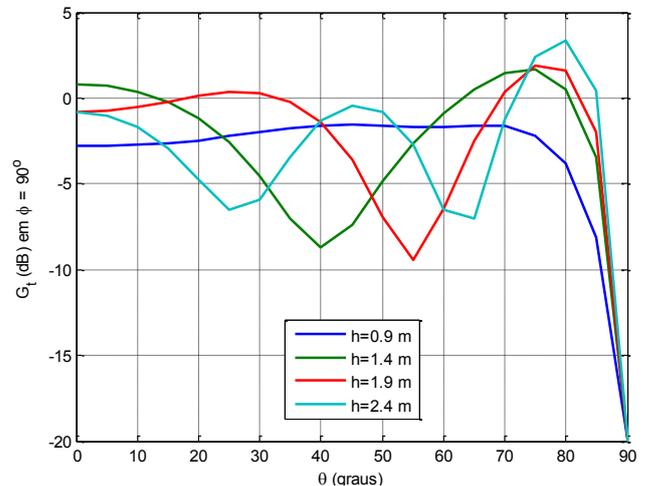


Fig. 5. Variação do ganho total com a altura h – plano $\phi = 90^\circ$.

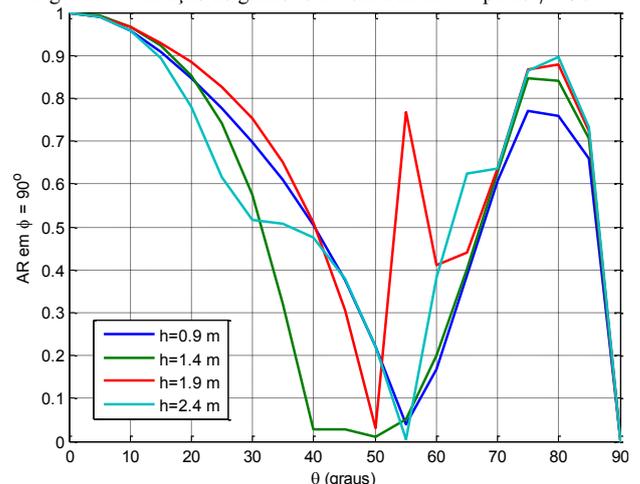


Fig. 6. Variação da razão axial com a altura h – plano $\phi = 90^\circ$.

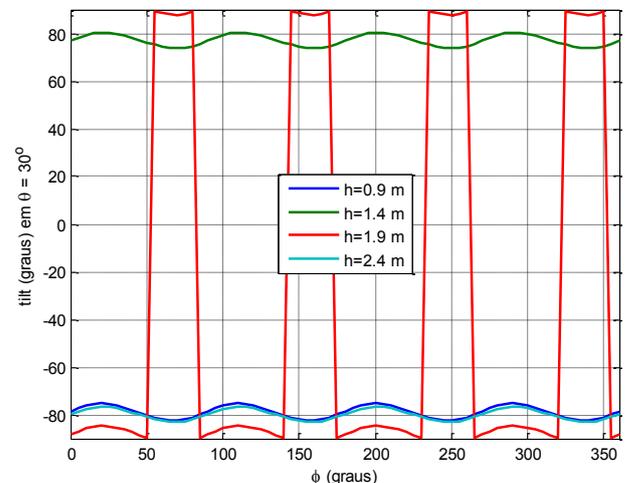


Fig. 7. Variação do tilt com a altura h – plano $\theta = 30^\circ$.

B. Variação da espessura da antena

A variação de r só gera efeito significativo na resposta de S_{11} , como ilustrado na Fig. 9. Tomando por referência o limiar de -10 dB e a faixa de operação da aplicação, percebe-se que o dipolo não pode ser fino demais, precisando ter raio de cerca de 3 mm. Todos os diagramas de radiação gerados apresentaram variações desprezíveis entre eles, sendo quase coincidentes.

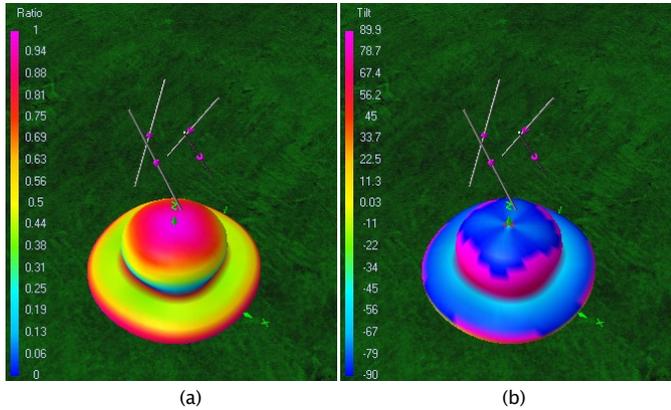


Fig. 8. Diagramas de radiação 3D para $h = 1,9$ m: (a) AR; (b) tilt (graus).

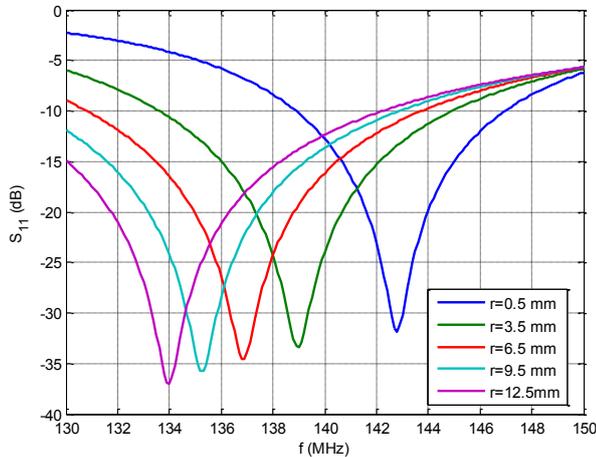


Fig. 9. Variação da resposta de S_{11} com a espessura.

C. Variação da distância entre as antenas

A resposta de S_{11} para a faixa de variação de distância testada apresentou diferenças pouco relevantes para a aplicação em questão. Nos cinco casos, $S_{11} < -15$ dB na faixa entre 136 e 139 MHz, ou seja, a sensibilidade de S_{11} à distância foi praticamente tão baixa como a observada com a altura.

As métricas de radiação apresentaram sensibilidade relativamente baixa à variação da distância, como visto nas Figs. 10 e 11 (ganho e AR, respectivamente). Mesmo o tilt, no feixe de $\pm 30^\circ$ de interesse, variou pouco, mantendo-se próximo a -90° , em conformidade com o requisito da aplicação.

D. Variação do ângulo entre cada par de dipolos

A Fig. 12 apresenta as respostas de S_{11} para os 6 casos analisados. Em todos, percebe-se que, na faixa de f_0 ou limiar de -10 dB foi atingido. Não obstante, a sensibilidade de S_{11} a α só não foi maior que a observada com d .

Quanto à radiação, no feixe de $\pm 30^\circ$ em torno do eixo vertical o ganho apresentou desempenho crescente com α , como observado na Fig. 13. Entretanto, a resposta de ganho com θ variou pouco para α entre 30° e 50° . A razão axial tem desempenho similar, como ilustrado na Fig. 14. Para a aplicação em questão, portanto, identifica-se $\alpha \cong 25^\circ$ como um limite inferior que leva a desempenho aceitável.

Para melhor entender o comportamento do tilt, é preciso observar diretamente os diagramas 3D, como os reproduzidos na Fig. 15. Entre aproximadamente 40° e 50° , o tilt no plano yz tende a ter seu sinal invertido, passando de -90° a $+90^\circ$. Essa inversão é muito crítica, pois inviabiliza a recepção por descasamento de polarização. Para α abaixo dessa região de transição, o tilt oscila mas se mantém próximo a -90° em todo o feixe de $\pm 30^\circ$ em torno do eixo vertical. Da análise realizada dessa métrica, identifica-se $\alpha \cong 40^\circ$ como um limite superior para desempenho aceitável da antena na aplicação em questão.

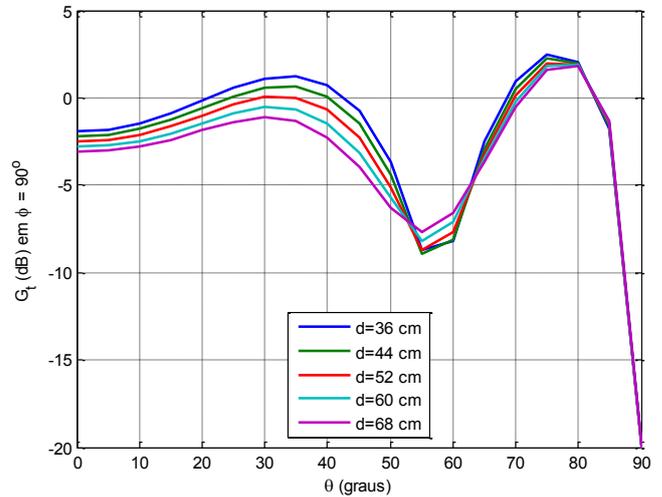


Fig. 10. Variação do ganho total com a distância d – plano $\phi = 90^\circ$.

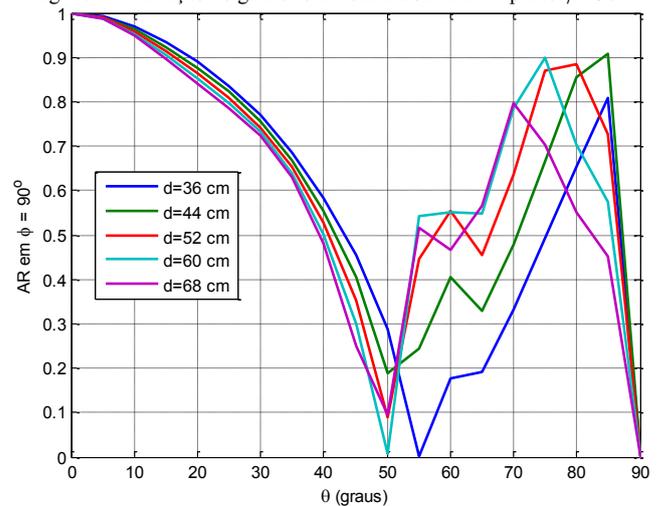


Fig. 11. Variação da razão axial com a distância d – plano $\phi = 90^\circ$.

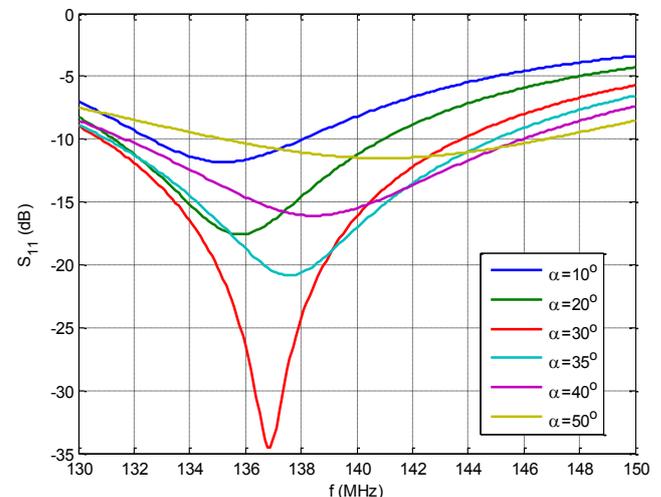


Fig. 12. Variação da resposta de S_{11} com o ângulo α .

E. Avaliação Geral

Sob o ponto de vista do casamento de impedância da antena, o parâmetro analisado mais sensível foi r . Ainda assim, apenas em um caso ($r = 0,5 \text{ mm}$) $S_{11} > -10 \text{ dB}$ na faixa desejada. Para os outros três parâmetros, S_{11} se manteve bom o suficiente em torno de f_0 em todos os casos testados.

Ganho e AR tiveram desempenhos correlatos quanto à sensibilidade à variação de cada um dos 4 parâmetros. A altura foi o parâmetro mais crítico, seguido por α . A variação com d foi pequena, e com a espessura foi desprezível.

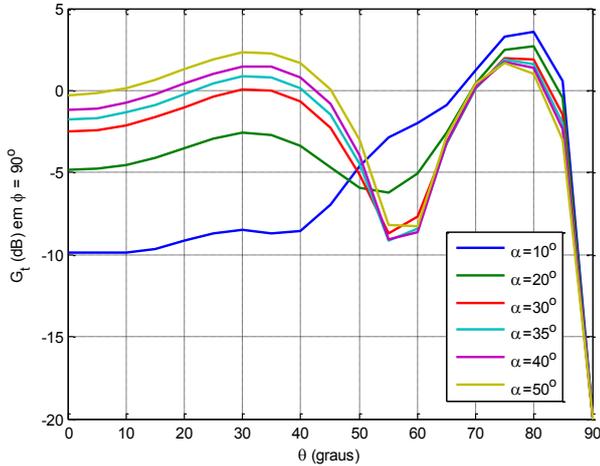


Fig. 13. Variação do ganho total com o ângulo α - plano $\phi = 90^\circ$.

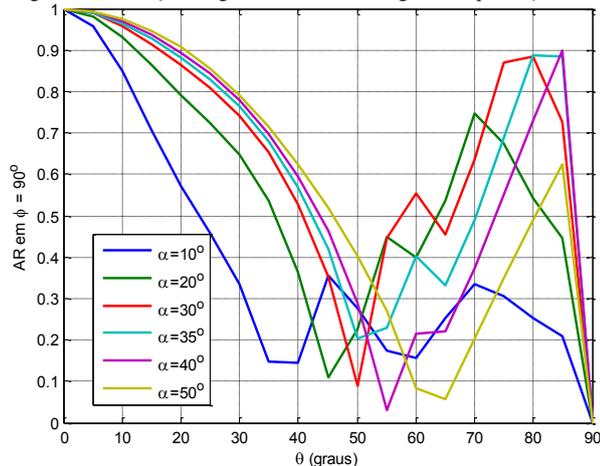


Fig. 14. Variação da razão axial com o ângulo α - plano $\phi = 90^\circ$.

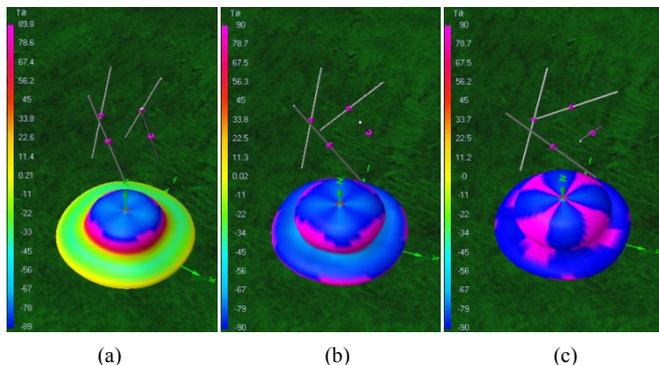


Fig. 15. Diagramas de radiação 3D de tilt para $\alpha =$ (a) 20°; (b) 35°; (c) 50°.

O tilt, usualmente desconsiderado em análises similares, se mostrou bastante sensível à variação de h e α . Em vários casos se constatou que um pequeno desalinhamento do eixo y com o eixo Sul-Norte da Terra pode levar à inversão de sinal do tilt, provocando descasamento de polarização, como observado na

prática em alguns testes feitos em [13]. Destaca-se, ainda, que em função da simetria da antena, ocorre a degradação do tilt em $\theta = 0^\circ$, caindo para cerca de -45° em vez dos -90° desejados.

Desta análise, pode-se ampliar o escopo de parâmetros da configuração sugerida para antena DCA em [12] para aplicação desejada. A altura deve estar entre 1,8 e 2,1 m. O raio dos dipolos pode ser entre 2 e 10 mm. A distância entre os dipolos de cada cruz virtual pode estar entre 40 e 60 cm. Por fim, o ângulo α sugerido fica entre 30° e 40° .

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma análise da antena DCA para recepção de imagens meteorológicas de satélites NOAA em VHF. O objetivo foi avaliar a sensibilidade das figuras de mérito da antena aos principais parâmetros de construção: espessura dos elementos; distância entre eles; altura da antena em relação ao solo; e ângulo entre elas.

Montado um protótipo e medido seu S_{11} , foram simuladas na ferramenta 4NEC2 variações daqueles parâmetros em torno de valores de referência disponíveis na literatura. Os resultados foram expressos pelas métricas de S_{11} , ganho, AR e tilt.

A análise apontou uma relativa insensibilidade de S_{11} . Tomando o feixe de $\pm 30^\circ$ ao redor do eixo vertical como referência, ganho, AR e tilt foram mais sensíveis às variações de h e α , sendo o tilt a métrica mais crítica na manutenção da conformidade com os requisitos da aplicação em tela. No geral, foi possível incorporar limites de tolerância aos principais parâmetros de construção da antena DCA, com relação à configuração usualmente sugerida, de forma embasada.

REFERÊNCIAS

- [1] P. B. Kenington, *RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio*, Artech House, 2005.
- [2] S. Cass, “A \$40 software-defined radio”, *IEEE Spectrum*, vol. 50, n. 7, pp. 22-23, Jun 2013.
- [3] Realtek, “RTL-SDR (RTL2832U) and software defined radio news and projects”, [Online]. Disponível em: www.rtl-sdr.com. [Acesso em 2019].
- [4] C. Laufer, *The Hobbyist's Guide to RTL-SDR. Really Cheap Software Defined Radio*, 7th ed., RTL-SDR.com, 2014.
- [5] NOAA, “National Oceanic and Atmospheric Administration homepage”, [Online]. Disponível em: www.noaa.gov. [Acesso em 2019].
- [6] R. D. Flores, E. D. Saatkamp e R. Machado, “Protótipo de uma estação receptora de imagens meteorológicas utilizando GNU Radio e RTL-SDR”, em *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBt2017)*, São Pedro, pp. 1198-1202, 2017.
- [7] S. Karnap, “Earth Observation System Using Software-Defined Radio (SDR)”, Projeto de Fim de Curso, Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2018.
- [8] M. J. Lee, “Decoding Signals From Weather Satellites Using Software Defined Radio”, Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, California State University, Los Angeles, 2018.
- [9] NOAA, “Satellite and Information Service - Currently Flying”, [Online]. Disponível em: www.nesdis.noaa.gov/content/currently-flying. [Acesso em 2019].
- [10] C. C. Kilgus, “Resonant Quadrifilar Helix”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-17, pp. 349-351, maio 1969.
- [11] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., New York: Wiley, 2016.
- [12] G. Martes, “Double Cross - A NOAA Satellite Downlink Antenna”, *QST*, pp. 1-3, Fev 2008.
- [13] I. A. Araujo, “Receptor de sinais VHF via satélite de imagens meteorológicas utilizando plataforma baseada em RTL-SDR”, Projeto de Fim de Curso, Engenharia Eletrônica, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2019.
- [14] A. Voors, “4NEC2 - NEC based antenna modeler and optimizer”, [Online]. Disponível em: www.qsl.net/4nec2/. [Acesso em 2019].