

# Análise da antena monopolo de quarto de onda encurvada

Fabiano Carvalho dos Santos Assumpção, Arnaud Corrêa da Silveira e Maurício Henrique Costa Dias

**Resumo**—Antenas monopolo de quarto de onda com plano de terra são muito utilizadas em sistemas de rádio de HF a UHF. Uma variação muito comum é a antena inclinada, que, dessa forma, sujeita à gravidade, enverga. Nesse contexto, este artigo analisa a antena em questão, tomando como figuras de mérito a impedância de entrada e o ganho. Verificou-se que o encurvamento impõe diminuição da resistência. A reatância aumenta apenas em inclinações pequenas. O diagrama de ganho, por sua vez, praticamente não se altera, com variações do ganho máximo em torno de 10%.

**Palavras-Chave** — Antenas encurvadas, antenas HF, antena monopolo de quarto de onda, antenas táticas.

**Abstract**—Quarter-wave monopole antennas over ground plane are widely used in HF to UHF radio systems. A very common variation is the tilted antenna, which, in this way, is subject to bending due to the gravity force. In this context, this article analyzes the antenna in question, taking as merit figures the input impedance and the gain. It has been found that bending imposes a decrease in the resistance. The reactance increases only for small tilt. The gain pattern, on its hand, practically does not change, with variations of the maximum gain around 10%.

**Keywords** — Bent antennas, HF antennas, quarter-wave monopole antenna, tactical antennas.

## I. INTRODUÇÃO

As comunicações na banda de HF (3-30 MHz) são recorrentes em diversos contextos como sistemas de comando e controle (militares ou civis), emergência, busca e salvamento, comunicações com embarcações ou aeronaves, radiodifusão, entre outros. Apesar de ter baixa confiabilidade e capacidade de transferência de dados, as ondas propagadas nessa faixa podem alcançar grandes distâncias (dezenas ou até milhares de quilômetros [1]), por meio da ionosfera.

A antena monopolo de quarto de onda ( $\lambda/4$ ) é uma das opções mais utilizadas nas comunicações em HF, por sua simplicidade, seu baixo custo e pela facilidade de instalação. Além disso, é uma configuração amplamente estudada na literatura [2]. Na busca pelo atendimento aos parâmetros de desempenho específicos, algumas variantes dessa antena de referência são usualmente adotadas. Tomando o contexto particular das aplicações táticas militares como exemplo, algumas dessas variantes são encontradas em [3], [4], [5], [6], [7], [8] e [9]. Perfil baixo, maximização da largura de banda, diminuição da emissão eletromagnética nos passageiros da viatura, melhoria no ganho e suporte a ondas de superfície, são algumas características buscadas utilizando-se essas variações.

As monopolos de  $\lambda/4$  em HF são grandes fisicamente (o menor comprimento é de 2,5 m, em 30 MHz). A instalação em viaturas ou embarcações é um problema à parte a ser analisado, em função do posicionamento relativo e das dimensões

relativas envolvidas, como abordado em [10]. Uma variação da antena em questão, muito utilizada nesse contexto, é a monopolo inclinada. O desempenho dessa antena é conhecido teoricamente, como apontado em [2]. Entretanto, um aspecto pouco estudado que ocorre para essa configuração da monopolo de  $\lambda/4$  é o encurvamento da antena, decorrente de seu peso, ou seja, da ação da gravidade.

Este trabalho tem por objetivo analisar o efeito do encurvamento, decorrente da gravidade, em antenas monopolo de  $\lambda/4$ . Como cenário de referência, tomou-se uma antena *whip* de 5 m de comprimento, utilizada em aplicações táticas militares. A análise é baseada no método dos momentos [2] e toma como métricas a impedância de entrada e o ganho. Foco é dado as diferenças de resultados das métricas das antenas inclinadas sem e com a deformação causada pela gravidade.

A seção II aborda a metodologia usada para realização da análise pretendida. Já a seção III apresenta a antena monopolo inclinada, com foco no comportamento da impedância e do diagrama de ganho com relação ao ângulo de inclinação. Na seção IV o efeito do revestimento dielétrico, usualmente utilizado na prática, é analisado. A seção V apresenta o modelo de antena encurvada adotado. Na seção VI os efeitos do encurvamento são analisados, comparando as figuras de mérito de impedância de entrada e ganho das antenas ideais com as encurvadas. Por fim, a seção VII conclui o trabalho.

## II. METODOLOGIA

Para analisar a antena encurvada, foi escolhido um caso de referência simples (monopolo vertical de comprimento  $l = 5$  m, sobre plano terra infinito composto por material condutor elétrico perfeito, comumente referenciado pela sigla PEC, oriunda do termo em inglês *Perfect Electric Conductor*) e aos poucos os efeitos de inclinação, revestimento, e encurvamento da estrutura foram incorporados, tornando a simulação cada vez mais detalhada.

Adotou-se uma abordagem numérica para análise das antenas, baseada no método dos momentos, por ser bastante eficiente para antenas filamentosas. Mais ainda, há várias versões desse método disponíveis em softwares de análise, alguns inclusive livres, como o 4NEC2 [11], que foi escolhido por apresentar bons resultados para simulações dessas antenas.

Em todas as simulações foi mantida a mesma segmentação dos fios (21 elementos), que apresentava boa relação entre tempo de simulação e convergência do método numérico. O tamanho da antena ( $l = 5$  m) e plano terra PEC infinito em  $z = 0$  também foram adotados em todas as simulações.

Nas simulações, as seguintes figuras de mérito foram geradas: impedância de entrada (resistência e reatância); coeficiente de reflexão ou parâmetro  $S_{11}$  (com relação a 50  $\Omega$ ); e diagrama de ganho (3D).

Fabiano C. S. Assumpção, Instituto Militar de Engenharia (IME), Pç Gen Tibúrcio, 80, Rio de Janeiro-RJ, e-mail: fca1y2@gmail.com; Arnaud C. Silveira, Centro Tecnológico do Exército (CTEx), Av. das Américas, 28705, Rio de Janeiro-RJ, e-mail: arnaud.silveira@eb.mil.br; Maurício H. C. Dias, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Av. Maracanã, 229, Rio de Janeiro-RJ, e-mail: mauricio.dias@cefet-rj.br.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FINEP (convênio FINEP-FAPEB nº 01.13.0369.00).

Inicialmente, a antena apresentada na Fig. 1, monopolo inclinada, foi simulada, varrendo-se o ângulo interno ( $\theta_0$ ) de  $15^\circ$  a  $90^\circ$ , com passos de  $0,75^\circ$ . Deste modo, foram geradas curvas de impedância para a frequência de ressonância ( $f_0$ ), calculada para  $l = \lambda_0/4$ , com  $\lambda_0 = c/f_0$  ( $c$  a velocidade da luz no ar),  $S_{11}$  com relação a  $50 \Omega$ , e diagramas de ganho (3D) em  $f_0$ . Então, foi feita uma validação parcial dessas simulações por comparação entre as curvas de impedância simuladas e as curvas de referência encontradas em [2].

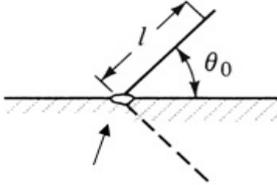


Fig. 1. Antena monopolo de  $\lambda/4$  inclinada sobre plano infinito PEC.

Na sequência, o efeito do revestimento dielétrico foi analisado, permitindo que o modelo usado na simulação da antena encurvada fosse mais próximo do cenário real. Assim, foram realizadas simulações do monopolo vertical para: raio do revestimento  $r_c =$  raio do fio da antena ( $r_f$ ),  $2 r_f$ ,  $4 r_f$  e  $8 r_f$ , com  $r_f = 0,1$  mm, como ilustrado na Fig. 2. Foram considerados dois materiais típicos como revestimento, teflon e borracha.

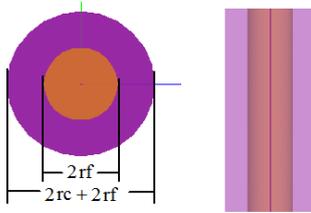


Fig. 2. Cortes horizontal e vertical da antena filamentar com revestimento.

Para avaliar o efeito do encurvamento, foram tomados por referência dois ângulos internos intermediários com relação ao solo ( $\theta_0 = 20^\circ$  e  $40^\circ$ ) e o caso do monopolo vertical, não afetado pela gravidade ( $\theta_0 = 90^\circ$ ). As antenas foram então simuladas nesses 3 ângulos sem considerar o efeito do peso, e depois, nos dois ângulos intermediários, considerando a ação da gravidade. O encurvamento adotado buscou aproximar o observado em um caso real de referência, exemplificado na Fig. 3 para  $\theta_0 = 40^\circ$ . Em todos os casos, fixou-se o teflon como material de revestimento,  $r_c = 2 r_f$  e  $l = 5$  m. Finalmente, foi feita análise comparativa das figuras de mérito geradas para esses casos. Ressalta-se que a presente análise carece, ainda, de validação experimental, como esperado de estudos similares baseados em métodos numéricos. Infelizmente, não foi possível realizar as medidas pertinentes para tal, no escopo deste trabalho.



Fig. 3. Antena HF de 5 m inclinada a  $40^\circ$ , sob ação da gravidade.

### III. ANTENA MONOPOLO INCLINADA

A antena da Fig. 1 foi simulada no 4NEC 2, de acordo com os passos descritos na seção II. As curvas de impedância de entrada foram utilizadas para validar as simulações, realizando comparação com curvas de referência disponíveis em [2], que também foram obtidas utilizando o método dos momentos. Na Fig. 4 estão dispostas as curvas de impedância em questão sobrepostas, sendo possível observar que a simulação está bem próxima dos resultados de referência.

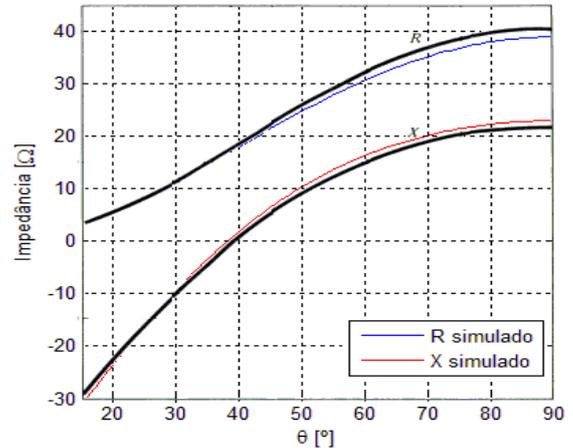


Fig. 4. Sobreposição das curvas de impedância de entrada simulada (colorido) e de referência [2] (em preto).

Com relação à radiação, tomando por base o comportamento de dipolos verticais e horizontais sobre plano PEC infinito disponível em [2], para  $\theta_0 > 60^\circ$  espera-se que a antena apresente polarização majoritariamente vertical, com diagramas de radiação quase idênticos aos do dipolo vertical ( $\theta_0 = 90^\circ$ ) consequentemente. Já para ângulos menores, o diagrama de radiação é direcionado para a horizontal, devido à maior excitação de campos com polarização horizontal. A Fig. 5 apresenta os diagramas de ganho 3D simulados para 3 valores de  $\theta_0$ :  $90^\circ$ ,  $40^\circ$  e  $20^\circ$ . Destaca-se que, ao inclinar a antena no eixo y, o ganho nessa direção diminui, tendo maior intensidade ao longo do eixo x. Adicionalmente, o nulo na direção z presente na configuração vertical tende a ser atenuado progressivamente, à medida que o monopolo inclinado se aproxima do solo. Esses resultados são compatíveis com o comportamento esperado daquela análise qualitativa.

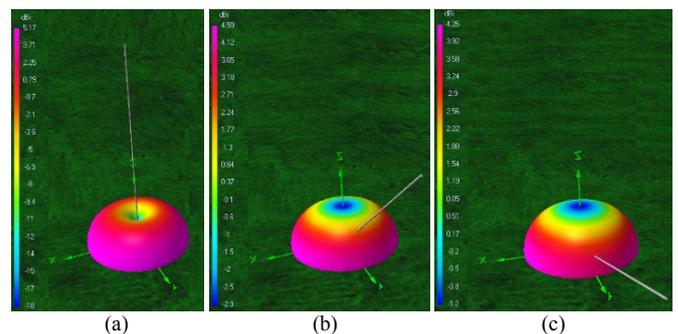


Fig. 5. Diagrama de ganho para  $\theta_0$  igual a (a)  $90^\circ$  (b)  $40^\circ$  e (c)  $20^\circ$ .

### IV. EFEITO DO REVESTIMENTO

Os materiais dielétricos apresentam condutividades baixas, da ordem de  $10^{-10}$  a  $10^{-20}$  S/m, sendo assim usualmente utilizados para confinar energia elétrica ou realizar o isolamento elétrico. Na prática, as antenas filamentosas são construídas por um filamento metálico com raio  $r_f$  e um revestimento dielétrico com raio  $r_f + r_c$ , que protege a parte interna da antena.

Para tornar as simulações mais próximas da realidade, o efeito do revestimento foi incorporado ao modelo da antena inclinada. Como descrito na seção II, foram considerados dois materiais (teflon e borracha) em quatro tamanhos diferentes de  $r_c$  ( $r_f$ ,  $2r_f$ ,  $4r_f$  e  $8r_f$ ). Estes materiais, bem como fibra de vidro, diversos tipos de polímeros que combinam diferentes materiais sintéticos, camada de tinta, entre outros, são típicos como revestimento de antenas [12]. O teflon foi simulado com  $\epsilon_r = 2,4$  e a borracha com  $\epsilon_r = 7$ .

Nas Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8, são apresentadas as figuras de mérito referentes à impedância de entrada para o teflon. Observa-se que, ao aumentar  $r_c$ , a frequência de ressonância diminui e a resistência e a reatância aumentam para a mesma frequência dentro da faixa analisada. Ressalta-se que, no intervalo de frequências avaliado (13 a 15 MHz), a resistência aumenta em no máximo 3  $\Omega$ , enquanto que a reatância aumenta em até cerca de 50  $\Omega$ , indicando que o uso do revestimento gera um efeito essencialmente indutivo.

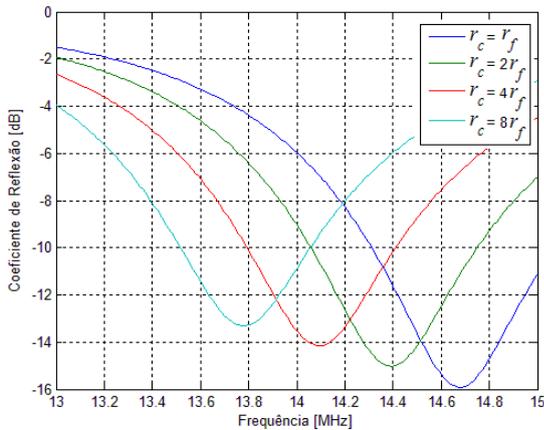


Fig. 6. Coeficiente de reflexão × frequência – revestimento de teflon.

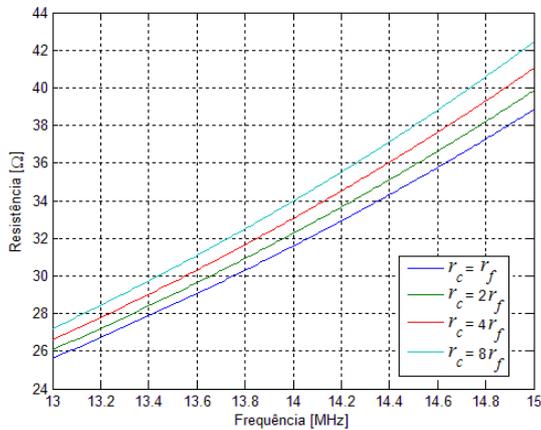


Fig. 7. Resistência × frequência – revestimento de teflon.

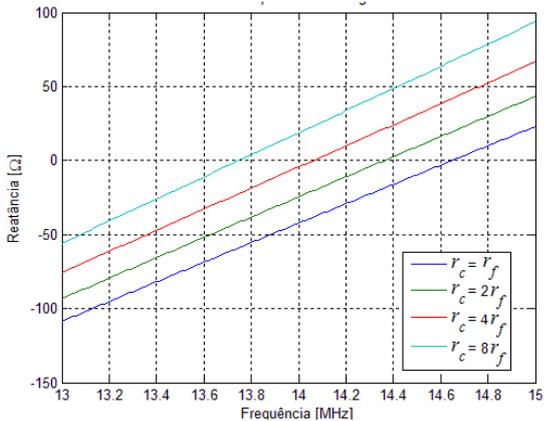


Fig. 8. Reatância × frequência – revestimento de teflon.

Nas Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11 são observadas curvas de comparação das impedâncias de entrada para os dois materiais. Os dois casos  $r_c = r_f$  são equivalentes ao fio exposto, e por isso apresentam curvas sobrepostas. De modo geral, verifica-se que, quanto maior a permissividade do material utilizado, menor é a frequência de ressonância e maiores são os valores de  $S_{11}$ , resistência e reatância. Ainda, observa-se que as diferenças relativas nas frequências de ressonância, nos parâmetros de  $S_{11}$  e nas impedâncias entre os diferentes materiais são pequenas.

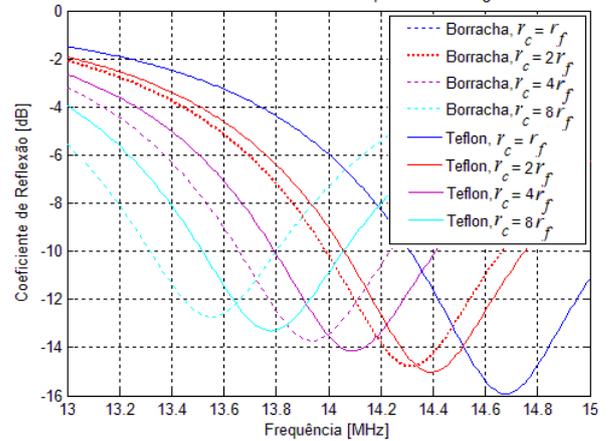


Fig. 9. Coeficiente de reflexão × frequência para os dois revestimentos.

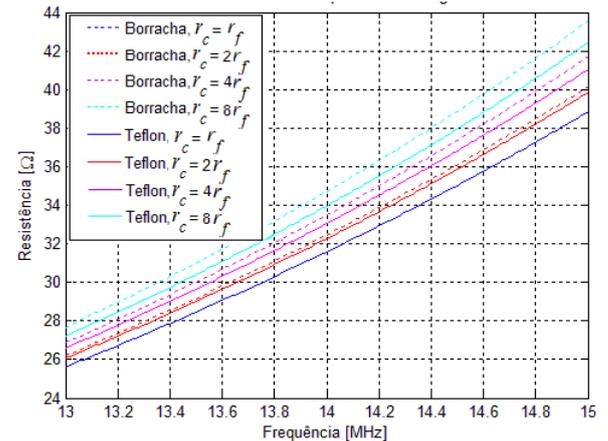


Fig. 10. Resistência × frequência para os dois revestimentos.

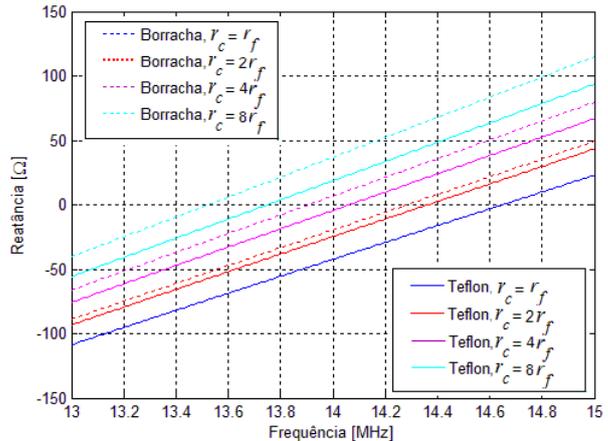


Fig. 11. Reatância × frequência para os dois revestimentos.

A antena de referência apresentava impedância de entrada similar à simulada com  $r_c = 2r_f$  e teflon como revestimento. Em função disso e da indisponibilidade de informações detalhadas sobre o material de composição da antena, adotou-se essa configuração como referência para análise do efeito de encurvamento, conforme detalhado na seção V.

V. ANTENA MONOPOLO ENCURVADA

Na presente análise, foi adotado um modelo aproximado da ação da gravidade, buscando casar a curva resultante à observada na situação real de referência. Desta forma, a antena foi dividida em 4 segmentos retos, com tamanhos fixos de 1,25 m. O efeito do encurvamento foi introduzido pela variável  $\Delta\theta$ , usada para diminuir o ângulo de inclinação, em relação ao eixo y, para cada segmento. Esse ângulo diminui em progressão aritmética, com razão de  $\Delta\theta$ , conforme indicado na Fig. 12. Tanto para  $\theta_0 = 20^\circ$ , quanto para  $\theta_0 = 40^\circ$ , o valor de  $\Delta\theta = 10^\circ$  levou a uma boa aproximação do caso real observado.

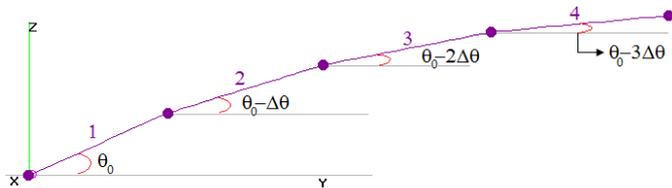


Fig. 12. Modelo utilizado nas simulações para a antena encurvada.

VI. ANÁLISE COMPARATIVA

Com o intuito de analisar o efeito do encurvamento sofrido pela antena, são apresentadas nas Fig. 13, Fig. 14 e Fig. 15 as figuras de mérito referentes à impedância de entrada (coeficiente de reflexão, resistência e reatância). Na legenda das figuras, as antenas “retas” correspondem aos monopolos inclinados teóricos, enquanto as “curvas” correspondem às configurações que incorporam a ação da gravidade.

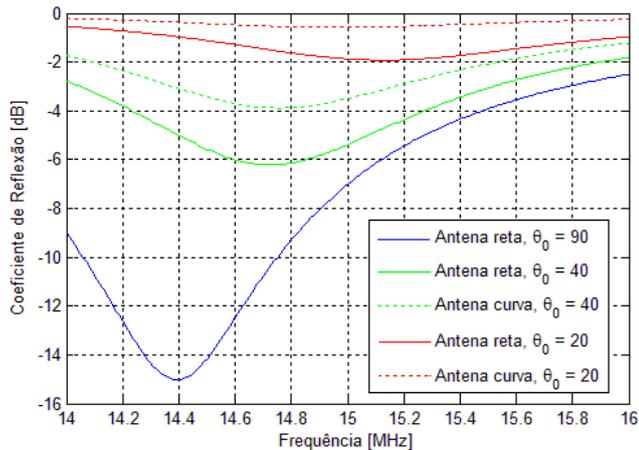


Fig. 13.  $S_{11} \times$  frequência – antenas “retas” e “curvas”.

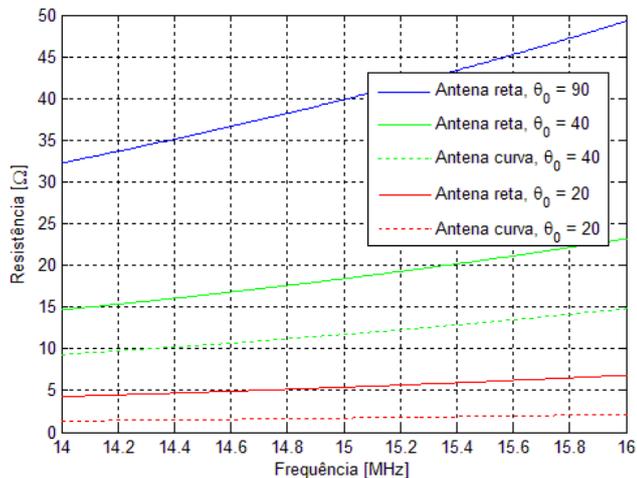


Fig. 14. Resistência  $\times$  frequência – antenas “retas” e “curvas”.

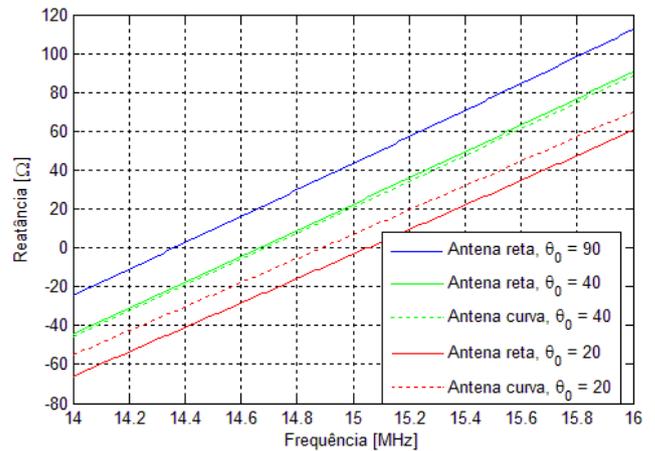


Fig. 15. Reatância  $\times$  frequência – antenas “retas” e “curvas”.

A. Efeito da inclinação

Comparando os parâmetros do monopolo vertical aos da antena inclinada, observa-se que à medida que  $\theta_0$  diminui, a frequência de ressonância e o valor de  $S_{11}$  tornam-se maiores. Ou seja, quanto mais próxima do solo a antena, pior o casamento de impedância. Já a resistência e a reatância diminuem, sendo que quanto menor  $\theta_0$ , menor é a variação absoluta da resistência ao longo da banda de frequência. Por exemplo, para  $\theta_0 = 20^\circ$  a resistência varia menos de  $3 \Omega$  ao longo da faixa analisada de 14 a 16 MHz. Já para  $\theta_0 = 40^\circ$  a variação é de cerca de  $9 \Omega$ . Para a monopolo vertical, essa variação é de  $17 \Omega$ , por sua vez. Interessante notar, entretanto, que a taxa de variação da reatância com a frequência praticamente não se alterou com a inclinação ( $\cong 70 \Omega/\text{MHz}$ ).

Tomando a ressonância  $f_0 = 15 \text{ MHz}$  da antena vertical como referência, a resistência para  $\theta_0 = 40^\circ$  ( $18,4 \Omega$ ) é 54% menor, e para  $\theta_0 = 20^\circ$ , a redução foi de 86,5%. Quanto à reatância, a redução com relação à da monopolo vertical ( $43,34 \Omega$ ) foi de 48,6 % para  $\theta_0 = 40^\circ$  e 108% para  $\theta_0 = 20^\circ$ .

B. Efeito do encurvamento

Com foco agora na diferença de desempenho das antenas “curvas” em relação às respectivas versões “retas”, percebe-se que o encurvamento piora o casamento de impedância nos dois casos ( $\theta_0 = 20^\circ$  e  $40^\circ$ ), como visto na Fig. 13. As frequências de ressonância aumentam ligeiramente também para as antenas encurvadas, em relação às das respectivas versões “retas”.

A piora de desempenho de  $S_{11}$  é melhor entendida analisando a resistência (Fig. 14) e a reatância (Fig. 15) diretamente. A resistência das antenas encurvadas diminui nos dois casos. Em  $f_0$ , para  $\theta_0 = 40^\circ$ , a redução foi de 36%, enquanto que para  $\theta_0 = 20^\circ$ , a redução foi de 68%. A reatância, por outro lado, quase não se altera para  $\theta_0 = 40^\circ$  (8%), mas sobe significativamente para  $\theta_0 = 20^\circ$ , alternando o comportamento capacitivo ( $-3,4 \Omega$ ) para indutivo ( $10,2 \Omega$ ). Interessante comentar, ainda, que o encurvamento também praticamente não alterou a taxa de variação da reatância com a frequência, como observado na Fig. 15.

A Fig. 16 apresenta os diagramas de ganho das duas configurações “curvas”. Qualitativamente, a forma dos diagramas permanece praticamente a mesma das respectivas versões “retas”, representada nas Fig. 5 (b) e (c). A Tabela I ajuda a analisar as diferenças entre todas essas versões, registrando os valores de ganhos máximo e mínimo em duas projeções ortogonais (planos xz ou  $\phi = 0$  e yz ou  $\phi = 90^\circ$ ).

Em ambas inclinações, o diagrama da antena “curva” foi praticamente o mesmo da “reta”. A antena “curva” tem ganho máximo menor que o da “reta” no plano xz: 6% para  $\theta_0 = 40^\circ$ , e 13,7% para  $\theta_0 = 20^\circ$ . No plano que contém a antena (yz), o ganho máximo também é maior para a antena “reta”: 7,3% para  $\theta_0 = 40^\circ$ , e 6,2% para  $\theta_0 = 20^\circ$ . Comportamento inverso ocorre com os valores mínimos de ganho, ou seja, aumentam com a diminuição de  $\theta_0$  e são maiores para as antenas “curvas”. Conclui-se que o encurvamento afeta pouco o diagrama de radiação, sendo a diferença um pouco maior no plano perpendicular ao que contém a antena e para  $\theta_0$  pequeno.

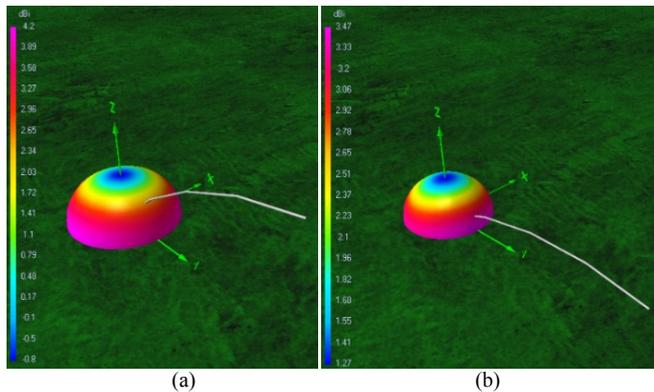


Fig. 16. Diagrama de ganho da antena encurvada: (a)  $\theta_0 = 40^\circ$  e (b)  $\theta_0 = 20^\circ$ .

TABELA I. GANHOS NOS PLANOS DE PROJEÇÃO ORTOGONAIS.

Antena	$\theta_0$ (°)	Plano $\phi = 0$		Plano $\phi = 90$	
		Ganho [dBi]		Ganho [dBi]	
		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Vertical	90	5,17	-∞	5,17	-∞
”Reta”	40	4,59	-2,93	4,23	-2,93
”Curva”		4,29	-1,13	3,92	-1,13
”Reta”	20	4,24	-1,21	3,69	-1,21
”Curva”		3,66	0,68	3,46	0,68

VII. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma análise da antena monopolo de  $\lambda/4$  encurvada, na faixa de HF, utilizada em aplicações táticas militares. O objetivo foi avaliar o efeito decorrente da gravidade nas figuras de mérito da antena, verificando inicialmente o efeito da inclinação da antena convencional e depois comparando-o com o da respectiva antena encurvada.

Para alcançar este objetivo, as antenas monopolo inclinada convencional e encurvada foram modeladas e simuladas no software 4NEC2. Primeiramente, validou-se parcialmente o modelo e a ferramenta adotados, simulando a antena inclinada convencional em diversos ângulos e comparando a curva de impedância de entrada na frequência de ressonância em função do ângulo interno com a de um trabalho de referência. Em seguida, foi inserido e avaliado o efeito do revestimento, a fim

de que os resultados fossem mais próximos dos disponíveis para a antena de referência. Por fim, para a configuração revestida mais próxima da de referência, foram feitas simulações das antenas inclinadas em dois ângulos e de suas respectivas versões encurvadas, e os resultados obtidos foram analisados comparativamente.

Verificou-se que o coeficiente de reflexão e a frequência de ressonância são sensíveis à inclinação e ao encurvamento da antena, tendo maiores alterações para menores valores de  $\theta_0$ . Essas alterações observadas são decorrentes tanto da resistência quanto da reatância de entrada, que apresentaram valores diferentes para as antenas “curvas”, em comparação com as versões “retas” correspondentes. Quanto ao ganho, o efeito do encurvamento foi relativamente pequeno, com variações da ordem de 10%, sendo mais significativo para ângulos  $\theta_0$  pequenos e no plano vertical ortogonal ao que contém a antena.

REFERÊNCIAS

- [1] S. R. Saunders e A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, 2ª ed., Wiley, 2007.
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4ª ed., New York: Wiley, 2016.
- [3] M. Ignatenko e D. S. Filipovic, “Application of Characteristic Mode Analysis to HF Low Profile Vehicular Antennas”, em: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, pp. 850-851, Jul 2014.
- [4] S. Saurabh, M. Ignatenko e D. S. Filipovic, “Two arm offset fed inverted-L antenna for vehicular HF communications”, em: *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 1604-1605, Jul 2015.
- [5] B. Allen, M. Ignatenko e D. S. Filipovic, “Low Profile Vehicular Antenna for Wideband High Frequency Communications”, em: *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 115-116, 2016.
- [6] M. Ignatenko e D. S. Filipovic, “On the design of vehicular electrically small antennas for NVIS communications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, n. 6, pp. 2136-2145, 2016.
- [7] G. Marrocco e L. Mattioni, “Naval structural antenna systems for broadband HF communications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 1065-1073, Abr 2006.
- [8] G. Marrocco, L. Mattioni e V. Martorelli, “Naval structural antenna systems for broadband HF communications—Part II: Design methodology for real Naval platforms”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 3330-3337, Nov 2006.
- [9] L. Mattioni, D. D. Lanzo e G. Marrocco, “Naval structural antenna systems for broadband HF communications—part III: Experimental evaluation on scaled prototypes”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 1882-1887, Jul 2008.
- [10] M. H. C. Dias, A. C. Silveira e M. B. T. Dantas, “Análise da sintonia de uma antena monopolo HF em viatura tática de comando e controle”, em: *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, Campina Grande, pp. 85-89, 2018.
- [11] A. Voors, “4NEC2 - NEC based antenna modeler and optimizer”, [Online]. Disponível em: <http://www.qsl.net/4nec2/>. [Acesso em Jan 2019].
- [12] “<https://www.telewave.com/2017/09/18/types-antenna-coatings/>”, [Online]. [Acesso em Mai 2019].