

# Análise da sintonia de uma antena monopolo HF em viatura tática de comando e controle

Maurício H. C. Dias, Arnaud C. Silveira, Márcio B. T. Dantas

**Resumo**—Viaturas táticas são um recurso usual em sistemas de comando e controle. Para o adequado estabelecimento dos enlaces de comunicações, é importante conhecer o desempenho das antenas instaladas no veículo. Este trabalho analisa uma antena monopolo HF em diferentes comprimentos e inclinações no topo de uma viatura tática. Com relação ao caso do monopolo ideal de  $\lambda/4$ , verificou-se que a frequência de ressonância ocorre até 20% abaixo da esperada. A inclinação deslocou essa frequência em até  $\pm 5\%$ . O diagrama de ganho manteve aspecto geral onidirecional, com queda de aproximadamente 10 dB próximo à direção vertical, em duas inclinações.

**Palavras-Chave**—Antenas monopolo, antenas HF, comando e controle, comunicações HF, rádio definido por software.

**Abstract**—Tactical vehicles are commonly used in command and control systems. For the proper establishment of communication links, it is important to investigate the performance of the antennas installed in the vehicle. This work analyzes an HF monopole antenna at different lengths and slopes at the top of a tactical car. With respect to the ideal  $\lambda/4$  monopole case, it was found that the resonance frequency occurs up to 20% below expected. The tilt shifted that frequency by up to  $\pm 5\%$ . The gain pattern kept the omnidirectional shape, with a drop around 10 dB close to the vertical direction, at two slopes.

**Keywords**—Command and control, HF antennas, HF communications, monopole antennas, software defined radio.

## I. INTRODUÇÃO

No contexto dos sistemas de comando e controle para aplicações de segurança pública ou militares, as comunicações em HF ainda se fazem pertinentes. Em que pese a baixa capacidade de transmissão da informação na banda convencionalmente definida de 3 a 30 MHz, os sistemas em HF se baseiam nos modos de propagação terrestre e ionosférico, o que confere alcances típicos de várias dezenas de quilômetros para o primeiro modo, e centenas ou milhares de quilômetros quando a ionosfera atua como refletor virtual das ondas eletromagnéticas [1]. Adicionalmente, os equipamentos atuais, microprocessados e com arquitetura definida por *software*, incorporam técnicas de processamento que habilitam a obtenção de taxas de dados mais elevadas que as dos antigos sistemas HF analógicos [2].

Sistemas de comando e controle contam tipicamente com a utilização de estações táticas móveis, viaturas como furgões ou caminhonetes com cabine ou *shelter*, que carregam os sistemas de comunicações nas diversas bandas de interesse. As antenas para esses veículos devem ser instaladas em posições viáveis mecanicamente na carroceria, como por exemplo, no teto.

Uma limitação inerente a sistemas HF diz respeito ao tamanho das antenas necessárias. Mesmo antenas curtas, como monopolos de  $\lambda/4$ , têm dimensões tão grandes ou maiores que as da própria viatura. Tendo em vista que a carcaça metálica do veículo é tomada, a priori, como a referência de terra para o monopolo, é de se esperar que o desempenho dessas antenas seja distinto do apresentado por um monopolo de  $\lambda/4$  sobre plano infinito e condutor perfeito. Diferentes comportamentos em termos de ressonância e radiação são esperados em função da dimensão do monopolo em relação à viatura, e de sua posição relativa na carroceria.

Do exposto, este trabalho tem por objetivo analisar o desempenho de uma antena monopolo HF instalada em viatura tática de comando e controle. Atenção especial foi dada à variação da ressonância natural com diferentes inclinações relativas ao solo e/ou ao teto da viatura e para diferentes comprimentos do monopolo. O comportamento de radiação nas frequências de ressonância também foi avaliado.

Para tal, este artigo foi dividido como se segue. A seção II descreve a metodologia adotada para a análise pretendida, justificando tal escolha. Os casos de uso e configurações das ferramentas e instrumentos utilizados são descritos na seção III. Os resultados obtidos são analisados na seção seguinte. Por fim, a seção V conclui o trabalho.

## II. METODOLOGIA

Neste trabalho, tomou-se por referência para o caso de uso o Programa Rádio Definido por *Software* de Defesa (RDS-Defesa), que prevê o desenvolvimento de equipamento para operar de 2 a 512 MHz na versão veicular, em sua fase atual [3]. A viatura escolhida para a análise foi uma Agrale Marruá com cabine S-788BR, de cerca de 5 m de comprimento por 2 m de largura, e altura do topo da cabine ao solo de 2,66 m, própria para operações táticas de comando e controle [4]. Por sua vez, a antena escolhida foi uma monopolo *whip* HF de 16 pés, com ângulo de inclinação ajustável na base, tal como a da Harris® [5]. A Fig. 1 ilustra essa configuração de referência, que foi disponibilizada aos autores deste trabalho pelo Centro Tecnológico do Exército (CTEx).

O foco deste trabalho foi o efeito da inclinação da antena em relação ao solo e/ou ao teto da viatura. Tomou-se como posição de instalação um dos cantos superiores traseiros da cabine, que corresponde a um caso de uso frequente. Apenas 3 inclinações foram consideradas: para frente da viatura (Frt), a  $-50^\circ$  do eixo vertical; sem inclinação, na posição vertical (Vrt); e para trás da viatura (Trs), a  $50^\circ$ . Esses ângulos são os mesmos previstos na base da antena de referência [5], ou seja, essa escolha também reproduz um caso de uso. Ainda, diferentes

Maurício H. C. Dias, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), Rio de Janeiro-RJ, e-mail: mauricio.dias@cefet-rj.br; Arnaud C. Silveira, Márcio B. T. Dantas, Centro Tecnológico do Exército (CTEx), Rio de Janeiro-RJ, e-mails: arnaud.silveira@eb.mil.br, toscano@ctex.eb.br.

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

comprimentos da antena de referência foram considerados. Além do comprimento de 16 pés (4,88 m), foram avaliados os casos hipotéticos de uma antena 50% menor (8 pés) e outra 50% maior (24 pés), de modo a tentar cobrir 3 sub-bandas distintas dentro da faixa de HF.

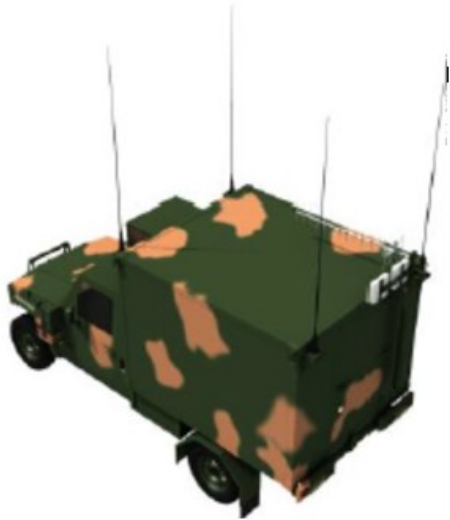


Fig. 1. Viatura tática de comando e controle de referência [4].

Uma técnica apropriada para analisar antenas HF em conjunto com sua plataforma de instalação é o Método dos Momentos [6], [7]. Na faixa de frequências de interesse deste trabalho, a modelagem em grade da estrutura veicular é suficiente para estimar os efeitos de acoplamento, permitindo analisar o desempenho da antena em diferentes posições relativas com boa exatidão. Trabalhos correlatos adotaram essa metodologia com bons resultados, como [8], [9], [10], [11].

Com isso, adotou-se uma ferramenta de análise de antenas por método dos momentos de fácil acesso e operação para a análise desejada: 4NEC2 [12]. A viatura foi modelada parcialmente por grades de fios interconectados que reproduziram as faces da carroceria. A antena foi tomada como um único fio, reproduzindo um monopolo. A Fig. 2 apresenta uma perspectiva 3D de um dos modelos assim gerados. Vale destacar que a escolha adequada do número de fios por face e da segmentação de cada fio é fortemente dependente da faixa de frequências de observação do conjunto. É preciso partir de uma referência inicial aproximada da frequência de ressonância para escolher o espaçamento entre os fios que compõem as faces em grade [12].

Com o modelo em grade definido, a análise na ferramenta NEC foi feita em duas etapas, para cada inclinação e tamanho do monopolo. Inicialmente, uma varredura em frequência em busca da ressonância natural do conjunto foi executada, gerando a resposta em frequência do coeficiente de reflexão (com relação a uma impedância de  $50 \Omega$ ). Desse resultado, a frequência de melhor sintonia ou ressonância (menor coeficiente de reflexão) foi identificada, e na sequência o respectivo diagrama de radiação de ganho foi calculado.

A validação das simulações se deu por medidas do coeficiente de reflexão do conjunto viatura + antena de referência, nas 3 inclinações. Para tal, foi utilizado um analisador de impedâncias portátil AEA Echo 1000 [13].

### III. CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS

A modelagem do conjunto viatura + antena no 4NEC2 partiu da geração do modelo da viatura usando sua

funcionalidade “geometry builder” para criação de blocos retangulares em grade. Dois blocos distintos foram construídos: um para cabine de comando e controle (parte de trás); outro para a frente da viatura. Optou-se por uma segmentação de baixa densidade (20 segmentos por comprimento de onda), tomando uma frequência próxima à esperada para o monopolo de 16 pés como referência (13 MHz). As grades foram compostas por fios de seção uniforme de 15 mm de raio, mesma dimensão adotada para o monopolo e sua base (de 40 cm de comprimento). Em todas as análises, o monopolo foi dividido em 21 segmentos e sua base dividida em 2. Cumpre destacar que a escolha desses valores de segmentação se deu após análise prévia dos limites de validade do método para cada frequência observada, em conjunto com a relação de compromisso esforço computacional  $\times$  exatidão. Em especial, a hipótese de filamentos de espessura infinitesimal da versão do método dos momentos na ferramenta utilizada impõe limite superior ao número de segmentos.

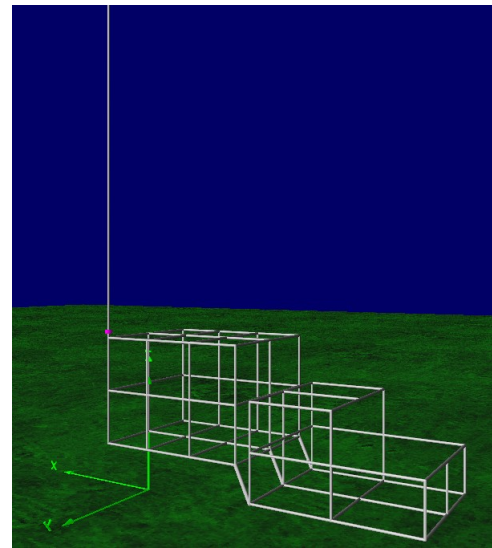


Fig. 2. Perspectiva 3D do modelo em grade da viatura de referência com antena monopolo de 16 pés sem inclinação, na ferramenta 4NEC2.

O ponto de alimentação escolhido foi o correspondente ao mais próximo da situação real, ou seja, no segmento inferior da base da antena (próximo à quina superior da cabine, como indicado no exemplo da Fig. 2). Uma fonte de tensão simples de 1 V foi considerada. O efeito do solo foi levado em conta também. Para reproduzir as condições do ambiente das medidas de validação, escolheu-se o solo real do tipo “bom” (permissividade relativa de 17 e condutividade de 15 mS/m). As rodas foram desconsideradas na modelagem.

Como descrito na seção anterior, 9 casos de uso foram simulados (3 comprimentos de monopolo  $\times$  3 inclinações). A varredura inicial de frequências em cada caso foi ajustada para buscar a frequência de ressonância respectiva. A simplicidade do modelo da viatura foi fundamental para agilizar esse processo, dado que essa busca exigia de 2 a 3 iterações. Os dados calculados de coeficiente de reflexão eram então plotados e armazenados para posterior análise.

Para cada caso de uso, na frequência de ressonância respectiva, o diagrama de radiação de ganho 3D foi calculado, em passos de  $5^\circ$  nos dois planos ortogonais. Cópias da perspectiva 3D e do conjunto de projeções azimutais e de elevação em ângulos apropriados foram então selecionadas e armazenadas para análise posterior.

Na etapa de validação, apenas a antena de 16 pés foi avaliada, pois era a única disponível. O analisador de impedância foi configurado para medida de 4 a 54 MHz, em passos de 0,2 MHz. Para reduzir os efeitos de incertezas, em cada inclinação relativa foram tomadas 4 medidas em posições distintas do operador. A média das 4 respostas (em dB) foi então tomada como a representativa das medidas. O efeito do cabo coaxial utilizado foi desconsiderado, pois na faixa avaliada, a perda de inserção era menor que 1 dB.

#### IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O primeiro aspecto avaliado foi a ressonância natural do conjunto monopolo + viatura nas diferentes inclinações. A Fig. 3 reproduz os resultados simulados e medidos da variação do coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) com a frequência para as 3 inclinações. As linhas pontilhadas em -5,1 e -9,5 dB equivalem aos limiares típicos de taxa de onda estacionária (SWR) de 3,5 e 2, respectivamente, para definição de largura de banda da antena. Houve boa concordância das ressonâncias medidas e simuladas, validando o modelo adotado. Vale apontar alguns parâmetros críticos no modelo geométrico no 4NEC2 associados a essa convergência. Em especial, o espaço de cerca de 20 cm entre a cabine e a frente da viatura e a escolha do plano de terra real tiveram impacto significativo.

Estendendo a análise para os demais comprimentos do monopolo, chegou-se aos resultados ilustrados na Fig. 4 (24 pés) e na Fig. 5 (8 pés). Observando o efeito da inclinação nas Figs. 3 a 5, percebe-se que a antena para trás da viatura (Trs) aumenta o comprimento elétrico do conjunto, reduzindo a frequência de ressonância, com relação à orientação vertical do monopolo (Vrt). O efeito inverso é observado para a antena inclinada para frente (Frt), por sua vez. A Tabela I destaca as frequências de ressonância para os 3 comprimentos e as 3 inclinações avaliadas. As respectivas ressonâncias esperadas para a antena ideal de referência, o monopolo de  $\lambda/4$  com plano de terra condutor perfeito e infinito ( $f_0$ ), são indicadas também para fins de comparação. Apenas para a antena de 24 pés, o efeito da inclinação para trás foi aparentemente mais atenuado que o esperado. A Tabela II quantifica o percentual de deslocamento das frequências de ressonância para os 3 comprimentos testados. Observa-se que os desvios podem chegar a quase 5%, e crescem com a frequência de ressonância.

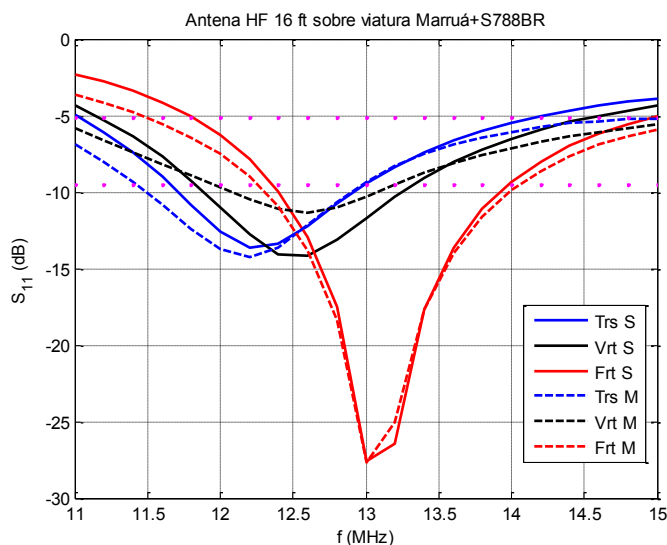


Fig. 3.  $S_{11}$  da antena de 16 pés em diferentes inclinações (simulações – S; medidas – M; orientações Trs, Vrt e Frt, respectivamente, para trás da viatura, vertical e para frente da viatura).

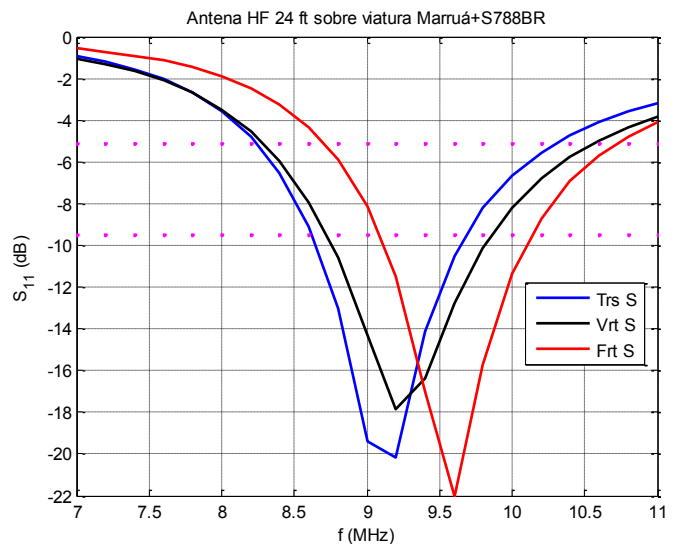


Fig. 4.  $S_{11}$  da antena de 24 pés em diferentes inclinações (simulações – S; orientações Trs, Vrt e Frt, respectivamente, para trás da viatura, vertical e para frente da viatura).

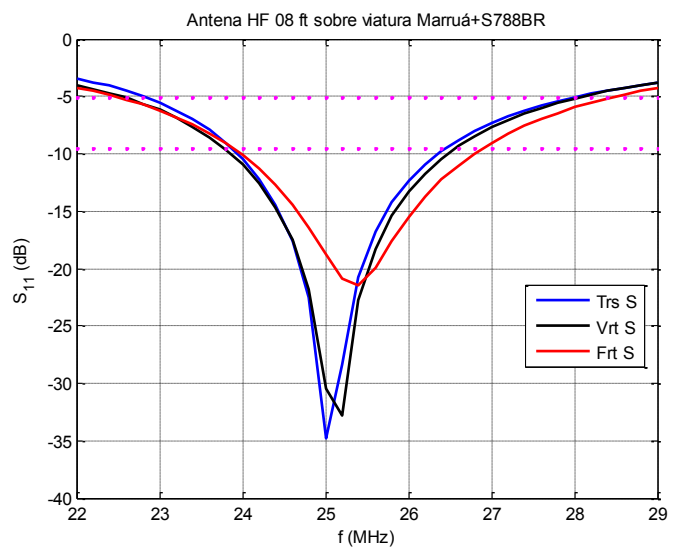


Fig. 5.  $S_{11}$  da antena de 8 pés em diferentes inclinações (simulações – S; orientações Trs, Vrt e Frt, respectivamente, para trás da viatura, vertical e para frente da viatura).

TABELA I. FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA IDENTIFICADAS

Tamanho (pés)	$f_0$ (MHz)	$f_{Trs}$ (MHz)	$f_{Vrt}$ (MHz)	$f_{Frt}$ (MHz)
8	30,7	25,0	25,2	25,4
16	15,4	12,2	12,6	13,0
24	10,3	9,2	9,2	9,6

TABELA II. DESVIOS RELATIVOS DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DAS CONFIGURAÇÕES INCLINADAS EM RELAÇÃO À DA ORIENTAÇÃO VERTICAL

Tamanho (pés)	$f_0$ (MHz)	$f_{Vrt}$ (MHz)	$\Delta f_{Trs}$ (%)	$\Delta f_{Frt}$ (%)
8	30,7	25,2	0	4,35
16	15,4	12,6	-3,2	3,2
24	10,3	9,2	-0,8	0,8

Ainda quanto à sintonia da antena, outro aspecto interessante avaliado foi o desvio em relação à antena ideal de referência. A Tabela III compara as frequências de referência  $f_0$

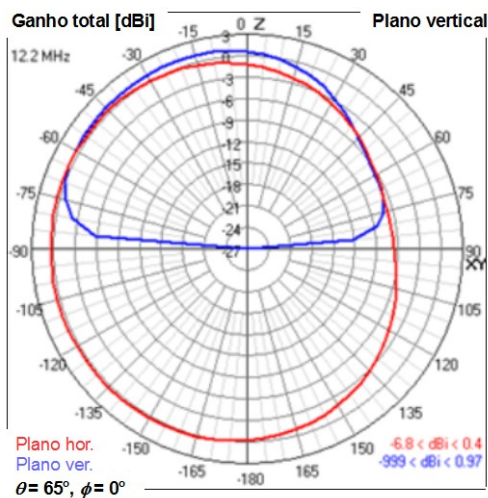


com as correspondentes às medidas e simulações na orientação vertical ( $f_{Vrt}$ ). O desvio também foi crescente com a frequência de ressonância, e chegou a até 20% nos cenários testados.

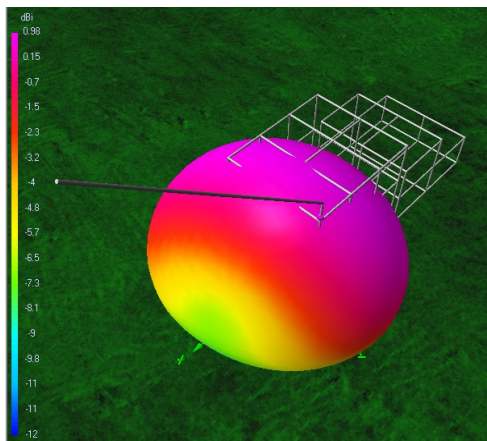
TABELA III. DESVIOS DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA NA ORIENTAÇÃO VERTICAL COM RELAÇÃO À ESPERADA PARA UM MONOPOLO IDEAL

Tamanho (pés)	$f_0$ (MHz)	$f_{Vrt}$ (MHz)	$\Delta f$ (%)
8	30,7	25,2	18,0
16	15,4	12,6	18,0
24	10,3	9,2	10,2

Sob o ponto de vista da radiação, foram calculados os diagramas de ganho para a antena de 16 pés nas 3 inclinações, cada qual em sua frequência de ressonância respectiva. A Fig. 6 apresenta o diagrama 3D e as projeções horizontal e vertical selecionadas do caso de inclinação para trás (Trs). A orientação vertical (Vrt) é representada de forma análoga na Fig. 7, e a inclinação para frente (Frt) na Fig. 8.



(a)

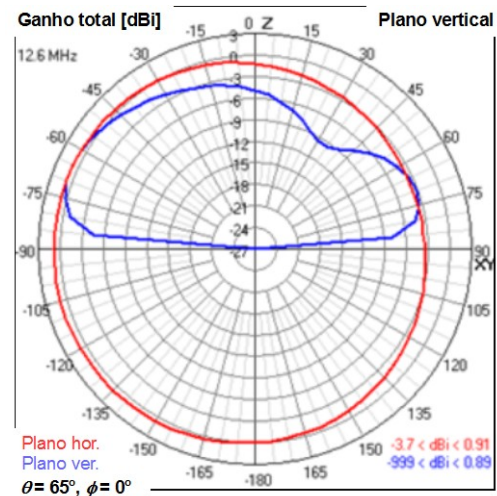


(b)

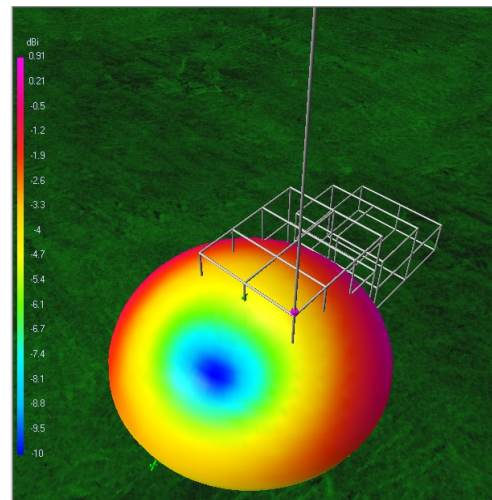
Fig. 6. Diagrama de ganho na frequência de ressonância (12,2 MHz) para a antena de 16 pés inclinada para trás (Trs): (a) 3D, (b) projeções 2D.

Nos 3 casos percebe-se que a forma geral se assemelha à esperada para um dipolo vertical sobre solo condutor imperfeito (vide [6]). Há o surgimento de uma região de “nulo” na parte traseira da viatura, que pode ser crítico para o modo NVIS (*Near Vertical Incidence Skywave* – onda celeste de incidência quase vertical) [14], em especial nos casos da inclinação para frente e da orientação vertical. Nessas duas inclinações, a queda chega a cerca de 10 dB. Em essência a

assimetria do conjunto monopolo + antena impõe ao operador de rádio o cuidado ao tentar apontar as antenas para estabelecimento de um enlace. Quanto aos ganhos, os valores máximos obtidos foram baixos (menores que 1 dB), reflexo da baixa eficiência calculada pelo modelo. No entanto, a exatidão desses valores de ganho carece de validação experimental.



(a)



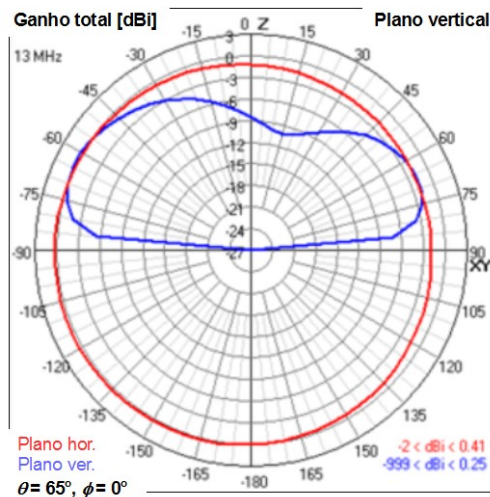
(b)

Fig. 7. Diagrama de ganho na frequência de ressonância (12,6 MHz) para a antena de 16 pés em orientação vertical (Vrt): (a) 3D, (b) projeções 2D.

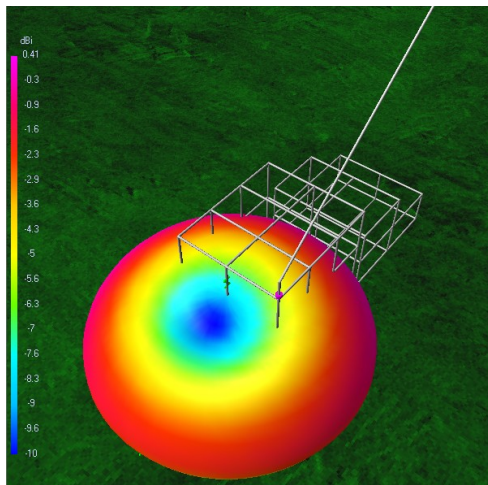
## V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma análise da sintonia de antenas monopolo HF instaladas em viatura tática de comando e controle, com foco no efeito das variações do comprimento do monopolo e de sua inclinação com relação ao solo. Para tal, tomou-se uma viatura e uma antena disponíveis comercialmente como referências de casos de uso esperados em uma aplicação como a do RDS-Defesa.

A metodologia consistiu na simulação do conjunto viatura + antena em ferramenta de análise de antenas baseada no método dos momentos aplicado a estruturas filamentosas, como o 4NEC2. Dessa abordagem, foi possível calcular coeficientes de reflexão e diagramas de ganho. A validação do método se deu por medidas do coeficiente de reflexão de uma antena de 16 pés instalada em uma viatura tática disponível, nas 3 inclinações relativas consideradas, com boa concordância entre medidas e simulações.



(a)



(b)

Fig. 8. Diagrama de ganho na frequência de ressonância (13 MHz) para a antena de 16 pés inclinada para frente (Frt): (a) 3D, (b) projeções 2D.

Os resultados da análise do coeficiente de reflexão apontaram dois comportamentos importantes. O primeiro diz respeito ao desvio da frequência de ressonância com relação à inclinação. Tomando a orientação vertical como referência, inclinar para frente ou para trás da viatura acarretou em desvios de até 5%, respectivamente para cima ou para baixo do espectro. O segundo aspecto serve de referência para o operador estimar o desvio que deve encontrar com relação à antena monopolo ideal, ao instalar seu monopolo na viatura. Verificou-se que tais desvios chegaram a quase 20% no pior caso. Os dois tipos de desvios observados foram tanto maiores quanto menor foi o monopolo em relação às dimensões da viatura.

O comportamento de radiação também foi analisado nas frequências de ressonância da antena de 16 pés, indicando um comportamento geral similar ao esperado de um dipolo vertical sobre plano de terra imperfeito. A assimetria da estrutura levou a uma degradação de cerca de 10 dB com relação ao ganho máximo, em direções próximas à vertical para a orientação vertical e para a inclinação frontal, o que deve ser considerado pelo operador ao projetar o estabelecimento de enlaces.

Como trabalhos correlatos futuros, pretende-se ampliar a presente análise considerando o efeito da instalação em outras

posições menos frequentes de uso, como sobre o teto na parte da frente da cabine, ou na altura do parachoque na parte de trás, por exemplo. Cabem, também, estudos de busca da posição e/ou inclinação ótima por frequência de ressonância para um requisito de sistema especificado que se deseje priorizar, como largura de banda ou ganho numa dada direção. Por fim, é desejável reproduzir este trabalho em ferramenta mais sofisticada de análise de antenas, de modo a obter maior exatidão e confiabilidade nos resultados.

#### AGRADECIMENTOS

À FINEP, pelo fomento ao Programa RDS-Defesa, e à FAPEB, pela gestão do contrato respectivo. Menção especial ainda ao colega Márcio Nascimento Bispo, pelas trocas de ideias sobre o tema deste artigo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] S. R. Saunders e A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, 2nd ed., Wiley, 2007.
- [2] W. Tuttlebee, *Software Defined Radio: Enabling Technologies*, Wiley, 2002.
- [3] M. G. C. Branco, F. A. Roelli, F. H. d. Silva, F. R. Pereira, G. C. Lima, M. A. Miquelino, R. P. d. H. Moreno, S. L. Ribeiro, D. F. C. Moura e J. F. Galdino, "Rádio Definido por Software do Ministério da Defesa – Visão geral das primeiras contribuições do CPqD," *Cadernos CPqD Tecnologia*, vol. 10, n. esp., pp. 9-16, Novembro 2014.
- [4] RF COM, "Aplicações Militares: Mobilidade Sistemas Táticos," 26 Fev 2014. [Online]. Available: [http://rf.com.br/wp-content/uploads/2014/02/0602\\_a.pdf](http://rf.com.br/wp-content/uploads/2014/02/0602_a.pdf). [Acesso em 01 Mar 2018].
- [5] Harris Corporation, "SB-V12F, SB-V16B, SB-V16C, SB-V16F, SB-V35B, SB-V35C, SB-V35F HF Whip and RF-1980 HF Tilt Whip Antennas - Instruction Manual," Harris Corporation, Rochester, 2013.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., New York: Wiley, 2016.
- [7] M. N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, 2nd ed., New York: CRC Press, 2000.
- [8] M. Ignatenko e D. S. Filipovic, "Evaluation of Vehicle Bottom for the Placement of HF-VHF Antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, n. 2, pp. 776-781, February 2015.
- [9] D. G. Lopez, M. Ignatenko e D. S. Filipovic, "Low-Profile Tri-band Inverted-F Antenna for Vehicular Applications in HF and VHF Bands," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, n. 11, pp. 4632-4639, November 2015.
- [10] G. Marrocco e L. Mattioni, "Naval Structural Antenna Systems for Broadband HF Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, n. 4, pp. 1065-1073, April 2006.
- [11] B. A. Austin e W. C. Liu, "Assessment of vehicle-mounted antennas for NVIS applications," *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 149, n. 3, pp. 147-152, Jun 2002.
- [12] A. Voors, "4NEC2 - NEC based antenna modeler and optimizer," 15 12 2015. [Online]. Available: <http://www.qsl.net/4nec2/>. [Acesso em 22 11 2017].
- [13] AEA Technology Inc., "VIA Echo Vector Network Analyzers," [Online]. Available: <http://www.aeatechnology.com/via-echo-vector-network-analyzers>. [Acesso em 13 10 2017].
- [14] B. A. Witvliet e R. M. Alsina-Pagés, "Radio Communication via Near Vertical Incidence Skywave propagation: an overview," *Telecommunication Systems*, vol. 66, n. 2, pp. 295-309, 2017.