

# Efeitos do plano-terra finito sobre a impedância e o ganho de uma antena monopolo de quarto de onda

Fabiano Carvalho dos Santos Assumpção<sup>a</sup>, Maurício Henrique Costa Dias<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>b</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil

\*fabianoassumpcao@id.uff.br

**RESUMO:** Em sistemas táticos de radiocomunicações em veículos ou embarcações, é comum usar antenas monopolo de quarto de onda aproveitando a própria estrutura como plano-terra. Comumente, assume-se plano-terra condutor perfeito e infinito para análise, especialmente quando o tamanho da estrutura é alguns comprimentos de onda maior. Este trabalho apresenta uma análise numérica dos efeitos do tamanho e da forma geométrica do plano-terra nos parâmetros de performance da antena. O posicionamento assimétrico do monopolo no plano-terra também é analisado. Boa concordância entre resultados simulados e disponíveis na literatura foi observada, quanto ao tamanho do plano-terra. Analisando o posicionamento assimétrico, observou-se que o lóbulo principal do diagrama de ganho vertical tende a direcionar-se para onde há maior porção de plano-terra restante. No plano horizontal, o comportamento circular é perdido quando a antena se aproxima das bordas do plano-terra. A impedância de entrada mostra pouca variação até a frequência natural de ressonância.

**PALAVRAS-CHAVE:** Antenas monopolo. Comunicações táticas. Diagrama de radiação de antenas. Plano-terra.

**ABSTRACT:** In tactical radio systems in vehicles or ships, it is common to use quarter-wave monopoles taking advantage of the structure itself as the ground-plane. Usually, a flat infinite perfect conductor ground-plane is assumed for analysis, especially when the structure length is few wavelengths larger. This work presents a numerical analysis of the antenna performance parameters for different sizes and geometric shapes for the ground-plane. Moreover, the monopole asymmetric positioning on the ground-plane is analyzed. Regarding the ground-plane size, it is possible to observe a good correlation between the simulated results and the literature. From the asymmetric positioning analysis, the main lobe of the vertical gain pattern tends to point to where there is the greatest portion of ground-plane left. In the horizontal plane, as the antenna approaches the ground-plane edges, it loses its circular behavior. The input impedance varies very little up to the natural resonance frequency.

**KEYWORDS:** Antenna radiation patterns. Ground-plane. Monopole antennas. Tactical communications.

## 1. Introdução

A instalação de antenas em viaturas ou embarcações voltadas para aplicações táticas é um problema à parte a ser analisado, em função de diversos aspectos. Dentre eles destacam-se: o posicionamento relativo da antena na estrutura, como em [1, 2, 3, 4]; o acoplamento mútuo entre a antena e os elementos condutores de maior dimensão, dada a relativa proximidade entre eles; o fato do local de fixação da antena ser um plano-terra finito [5]; aspectos de compatibilidade eletromagnética [6, 7]; etc.

No cenário específico da operação de sistemas de radiocomunicações navais, é possível destacar alguns trabalhos correlatos, especialmente analisando antenas

dipolo ou monopolo, muito utilizadas nas faixas de HF a UHF. Em [6], a exposição humana à radiação não ionizante em navios é analisada. Já em [8, 9, 10, 11, 12, 13], por exemplo, são apresentados projetos de antenas utilizando o mastro ou a chaminé como parte do elemento radiador. Nesses trabalhos, explorou-se a possibilidade de controlar o comportamento de radiação pela defasagem de corrente e pelo posicionamento espacial entre os elementos radiadores.

O desempenho de uma antena monopolo de  $\lambda/4$  sobre plano-terra infinito e composto por material PEC, sigla em inglês para condutor elétrico perfeito, é amplamente conhecido, vide [14, 15]. Entretanto, nas situações reais, as estruturas que atuam como plano-terra são finitas e imperfeitas. Nesse cenário, a equivalência da antena

monopolo com a antena dipolo fica parcialmente comprometida, pois a imagem virtual associada à reflexão no plano-terra não representa os efeitos decorrentes das difrações nas bordas do plano [16], alterando entre outros aspectos, a reatância de entrada da antena, o diagrama de ganho [5] e o coeficiente de reflexão [17].

Nesse contexto, poucos estudos são encontrados sobre a influência de diferentes dimensões e formatos do plano-terra finito no desempenho de antenas em embarcações, bem como sobre o efeito do posicionamento de antenas tipo monopolo fora do centro do plano-terra. O uso de técnicas numéricas e/ou assintóticas é recomendável, tais como o Método dos Momentos, para planos-terra pequenos, e a Teoria Geométrica da Difração, para planos maiores [18]. De qualquer forma, pouca discussão se encontra na literatura de forma detalhada sobre o problema específico em questão.

Assim, este trabalho tem por objetivo apresentar uma visão analítica sobre os efeitos do plano-terra finito nos principais parâmetros de uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , em especial na impedância de entrada e no diagrama de ganho. De forma complementar a trabalhos correlatos, como [16, 19], a discussão inclui os efeitos do posicionamento assimétrico da antena no plano-terra.

A seção 2 aborda a metodologia usada para realização das análises pretendidas. Já as seções 3 e 4 apresentam, respectivamente, resultados referentes a tamanhos e formatos diferentes de plano-terra, comparando-os com valores de referência. Na seção 5, o posicionamento assimétrico da antena no plano-terra é analisado, comparando as figuras de mérito simuladas com a situação em que a antena está no centro do plano-terra. Por fim, a seção 6 conclui o trabalho.

## 2. Metodologia

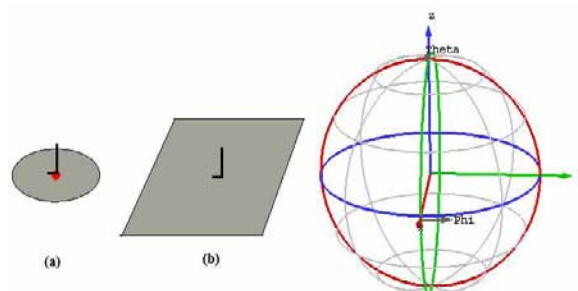
Adotou-se uma abordagem numérica para a análise, realizada por meio de um *software* de análise eletromagnética, o *CST Studio Suite*® [20]. O solver utilizado foi o *Time Domain Solver*, que se baseia na técnica de integração finita, eficiente para aplicações em altas frequências.

Para as simulações foi utilizada uma antena

monopolo de  $\lambda/4$ , com comprimento de 0,125 m, ou seja,  $\lambda = 0,5$  m, o que remete à frequência de ressonância teórica de 600 MHz. Tais parâmetros foram escolhidos pois apresentam boa relação entre tempo de simulação e convergência do método numérico. O monopolo foi modelado como um filamento metálico com raio  $r_a = 1$  mm sobre um plano-terra PEC finito em  $z = 0$ . Em todas as simulações, as seguintes figuras de mérito foram geradas: impedância de entrada (resistência e reatância); e diagrama de ganho.

Para analisar os resultados obtidos com as simulações, foi escolhido como caso de referência, uma antena monopolo vertical de  $\lambda/4$ , sobre plano-terra infinito composto por material PEC. A partir deste cenário foram variados os formatos (circular ou quadrado) do plano-terra e seu tamanho. Em seguida, foram fixados o formato e o tamanho do plano-terra e variou-se o posicionamento da antena.

Os efeitos do tamanho e formato do plano-terra foram analisados a partir de simulações com o monopolo centralizado sobre um plano-terra quadrado, com lado  $l = 3\lambda, 7\lambda$  e  $20\lambda$  e sobre um plano-terra circular, com diâmetro  $D = 3\lambda, 7\lambda$  e  $20\lambda$ , exemplificados na **figura 1**. Esses tamanhos foram escolhidos para permitir a comparação com resultados disponíveis em [5], como forma de validação das simulações. Por último, realizaram-se simulações do monopolo posicionado fora do centro do plano-terra, com o formato quadrado de  $l = 3\lambda$ . A escolha pelo plano-terra de menor tamanho para análise do posicionamento assimétrico do monopolo foi para evidenciar melhor as eventuais diferenças observadas nos parâmetros da antena, em relação ao caso de referência.



**Fig. 1** – Monopolo de  $\lambda/4$  fixado no centro de um plano-terra (a) circular de diâmetro  $D$  e (b) quadrado de lado  $l$ .

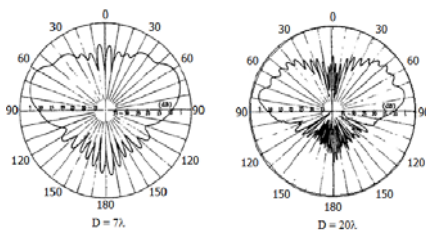
### 3. Influência do tamanho do plano-terra

#### 3.1 Comportamento de radiação

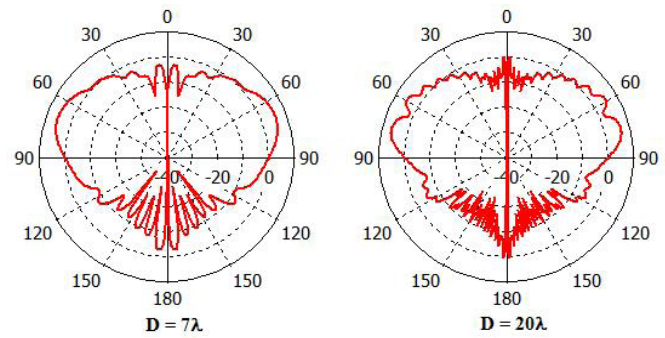
Considerando um plano-terra PEC infinito, o máximo de radiação de uma antena monopolo de  $\lambda/4$  ocorre a  $90^\circ$  de elevação ( $\phi = 90^\circ$ ), situação de referência. Contudo, quando o plano-terra é finito, o diagrama de ganho é modificado principalmente pelas difrações ocorridas nas bordas e pelo *gap* de alimentação [16].

Como nessa simulação a antena está fixada no centro do plano-terra, as distâncias para a borda do plano nos eixos  $x$  e  $y$  são iguais, e, portanto, os diagramas de ganho nos planos  $\phi = 0$  e  $90^\circ$  são idênticos. Os resultados de diagrama de ganho nos planos  $\phi = 0$  ou  $90^\circ$  disponíveis em [5], para o caso do plano-terra circular, são reproduzidos na **figura 2**, ao passo que os simulados estão dispostos na **figura 3**. Observa-se que há boa concordância entre as curvas respectivas. Os resultados da simulação do cenário de plano-terra quadrado, por sua vez, estão ilustrados na **figura 4**. A **tabela 1** reproduz as principais métricas observadas nos diagramas de ganho dos dois cenários simulados.

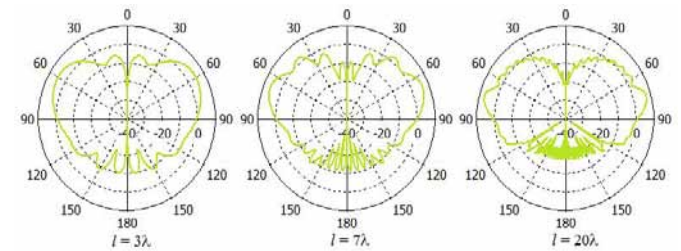
Dos resultados obtidos, verifica-se que a direção de máxima radiação é distinta da situação de referência, chegando até  $31^\circ$  de diferença. Quanto maior o tamanho do plano-terra, mais próximo de  $\theta = 90^\circ$  o ângulo de máxima radiação fica e menores são os lóbulos em  $\theta = 0^\circ$ , ou seja, caso o plano-terra seja pequeno, uma grande parcela de potência é radiada na direção perpendicular. Outro fato interessante é que, à medida que o tamanho do plano-terra aumenta, o ganho máximo também aumenta, e o número de lóbulos secundários na proximidade de  $\theta = 0^\circ$  aumenta também, porém com potência cada vez menor.



**Fig. 2** – Diagramas de ganho (plano vertical), em dB, de uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra circular de diâmetro  $D$  (adaptado de [5]).



**Fig. 3** – Diagramas de ganho (plano vertical), em dB, simulados de uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra circular de diâmetro  $D$ .



**Fig. 4** – Diagramas de ganho (plano vertical), em dB, simulados de uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra quadrado de lado  $l$ .

**Tab. 1** – Ganho máximo e direção de máxima radiação para diferentes planos-terra

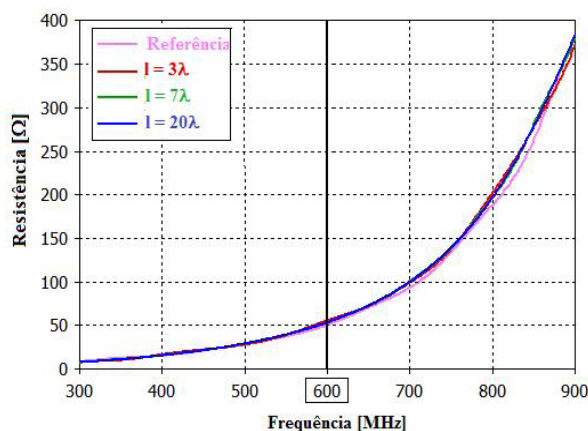
| Tamanho do plano-terra [ $\lambda$ ] | Formato do plano-terra | Ganho máximo [dB] | Direção de radiação do lóbulo principal [ $^\circ$ ] |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------|--|
| 3                                    | Quadrado               | 4,7               | 59   |
|                                      | Circular               | 4,43              | 62   |
| 7                                    | Quadrado               | 5,96              | 68   |
|                                      | Circular               | 5,5               | 69   |
| 20                                   | Quadrado               | 6,96              | 75   |
|                                      | Circular               | 6,21              | 76   |

#### 3.2 Impedância de entrada

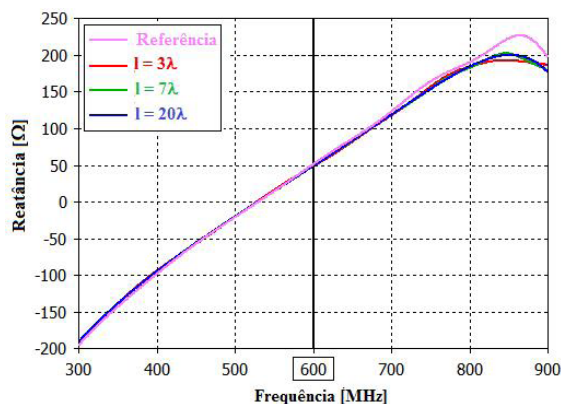
A alteração do tamanho do plano-terra não gera alterações significativas na impedância de entrada, independentemente do formato, pelo menos até a frequência natural de ressonância da antena. Nessa faixa, para plano-terra quadrado, a variação na resistência de entrada entre os diferentes tamanhos de plano-terra não ultrapassou  $2 \Omega$  e a diferença máxima para referência foi de  $5 \Omega$ . Na faixa acima da frequência natural de ressonância, houve uma variação maior, chegando até  $20 \Omega$  para os diferentes

tamanhos de plano-terra e  $50 \Omega$  para a referência, conforme verifica-se na **figura 5**.

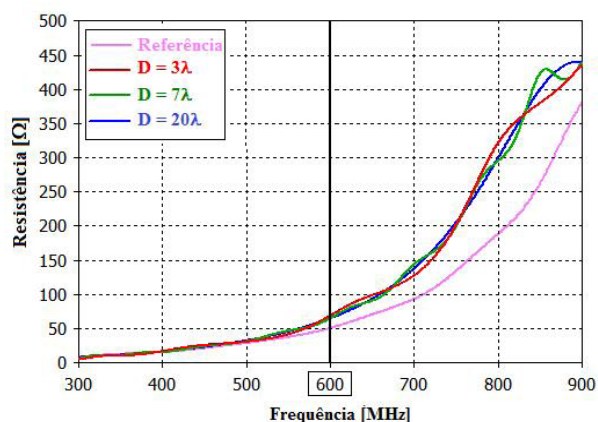
Quanto à reatância de entrada, ela apresenta comportamento semelhante ao da resistência, porém com variações menores que aquelas observadas para resistência até a frequência de ressonância natural. A diferença de reatância para os diferentes tamanhos de plano-terra quadrado não ultrapassou  $1 \Omega$  e para a referência  $3 \Omega$ . Para as frequências simuladas acima da ressonância essa diferença chegou até  $22 \Omega$  para os diferentes tamanhos de plano-terra quadrado e  $88 \Omega$  para a referência, como ilustrado na **figura 6**. Para plano-terra circular, o comportamento é parecido com o do plano-terra quadrado, porém as variações encontradas em frequências acima da frequência natural de ressonância foram maiores e se estenderam por uma faixa maior, vide **figuras 7 e 8**.



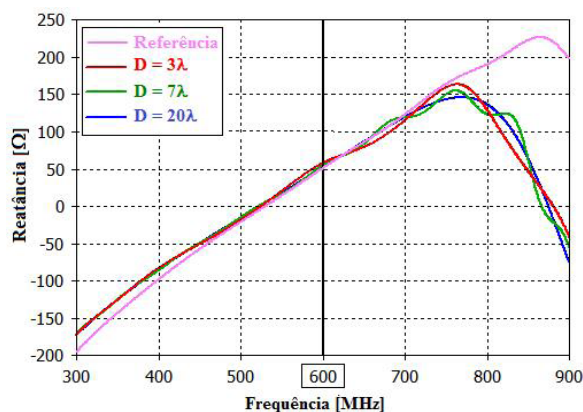
**Fig. 5** – Resistência de entrada para uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra quadrado de diferentes tamanhos.



**Fig. 6** – Reatância de entrada para uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra quadrado de diferentes tamanhos.



**Fig. 7** – Resistência de entrada para uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra circular de diferentes tamanhos.



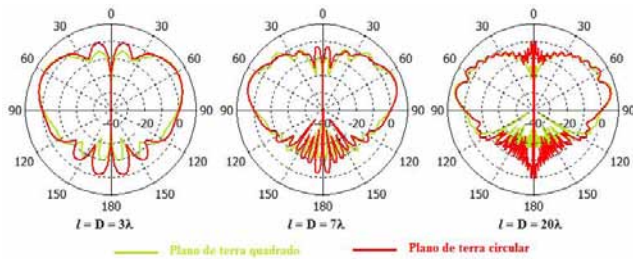
**Fig. 8** – Reatância de entrada para uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra circular de diferentes tamanhos.

## 4. Influência do formato do plano-terra

### 4.1 Comportamento de radiação

Antenas sobre planos circulares recebem diversas contribuições oriundas das bordas do plano-terra, todas em fase, por isso apresentam maior radiação em torno de  $\theta = 0^\circ$  em relação às antenas sobre planos-terra quadrados, como é possível observar na **figura 9**. Ainda, em [21], verificou-se que planos-terra retangulares apresentam resultados similares aos de planos-terra quadrados. Desta forma, destaca-se que o formato do plano-terra apresenta influência mais perceptível na quantidade de energia radiada em  $\theta = 0$  e  $180^\circ$ .

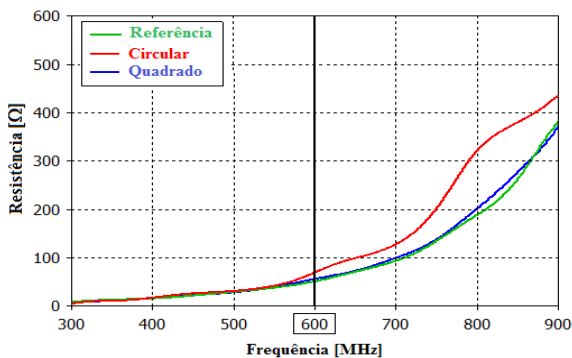




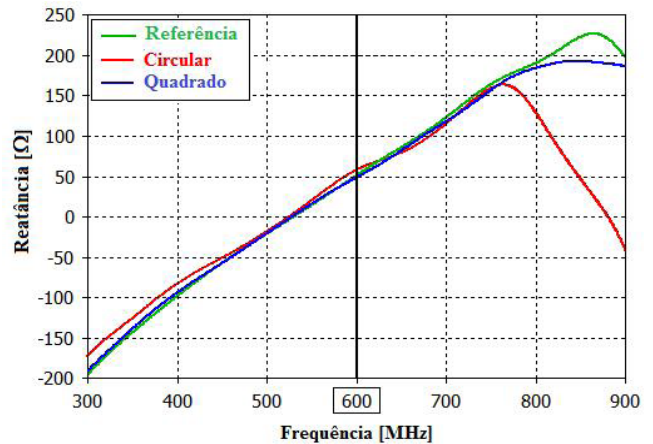
**Fig. 9** – Comparação do comportamento de radiação simulado (corte vertical do diagrama de ganho, em dB) de uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra quadrado e circular.

## 4.2 Impedância de entrada

De acordo com as simulações, foi observado que alterações no formato do plano-terra geram diferenças praticamente nulas na resistência e na reatância até a frequência natural de ressonância da antena. A partir dessa frequência, maiores variações são observadas, sendo que o plano-terra quadrado apresenta resultados mais próximos ao da situação de referência e a diferença entre os valores de impedância para os diferentes tipos de plano-terra é maior para a resistência de entrada, vide **figuras 10 e 11**. Além disso, a diferença entre os valores simulados e os valores de referência da reatância de entrada diminuem à medida que o tamanho do plano-terra aumenta, sendo mais significativa para o plano-terra quadrado, que diminui de 32,6% para 10,4% do valor de referência, enquanto para o plano-terra circular diminui de 96,7% para 92,4%. Contudo, para a resistência de entrada há um aumento dessa diferença em ambos os formatos, de 0,8% para 4,2% do valor da referência para o plano-terra quadrado, e de 7,4% para 19% para o plano-terra circular.



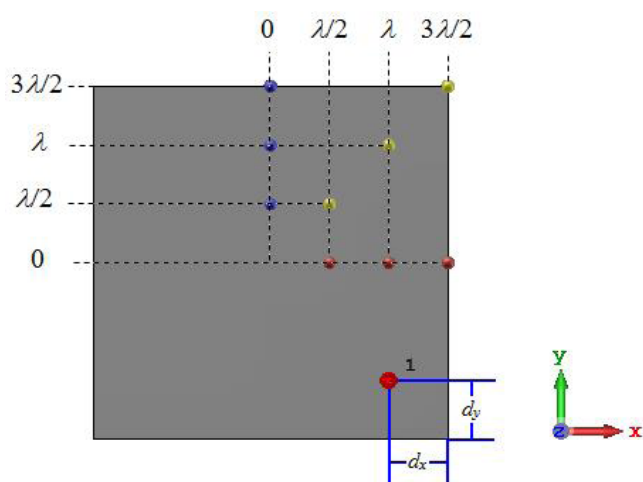
**Fig. 10** – Resistência de entrada para uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra de diferentes formatos e tamanhos fixos  $l = 3\lambda$  e  $D = 3\lambda$ .



**Fig. 11** – Reatância de entrada para uma antena monopolo de  $\lambda/4$ , no centro de um plano-terra de diferentes formatos e tamanhos fixos  $l = 3\lambda$  e  $D = 3\lambda$ .

## 5. Influência da proximidade da borda do plano-terra

Em [16, 19] são apresentados casos de estudo específicos que investigam os efeitos das reflexões e difrações causadas pela proximidade da borda do plano-terra de um monopolo polarizado verticalmente quanto ao comportamento de radiação. A fim de complementar esses estudos, foram realizadas simulações em uma antena monopolo de  $\lambda/4$  fixada fora do centro do plano-terra quadrado e finito de lado  $l = 3\lambda$ , em distâncias intermediárias, igualmente espaçadas, ao longo dos eixos  $x$  e  $y$  até a borda, em  $\phi = 0, 45$  e  $90^\circ$ , conforme indicado na **figura 12**. Para auxiliar a análise do efeito da proximidade da borda do plano-terra são observadas as distâncias da antena para a borda do plano, no eixo  $x$  representada por  $d_x$  e no eixo  $y$  por  $d_y$ , conforme exemplificado na **figura 12**. Ainda na **figura 12**, destacam-se pontos: em vermelho, onde  $d_x$  varia e  $d_y$  é constante ( $\phi = 0^\circ$ ); em amarelo, onde  $d_x$  e  $d_y$  variam e são iguais ( $\phi = 45^\circ$ ); e em azul, onde  $d_x$  é constante e  $d_y$  varia ( $\phi = 90^\circ$ ). A referência para análise é a antena fixada no ponto central do plano-terra (0,0).



**Fig. 12** – Pontos em que foram feitas as simulações da análise de posicionamento assimétrico de monopolo de  $\lambda/4$  no plano quadrado, marcados em azul, amarelo e vermelho, e distâncias  $d_x$  e  $d_y$  para a borda do plano-terra.

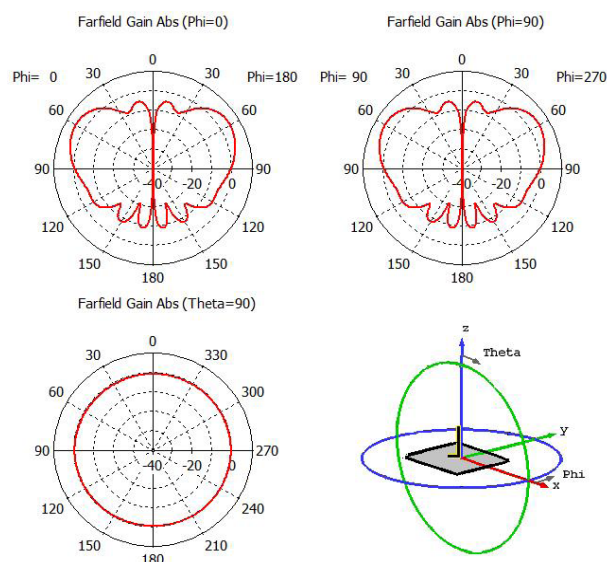
## 5.1 Comportamento de radiação

Como visto na **figura 13**, o caso de referência apresenta simetrias marcantes em função da posição central do monopolo, como se observa nos planos de corte verticais  $xz$  ( $\phi = 0^\circ$ ) e  $yz$  ( $\phi = 90^\circ$ ) dos diagramas de ganho. Espera-se perda dessa simetria entre os planos  $xz$  e  $yz$  à medida que a antena se aproxima da borda.

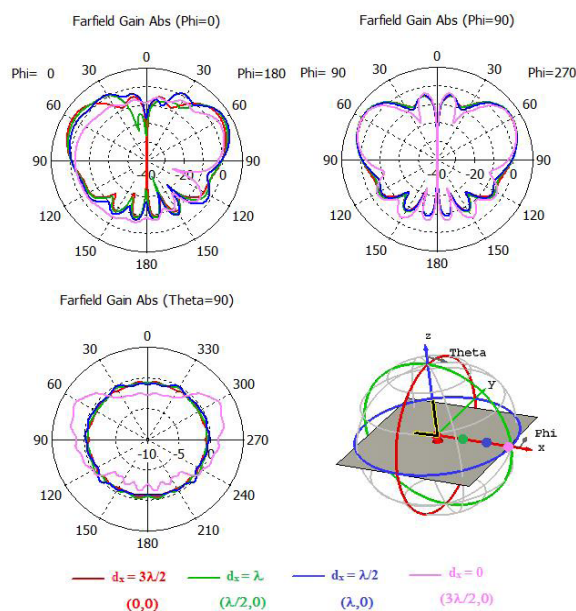
Primeiramente foi analisado o comportamento das principais figuras de mérito, posicionando a antena ao longo do eixo  $x$  nos pontos  $(\lambda/2, 0)$ ,  $(\lambda, 0)$  e  $(3\lambda/2, 0)$ , marcados em vermelho na **figura 12**, para os quais a distância da antena até a borda do plano  $d_x$  é igual, respectivamente, a  $\lambda$ ,  $\lambda/2$  e  $0$  e  $d_y$  é constante e igual a  $3\lambda/2$ . Deste modo, espera-se que o diagrama de ganho em  $\phi = 0^\circ$ , direção onde a antena foi posicionada, apresente alterações mais significativas em relação aos demais planos.

Conforme a **figura 14**, observa-se que não há mais simetria entre os planos  $\phi = 0$  e  $90^\circ$  e em relação ao eixo  $z$ , como esperado. Observa-se que, ao posicionar a antena ao longo do eixo  $x$  positivo, o lóbulo principal se direciona para o lado em que há maior porção do plano-terra, ou seja, ao diminuir  $d_x$  ao longo de  $\phi = 0^\circ$ , o diagrama de ganho apresenta máxima radiação na direção  $\phi = 180^\circ$ . Ainda, a diferença entre os lóbulos em  $\phi = 180^\circ$  e em  $\phi = 0^\circ$  aumenta à medida que a antena se aproxima da borda, chegando até 6,75 dB. Por fim,

ressalta-se que, na borda do plano-terra no plano  $\phi = 0^\circ$ , o ganho máximo se reduz significativamente em comparação ao ganho nas outras posições, alcançando 3,44 dB de diferença em relação à antena no ponto de maior ganho,  $(\lambda, 0)$ .



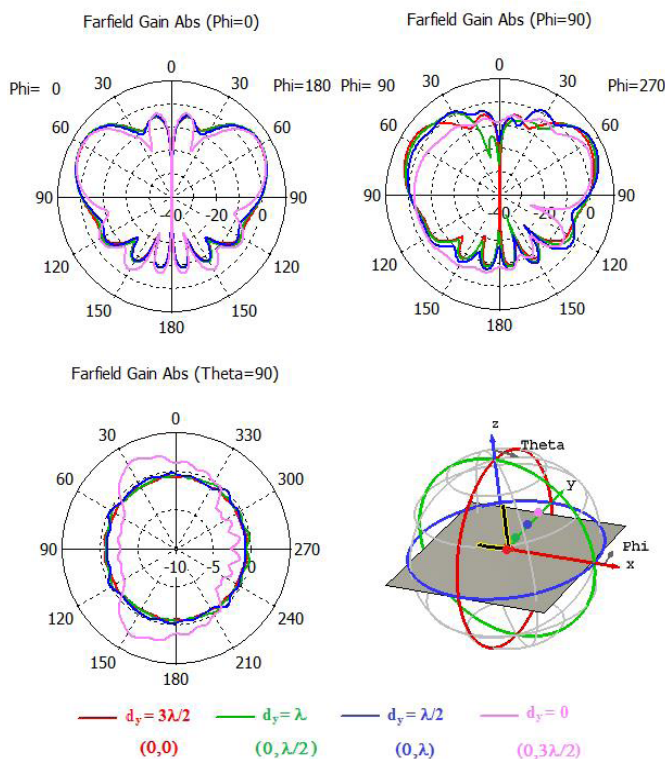
**Fig. 13** – Diagramas de ganho, em dB, de um monopolo de  $\lambda/4$  no centro do plano-terra quadrado de lado  $l = 3\lambda$ , nos planos  $\phi = 0$  e  $90^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ .



**Fig. 14** – Diagramas de ganho, em dB, nos planos  $\phi = 0$  e  $90^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , para uma antena monopolo de  $\lambda/4$  fora do centro do plano-terra quadrado, em diversas posições ao longo do eixo  $x$ .

No plano  $\phi = 90^\circ$ , o comportamento de radiação sofre poucas alterações no formato e mantém a simetria em relação ao eixo  $z$ , sendo visível apenas pequena diferença nos ganhos. Nas posições intermediárias, a variação do ganho em relação à referência é, em geral, menor que 1 dB e em pequena faixa chega até 6 dB. Quando a antena é fixada na borda do plano, ocorre a maior variação em relação à referência, sendo de 10 dB entre  $\theta = 0$  e  $30^\circ$  e de 6,2 dB entre  $\theta = 90$  e  $180^\circ$ .

Por sua vez, no plano  $\theta = 90^\circ$ , para posições intermediárias, os diagramas de ganho apresentam poucas variações ao aproximar a antena da borda, e cada um deles varia menos de 1 dB para todo  $\phi$ , sendo considerados praticamente circulares. Entretanto, quando a antena está posicionada na borda do plano-terra, o diagrama de ganho tem mudança em seu formato, fugindo do aspecto circular, com variações de até 3 dB, e máxima radiação em  $\phi = 63$  e  $296^\circ$ .



**Fig. 15** – Diagramas de ganho, em dB, nos planos  $\phi = 0$  e  $90^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , para uma antena monopolo de  $\lambda/4$  fora do centro do plano-terra, em diversas posições ao longo do eixo  $y$ .

De forma análoga à situação em que as variações do posicionamento da antena se deram apenas no eixo  $x$ , foram simuladas também as situações correspondentes às regiões azul ( $d_x = 0$ ) e amarela ( $d_x = d_y$ ) da **figura 12**. Os resultados são reproduzidos nas **figuras 15 e 16**, respectivamente, e essencialmente replicam os comportamentos observados no cenário anterior. No plano vertical que contém o eixo em que o monopolo foi deslocado, o lóbulo principal do ganho aponta para o lado que contém maior porção do plano-terra, e no plano horizontal, o diagrama só perde a forma circular quando a antena é posicionada na borda do plano-terra.

## 5.2 Impedância de entrada

Ao analisar a impedância em diversas posições fora do centro do plano-terra é possível observar que, para toda a faixa de frequências analisada, não há alterações significativas na impedância de entrada. Em geral, a variação da reatância e da resistência entre os diferentes posicionamentos intermediários em relação à referência é menor que  $2 \Omega$ . Já para a antena posicionada na borda do plano-terra, há uma variação maior dos valores de impedância em relação à referência, de aproximadamente,  $20 \Omega$ . Ainda, verificou-se que a resistência apresenta maior variação que a reatância em relação à referência, quando a antena é posicionada na borda, vide **figuras 17 e 18**. Por fim, os resultados obtidos ao se alterar o posicionamento da antena ao longo do eixo  $x$  são iguais aos resultados obtidos quando o posicionamento é variado ao longo do eixo  $y$ .



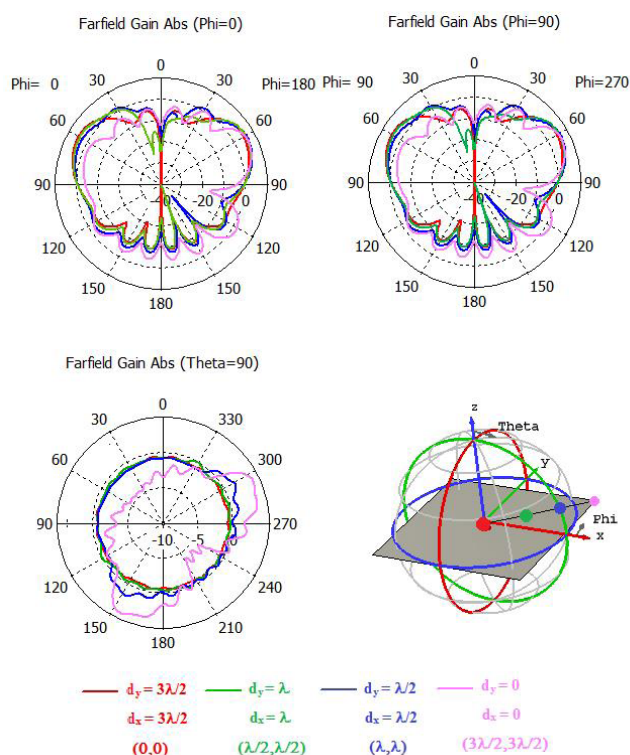


Fig. 16 – Diagramas de ganho, em dB, nos planos  $\phi = 0^\circ$  e  $90^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , para uma antena monopolo de  $\lambda/4$  fora do centro do plano-terra, em diversas posições ao longo dos eixos  $x$  e  $y$ .

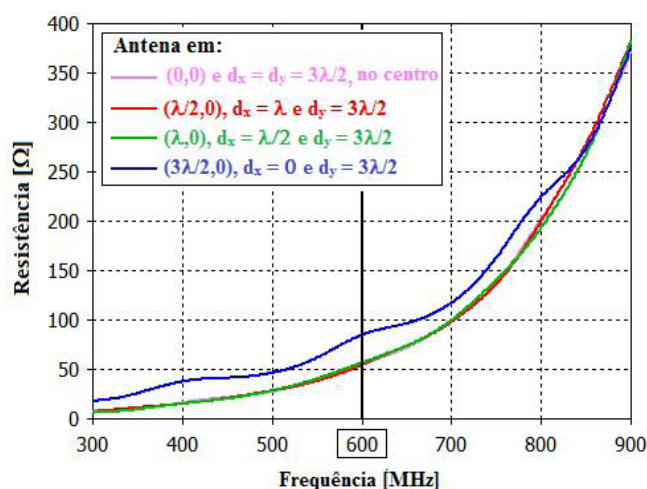


Fig. 17 – Resistência de uma antena monopolo de  $\lambda/4$  sobre um plano-terra quadrado, posicionada ao longo do eixo  $x$ .

## 6. Conclusão

Este trabalho abordou a situação do uso de antenas

monopolo de  $\lambda/4$  sobre plano-terra condutor finito, e em posições assimétricas, muito comum em sistemas de radiocomunicações embarcados em viaturas ou navios. O objetivo foi avaliar os efeitos dessas características práticas nos parâmetros de desempenho da antena, tomando por referência a antena teórica monopolo sobre plano PEC infinito. Foco foi dado à impedância de entrada e ao diagrama de ganho.

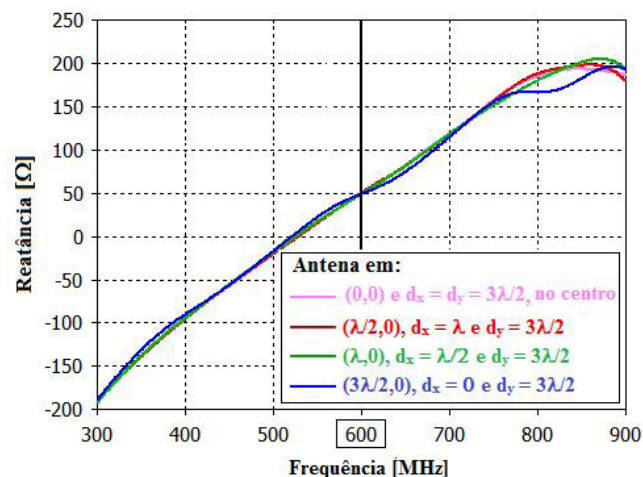


Fig. 18 – Reatância de uma antena monopolo de  $\lambda/4$  sobre um plano-terra quadrado, posicionada ao longo do eixo  $x$ .

A análise se baseou em simulações numéricas (usando CST Studio) de uma antena monopolo fina sobre plano-terra PEC finito e em posições diversas além da central. O caso teórico da antena sobre plano-terra infinito serviu como referência para comparar os valores de impedância de entrada (em uma faixa de frequências ao redor da ressonância natural) e os diagramas de ganho (na frequência de ressonância).

Para o caso do monopolo centralizado, inicialmente foram verificados os efeitos do tamanho e da forma do plano-terra nos parâmetros de desempenho da antena. Quanto ao comportamento de radiação, os resultados foram coerentes com os disponíveis na literatura, que apontam alterações principalmente na direção de máximo ganho, bem como ao longo do eixo que contém o monopolo, tanto para planos quadrados quanto para circulares. Quanto maior o plano-terra, mais os resultados se aproximam daqueles do caso de referência. Além disso, foi observado que conforme o tamanho do plano-terra aumenta o ganho máximo também aumenta.



Valores de largura ou diâmetro do plano-terra entre 3 e 20 comprimentos de onda foram considerados na análise. A forma do plano-terra pouco influenciou o comportamento geral. A impedância de entrada, por sua vez, é relativamente robusta, com alterações pouco significativas para frequências até a de ressonância. Mesmo após essa frequência, as variações observadas foram relativamente pequenas, ainda assim. Verificou-se, ainda, que para as simulações com formato do plano-terra circular foram obtidos resultados com as maiores variações em relação à referência.

Por sua vez, a análise do posicionamento assimétrico apontou duas tendências importantes de mudança do diagrama de ganho, à medida que o monopolo se afasta do centro e se aproxima de uma das bordas. No plano vertical, o diagrama deixa de ser simétrico e passa a ter uma direção preferencial de apontamento, que é aquela na qual resta a maior porção do plano-terra. Já no plano horizontal, a forma circular apresentada pela antena de referência se perde quando o monopolo está muito próximo da borda ou sobre ela. A análise foi feita para plano-terra com largura de  $3\lambda$ , e os efeitos tendem

a se tornar menos agudos para larguras maiores. A impedância de entrada também se mostrou robusta a esta assimetria, com pouca variação em relação à referência para as frequências abaixo e próximas da ressonância natural.

Destaca-se, por fim, que as alterações de desempenho de antenas monopolo decorrentes do uso de plano-terra não-ideal apresentadas neste artigo foram observadas também em trabalho recente mais amplo, sobre o efeito do posicionamento de antenas monopolo e dipolo em diferentes zonas de uma fragata típica da Marinha do Brasil [22]. Em várias situações mais complexas de acoplamento entre as antenas e partes da estrutura da embarcação lá avaliadas, foi possível observar claramente a presença dos mesmos efeitos do plano-terra finito aqui discutidos.

## Agradecimentos

À Diretoria de Comunicações de Tecnologia da Informação da Marinha (DCTIM) por disponibilizar a ferramenta de simulação numérica utilizada neste trabalho.

## Referências Bibliográficas

- [1] Dias, M. H. C.; Silveira, A. C.; Dantas, M. B. T.; Análise da sintonia de uma antena monopolo HF em viatura táctica de comando e controle. XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, pp. 85-89, 2018.
- [2] Ignatenko, M.; Filipovic, D. S.; Application of Characteristic Mode Analysis to HF Low Profile Vehicular Antennas. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), pp. 850-851, Julho 2014.
- [3] Sanghai, S.; Ignatenko, M.; Filipovic, D. S.; Two arm offset fed inverted-L antenna for vehicular HF communications. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), pp. 1604-1605, Julho 2015.
- [4] Allen, B.; Ignatenko, M.; Filipovic, D. S.; Low Profile Vehicular Antenna for Wideband High Frequency Communications. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), pp. 115-116, 2016.
- [5] Burberry, R. A.; VHF and UHF antennas. Londres: Institution of Electrical Engineers, 1992.
- [6] Alvarez, L. F. S.; Dopazo, F. J. C.; Human Exposure to Electromagnetic Fields on Marine Platforms: Safety Regulations, Simulation and Measurement. IEEE Latin America Transactions, vol. 16, nº 1, pp. 46-51, 2018.
- [7] CISPR-25; Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics for protection of receivers used on board vehicles, International Electrotechnical Commission. Genebra, 2008.
- [8] Marrocco, G.; Mattioni, L.; Naval structural antenna systems for broadband HF communications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 1065-1073, Abril 2006.
- [9] Marrocco, G.; Mattioni, L.; Martorelli, V.; 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, Novembro 2006.
- [10] Mattioni, L.; Lanzo, D. D.; Marrocco, G.; Naval structural antenna systems for broadband HF communications—part III: Experimental evaluation on scaled prototypes. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 1882-1887, Julho 2008.
- [11] Best, S. R.; On the use of scale brass models in HF shipboard communication antenna design. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 44, nº 2, pp. 12-23, 2002.
- [12] Jagannath, T.; Kulkarni, P. P.; Tyagi, V. M.; HF broadband antenna design considerations on warships. Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, pp. 421-428, 1999.
- [13] Chen, Y; Wang, C.; HF Band Shipboard Antenna Design Using Characteristic Modes. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, nº 3, pp. 1004-1013, 2015.
- [14] Balanis, C. A.; Antenna theory analysis and design, 4th ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

- [15] Kraus, J. D.; Marhefka, R. J.; Khan, A. S., *Antennas and Wave Propagation*, 5<sup>a</sup> ed., New York: McGraw-Hill, 2017.
- [16] Baker, D. G.; *Electromagnetic Compatibility: Analysis and Case Studies in Transportation*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [17] Perotoni, M. B.; Vieira, M. S.; Dos Santos, E. T.; Barbin, S. E.; *Wideband Planar Monopole Antennas for the Brazilian Digital TV System*. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, pp. 102-106, 2015.
- [18] Weiner, M. M.; *Monopole Antennas*. Bedford, Massachusetts, 2003.
- [19] Živković, Z.; Senić, D.; Bodendorf, C.; Skrzypczyński, J.; Šarolić, A.; *Radiation pattern and impedance of a quarter wavelength monopole antenna above a finite ground plane*. *SoftCOM, International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, pp. 1-5, 2012.
- [20] Dassault Systèmes, *CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software*. Disponível em: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>. Acesso em: 10/11/2019.
- [21] Huynh, M. C.; Stutzman, W.; *Ground plane effects on planar inverted-F antenna (PIFA) performance*. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 150, nº 4, pp. 209-213, 2003.
- [22] Assumpção, F. C. S.; *Análise Eletromagnética do Posicionamento de Antenas de Radiocomunicações em Navios de Marinha*; Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Brasil, 2020.