

ARTIGO CIENTÍFICO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO



CIÊNCIA E
TECNOLOGIA

INFLUÊNCIA DA ALTURA ACIMA DO SOLO NOS LÓBULOS DE IR-RADIAÇÃO E IMPEDÂNCIA EM UMA ANTENA PARA NVIS

ANTONIO ANDERSON SILVA MARQUES

Pós-Graduado em Gestão de Sistemas Táticos de Comando e Controle
Mestrando em Engenharia Elétrica

RESUMO: ANTENAS PRÓXIMAS AO SOLO PODEM SER MUITO INFLUENCIADAS POR REFLEXÃO OU ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO, ESPECIALMENTE PARA NVIS (*NEAR VERTICAL INCIDENT SKYWAVE*) E QUANDO A ALTURA DA ANTENA É MENOR QUE 1 COMPRIMENTO DE ONDA. PARA ESTE TIPO DE ANTENA, O SOLO SERÁ PARTE COMPONENTE DO SISTEMA, INFLUENCIADO NOS LÓBULOS DE RADIAÇÃO E EM SUA IMPEDÂNCIA. EM ESPECIAL PARA O TERRITÓRIO BRASILEIRO, A CONDUTIVIDADE DO SOLO EM REGIÕES DE SELVA É MUITO BAIXA, O QUE AUMENTA A NECESSIDADE DESTE TIPO DE PROPAGAÇÃO, EM DETRIMENTO DE ONDAS DE SUPERFÍCIE OU ONDAS DIRETAS. OS RESULTADOS APONTARAM QUE A ALTURA IDEAL É $0,2\lambda$ (5 METROS), QUE APRESENTOU-SE COMO A ALTURA ÓTIMA PARA O DIAGRAMA DE RADIAÇÃO. A PARTIR DESTE VALOR, DEVIDO À REFLEXÃO NO SOLO, OS LÓBULOS IRÃO SE ACHATAR CADA VEZ MAIS OU FORMAR LÓBULOS LATERAIS, O QUE SERIA NÃO DESEJÁVEL PARA ESTE TIPO DE PROPAGAÇÃO. ABAIXO DESTE VALOR, HÁ UM DESCASAMENTO MUITO ACENTUADO DE IMPEDÂNCIA COM A LINHA DE TRANSMISSÃO, AUMENTANDO A REATÂNCIA E A PERDA DE RADIAÇÃO PARA O SOLO.

PALAVRAS-CHAVE: ANTENAS HF. ENLACES. NVIS. ONDAS IONOSFÉRICAS.

INTRODUÇÃO

NVIS (*Near Vertical Incident Skywave*) é uma técnica de transmissão em HF (*High Frequency*) que permite alcançar estações receptoras situadas em locais onde a visada direta não é mais possível, devido ao limitado alcance das ondas de superfície.

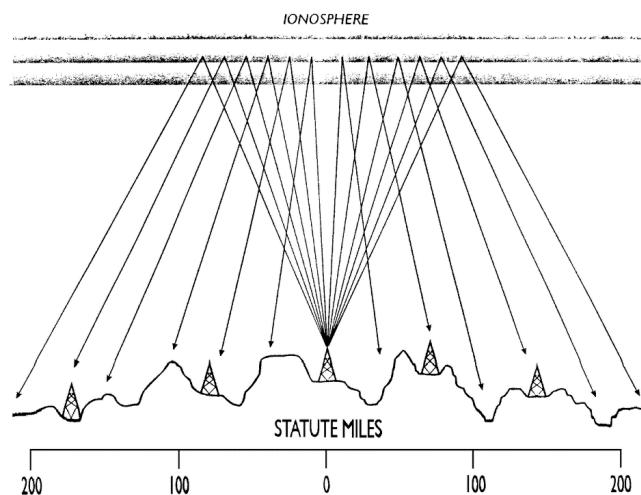
Em especial para o território brasileiro, a condutividade do solo em regiões de selva é muito baixa. Assis, Filho (2010) em testes de transmissões HF na Amazônia observaram que a condutibilidade do solo (σ_f) é da ordem de 0,2 mSiemens/m e a permissividade (ϵ_f) 1,2, o que representa o menor decil na classificação mundial de condutibilidades de acordo com estudo realizado em escala global (*International Telecommunication Union - ITU*, 1992).

Wallace (1992) cita diversos exemplos bem sucedidos para o uso de NVIS em campo aberto. Sendo relevante a escolha correta da frequência, o tipo de antena que será utilizado e de seu ângulo de partida.

Wivlet et al. (2015) apontam que as propagações ionosféricas em NVIS podem funcionar com eficácia para um raio de até 150 km a partir da fonte emissora. Uma faixa favo-

rável do espectro eletromagnético seria de 3 a 9 MHz, pois esta faixa de frequência é geralmente menor que a frequência crítica da ionosfera. A frequência crítica pode ser observada através de ionogramas, transmissões abaixo deste valor sofrem o fenômeno de refração na ionosfera até sua total reflexão ao solo.

FIGURA 1 Propagação em NVIS.



Fonte: NVIS-TUGA, 2010.

A forma de cobertura do NVIS assemelha-se a um guarda-chuva nas proximidades da antena transmissora, conforme pode ser observado na figura 1. Este tipo de trans-



missão exige ângulos de partida elevados, que possam alcançar a ionosfera e serem refletidos de volta para o solo.

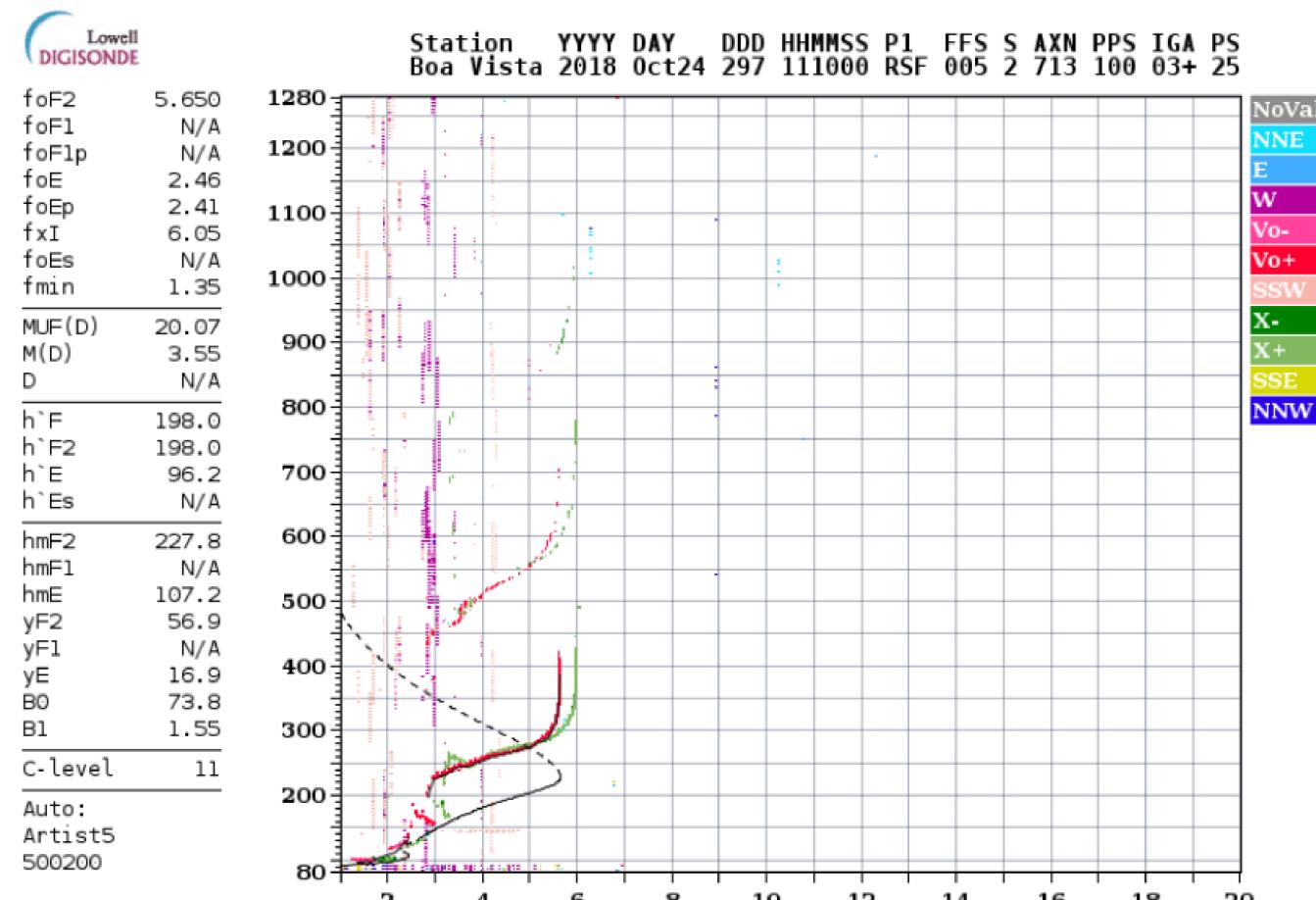
Porém há limitações para este tipo de transmissão que podem ocasionar zonas de silêncio nas proximidades da antena transmissora. Estas limitações estão relacionadas não somente com o ângulo de partida mas também com a frequência que se deseja transmitir em um região específica.

1 METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os temas: características da atmosfera, no tocante ao plasma ionosférico; propagações por ondas diretas e ionosféricas e análise das características dos equipamentos disponíveis para tropas brasileiras, como ângulo de partida, sensibilidade para recepção e diretividade das antenas.

Foram utilizados artigos, dissertações,

FIGURA 2 Ionograma



Fonte: GIRO, 2018.

teses e livros disponíveis na literatura especializada. Assim como as recomendações da União Internacional de Telecomunicações (UIT).

Posteriormente, foram realizados os cálculos de propagação eletromagnética, visando verificar a influência da altura acima do solo nos lóbulos de irradiação e impedância em uma antena para NVIS.

2 IONOSSONDA

Sendo afetadas por diversos fatores naturais, o estudo de propagações ionosféricas é facilitado com o uso das ionossondas. Estes dispositivos estão localizados em diversas cidades ao redor do mundo, medindo a “altura” da ionosfera e sua densidade de elétrons por camada.

Wivlet et al. (2015) afirmam que através das ionossonda é possível determinar a frequência crítica, ou a frequência de plasma,

de uma camada, que seria a frequência mais alta de irradiação que retorna para a ionosonda em uma propagação vertical na direção do zênite (ângulo de incidência zero sobre a Normal da Terra). A figura 2 apresenta as informações principais que devem ser lidas em um ionograma.

“Fo” representa a frequência crítica de operação para determinada camada da ionosfera, sendo o parâmetro mais relevante “foF2”, pois este aponta o valor de frequência para a camada mais densa, a camada F2. “MUF” representa a Máxima Frequência Utilizável, porém este parâmetro está condicionado ao ângulo de irradiação da antena.

2.1 MUF

Martyn (1935) demonstrou que: $MUF = f_c \cdot \sec\theta$, sendo f_c a frequência crítica e θ o ângulo de incidência na ionosfera. Esta relação, derivada da lei de Snell, mostra que à medida que o ângulo de incidência é ampliado, a MUF aceitará valores maiores de frequência, pois seu valor é inversamente proporcional ao cosseno ($1/\sec\theta$) do ângulo.

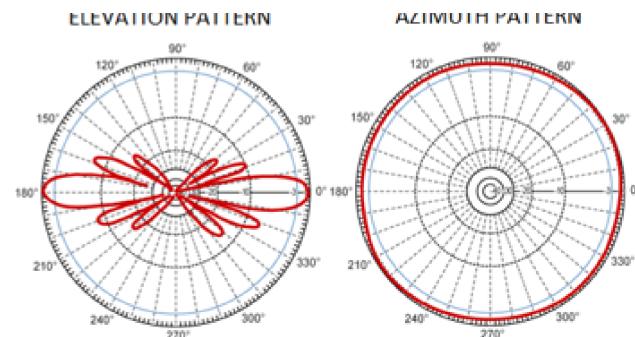
As antenas utilizadas em viaturas por exemplo, do tipo vertical, não terão ângulo de partida suficiente para refração na atmosfera em NVIS. Observando o lóbulo de radiação de antenas verticais, conforme figura 5, é possível verificar que sua maior propagação de radiação será em ângulos de incidência altos (ângulos de partida baixos). Propagações acima de 30°, pelo tamanho reduzido dos lóbulos, terão baixa probabilidade de alcançar uma estação receptora.

A tabela 1 apresenta os diversos ângulos de incidência para a frequência crítica de 5,65 MHz, utilizando como referência a altura virtual da ionosfera de 198 km, conforme obtido no ionograma da figura 2.

Utilizando a relação trigonométrica da secante, os resultados da tabela 1 foram obtidos através de:

$$MUF [\text{MHz}] = f_c \sqrt{(1 + D/H)}$$
 (1)

FIGURA 3 Diagrama de irradiação de antena veicular.



Fonte: Harris, 2017.

Onde D = distância do enlace; H = altura virtual da camada mais densa da ionosfera.

Os dados da tabela 1 indicam, por exemplo, que transmitir em uma frequência acima de 5,89 MHz para cobrir uma distância menor que 25 Km em NVIS levará a perda do sinal (situação a), pois o mesmo não refletirá nas camadas da ionosfera. De forma análoga, uma propagação de 6,03 MHz para uma estação receptora a 100 km deverá ter seu ângulo de incidência limitado a 12,8° (situação b), ou seu ângulo de partida deverá ser no máximo 77,2° ($90^\circ - 12,8^\circ = 77,2^\circ$), caso esta frequência assuma ângulos de partidas maiores, a onda ultrapassará a atmosfera e não retornará para a Terra.

TABELA 1 Ângulos de incidência na ionosfera

| θ (graus) | f_c (Hz) | MUF (Hz) | D (km) |
|------------------|------------|----------|----------|
| 0,3 | 5,65 | 5,88 | 2 |
| 0,7 | 5,65 | 5,88 | 5 |
| 1,0 | 5,65 | 5,88 | 8 |
| 1,8 | 5,65 | 5,88 | 14 |
| 3,3 | 5,65 | 5,89 | 25 |
| 6,5 | 5,65 | 5,92 | 50 |
| 9,7 | 5,65 | 5,96 | 75 |
| 12,8 | 5,65 | 6,03 | 100 |
| 15,9 | 5,65 | 6,11 | 125 |
| 21,7 | 5,65 | 6,33 | 175 |
| 32,0 | 5,65 | 6,46 | 200 |
| 34,3 | 5,65 | 6,60 | 225 |
| 32,0 | 5,65 | 6,93 | 275 |

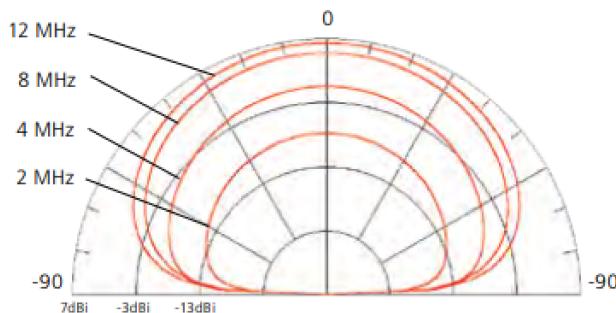


| θ (graus) | fc (Hz) | MUF (Hz) | D (km) |
|------------------|---------|----------|--------|
| 34,3 | 5,65 | 7,12 | 300 |
| 36,5 | 5,65 | 7,31 | 325 |
| 40,4 | 5,65 | 9,04 | 375 |
| 42,3 | 5,65 | 10,65 | 400 |
| 69,9 | 5,65 | 17,08 | 1200 |

Fonte: o autor, 2019.

Aplicando a equação 1 para um enlace de 1200 km obtemos como resultado uma MUF de 17,08 MHz e ângulo de incidência de 69,9°, ou ângulo de partida de 20,1°. Porém observando o diagrama de irradiação de uma antena tática típica para NVIS, a RF-1936 (dipolo cruzada), da empresa Harris, na figura 4, é possível observar que este ângulo possui baixa energia irradiada, o que levará a falha no enlace.

FIGURA 4 Diagrama de irradiação da antena RF-1936 (dipolo cruzada).



Fonte: Harris 2017

1.2 ANTENA RF-1936

Esta antena faz parte de um conjunto de equipamentos táticos voltados para NVIS. A antena RF-1936 possui um mastro e quatro elementos de radiação com alimentação central. É de rápida instalação e possui baixo peso para transporte individual.

Deve ser instalada nos rádios táticos RF-5800H, que operam entre 2 a 30 MHz com uma potência máxima de transmissão de 400 W. Seu diagrama de radiação horizontal é omnidirecional e o diagrama vertical será detalhado nas seções a seguir.

Utilizando o software 4Nec2 é possível visualizar com maior qualidade o diagrama de radiação da RF-1936, conforme a figura 5. Este diagrama representa a radiação de uma antena RF-1936 a 12 MHz, onde cada elemento da antena possui 0.25λ (6.25 metros).

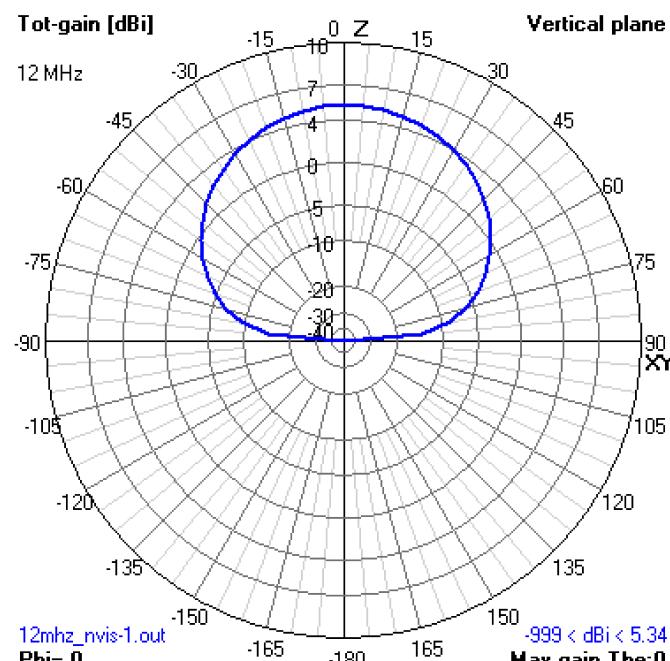
A figura 6 apresenta o perfil geométrico da antena, com seus 4 elementos. A figura 7 é uma foto da antena real.

2 PARÂMETROS

2.1 ALTURA EM RELAÇÃO AO SOLO

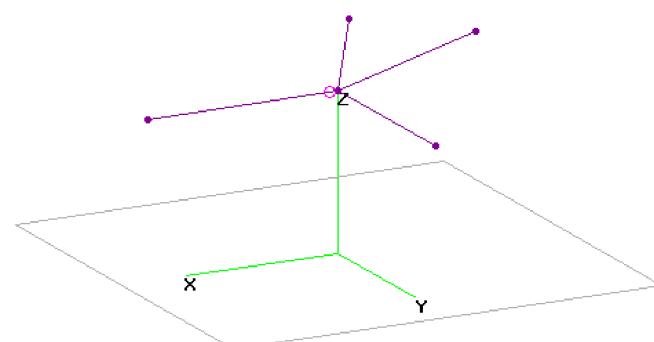
Johnson (1992) cita que antenas próximas ao solo podem ser muito influenciadas por reflexão ou absorção da radiação, especialmente para HF e quando a altura da antena é menor que 1 comprimento de onda. Para este tipo de antena, o solo será parte componente do sistema, influenciado nos lóbulos de radiação e em sua impedância.

FIGURA 5 Diagrama de irradiação da antena RF-1936 no software 4nec2 para 12 MHz.



Fonte: o autor, 2019

FIGURA 6 Perfil geométrico da antena RF-1936



Fonte: o autor, 2019

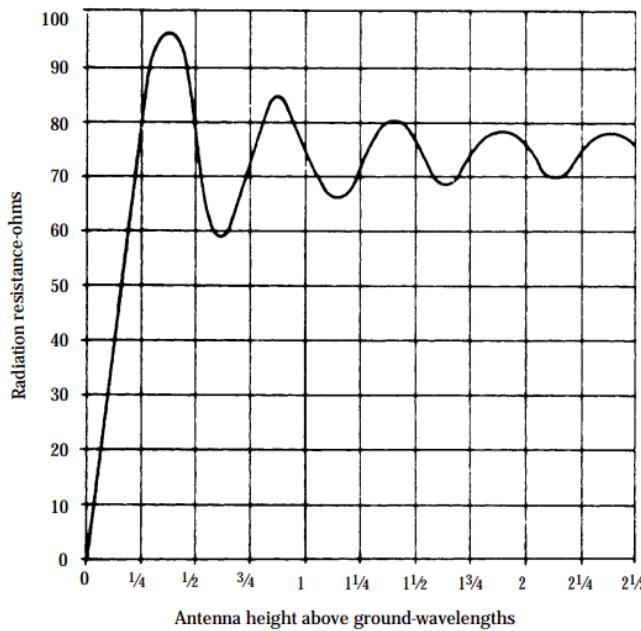
FIGURA 7 Antena RF-1936



Fonte: Harris (2017)

A impedância típica de uma antena dipolo é 73 ohms (Laster, 2001). No caso da antena RF-1936, este valor é 50 ohms (HARRIS, 2005) e poderá ser modificado de acordo com a altura em relação ao solo, variando desde 95 ohms até valores próximos de zero, conforme figura 8.

FIGURA 8 Impedância de antena dipolo de acordo com a altura em relação ao solo.



Fonte: Laster, 2001.

As simulações de altura em relação ao solo foram realizadas no software 4nec2, utilizando o modelo de solo Sommerfeld-Norton ($\epsilon_f = 13$, $\sigma_f = 5 \text{ mS/m}$), que representa uma simulação realista de perdas e reflexão (Burke,

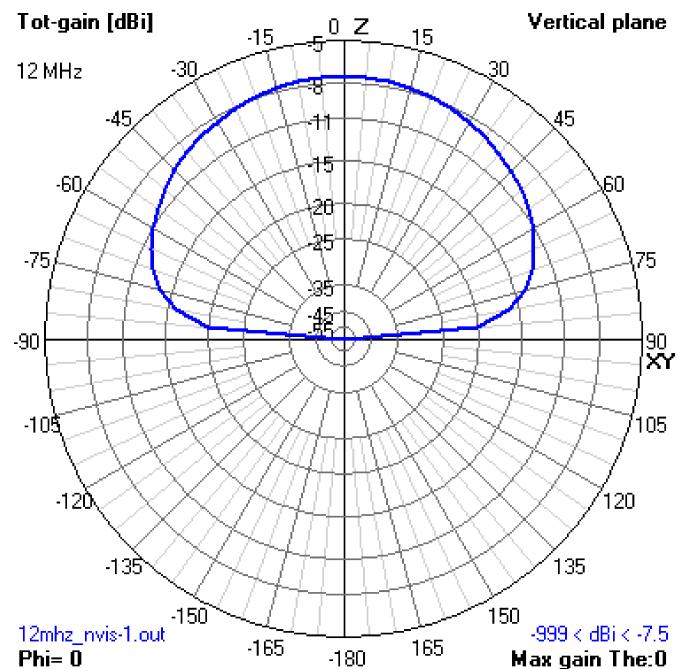
1981). O raio dos fios foi considerado 10 mm. A figura 9 apresenta o diagrama para a altura de $0,02\lambda$, que apresenta alta diretividade, porém com baixo ganho (menos de -7 dBi).

A figura 10 apresenta o diagrama de radiação para $0,06\lambda$, onde já é possível observar que uma distância maior do solo implica em um ganho maior.

A figura 11 apresenta 4 comprimentos de onda, $0,02\lambda$, $0,06\lambda$ (já citados), $0,2\lambda$ e $0,4\lambda$. À altura de $0,4\lambda$ do solo a antena perde diretividade, formando dois lóbulos laterais acentuados, reduzindo esta altura, a $0,2\lambda$ (em azul no gráfico), o diagrama volta a ser mais eficiente para NVIS.

$0,2\lambda$ (5 metros) apresentou-se como a altura ótima para o diagrama, a partir deste valor, os lóbulos irão se achatar cada vez mais ou formar lóbulos laterais, o que seria um desperdício para o NVIS, conforme figura 12.

FIGURA 9 Antena RF-1936 a $0,02\lambda$ do solo.



Fonte: o autor, 2019.

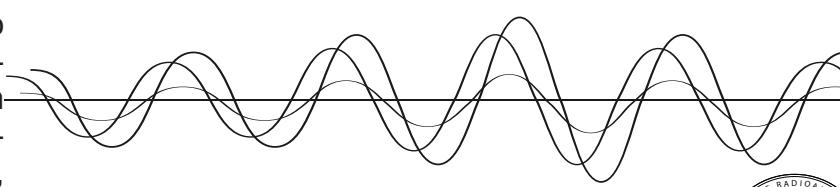
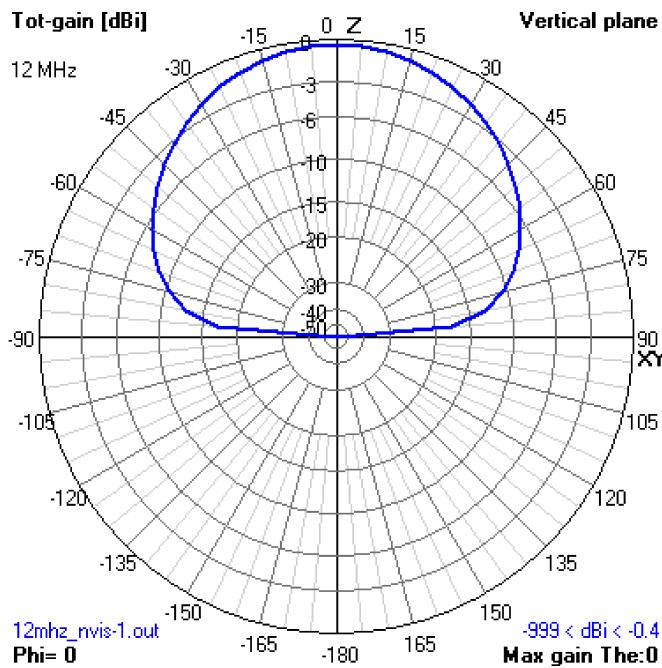
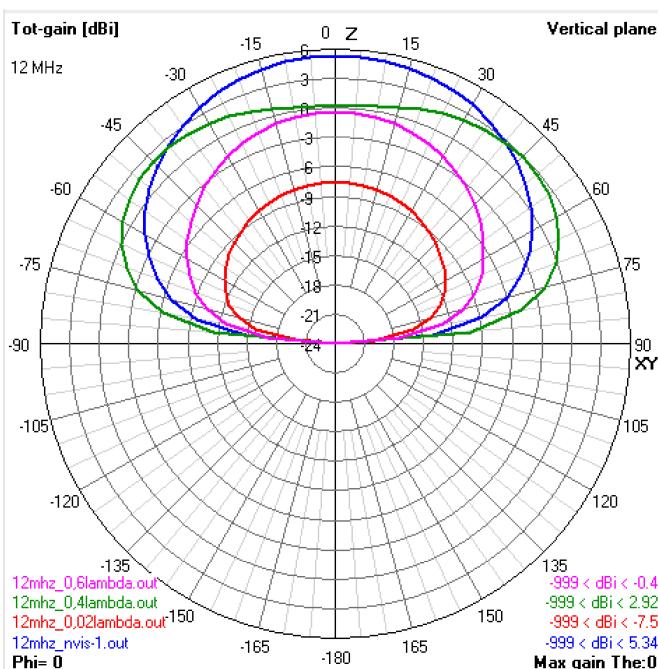


FIGURA 10 Antena RF-1936 a $0,06\lambda$ do solo.



Fonte: o autor, 2019.

FIGURA 11 Antena RF-1936 a $0,02\lambda$ (vermelho), $0,06\lambda$ (rosa), $0,2\lambda$ (azul) e $0,4\lambda$ (verde) do solo.



Fonte: o autor, 2019.

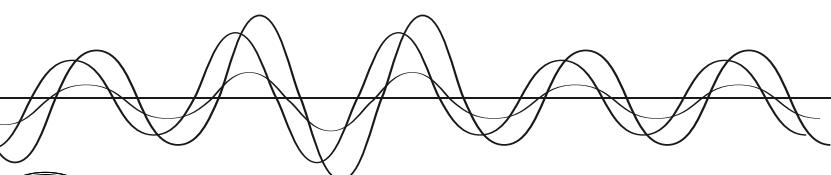
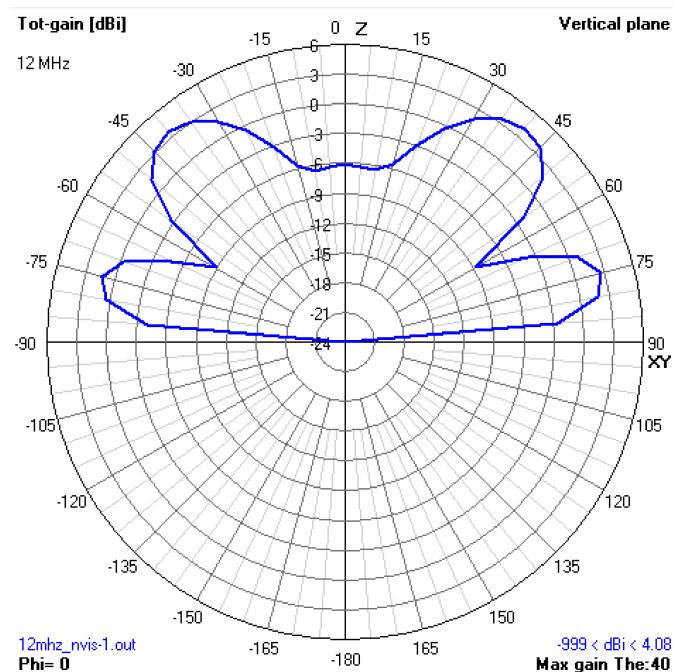


FIGURA 12 Antena RF-1936 a 1λ do solo.



Fonte: o autor, 2019.

2.1 ANÁLISE DE RADIAÇÃO

2.1.1 Eficiência da Radiação

A Relação de Ondas Estacionárias (em inglês VSWR) obteve como resultado 1,98:1, figura 13. Utilizando a equação 2.2 é possível obter o coeficiente de reflexão:

$$\text{VSWR: } 1+|\Gamma|/1- |\Gamma|; \quad (2.1)$$

$$|\Gamma| = \text{VSWR-1} / \text{VSWR+1}; \quad (2.2)$$

$$\text{Potência refletida (\%)} = 100 * |\Gamma|^2 \quad (2.3)$$

$$\text{Potência refletida (dB)} = 10 \log(|\Gamma|^2). \quad (2.4)$$

Para 1,98:1, o coeficiente de reflexão é 0,33, o percentual de potência refletida é 10,8% ou -9,66 dB, o que se encontra em um valor aceitável para o sistema.

FIGURA 13 VSWR da antena RF-1936.

| Filename | 12mhz_nvis-1.out | Frequency | 12 | Mhz |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-----|
| | | Wavelength | 24.98 | m |
| Voltage | 73.6 + j0 V | Current | 1.36 - j0.98 A | |
| Impedance | 35.7 + j25.7 | Series comp. | 516.2 | pF |
| Parallel form | 54.2 // j75.3 | Parallel comp. | 176.1 | pF |
| S.W.R.50 | 1.98 | Input power | 100 | W |
| Efficiency | 100 | Structure loss | 0 | uW |
| Radial-eff. | 7.33 | Network loss | 0 | uW |
| RDF (dB) | | Radial-power | 100 | W |

Fonte: o autor, 2019.



2.1.2 EIRP

O Cálculo da Potência Efetiva de Saída (em inglês EIRP) foi analisado a partir da potência do equipamento mais o ganho da antena menos as perdas por cabos e conectores. Sendo considerado 1 dB de perda para cada metro do cabo coaxial (para $0,2\lambda$) e 0,25 dB para cada conector.

$$\text{EIRP} = \text{Pt} - \text{Lc} + \text{Ga} \quad (3)$$

O que resultou 48.34 dB.

CONCLUSÃO

Visando a propagação em NVIS, o melhor resultado obtido foi $0,2\lambda$ (5 metros) que apresentou-se como a altura ótima para o diagrama. A partir deste valor, devido à reflexão no solo, os lóbulos irão se achatar cada vez mais ou formar lóbulos laterais, o que seria não desejável para este tipo de propagação.

Para o resultado de $0,2\lambda$, a impedância obtida apresentou o valor complexo de $35,7 + j25,7$, o que aponta a presença de uma reatância indutiva ($X > 0$) e indutância de 0,34 ohms. Porém ao se verificar a VSWR, encontra-se o valor de 1,98:1, o que implica numa potência refletida menor que 12%.

INFLUENCE OF HEIGHT ABOVE THE GROUND ON RADIATION LOBBLES AND IMPEDANCE IN A NVIS ANTENNA

ABSTRACT: ANTENNAS CLOSE TO THE GROUND CAN BE GREATLY INFLUENCED BY REFLECTION OR RADIATION ABSORPTION, ESPECIALLY FOR NVIS (NEAR VERTICAL INCIDENT SKYWAVE) AND WHEN THE ANTENNA HEIGHT IS LESS THAN 1 WAVELENGTH. FOR THIS TYPE OF ANTENNA, THE SOIL WILL BE A COMPONENT PART OF THE SYSTEM, INFLUENCED BY THE RADIATION LOBES AND THEIR IMPEDANCE. PARTICULARLY FOR THE BRAZILIAN TERRITORY, THE SOIL CONDUCTIVITY IN JUNGLE REGIONS IS VERY LOW, WHICH INCREASES THE NEED FOR THIS TYPE OF PROPAGATION, TO THE DETRIMENT OF SURFACE WAVES OR DIRECT WAVES. THE RESULTS INDICATED THAT THE IDEAL HEIGHT IS 0.2λ (5 METERS), WHICH PRESENTED AS THE OPTIMAL HEIGHT FOR THE RADIATION DIAGRAM. FROM THIS VALUE, DUE TO THE REFLECTION IN THE SOIL, THE LOBES WILL FLATTEN OR FORM LATERAL LOBES, WHICH WOULD BE UNDESIRABLE FOR THIS TYPE OF PROPAGATION. BELOW THIS VALUE, THERE IS A VERY MARKED MISMATCH OF IMPEDANCE WITH THE TRANSMISSION LINE, INCREASING THE REACTANCE AND LOSS OF RADIATION TO THE GROUND.

KEYWORDS: HF ANTENNAS IONOSPHERIC WAVES. NVIS. LINKS.

REFERÊNCIAS

Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD). AGARD-AG-326 - Radio Wave Propagation Modeling, Prediction and Assessment. NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION. 1990.

ASSIS, Mauro S., FILHO, Rafael C. Pinto. Measurements of the electrical characteristics of vegetation in a dense jungle. Publicado em Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. 12 a 16 julho 2010.

BURKE, G. J. et al., Computer modeling of antennas near the ground. Electromagnetics, vol. 1, no. 1, pp. 29–49, Jan. 1981.

HARRIS. Harris Falcon II RF-5800H-MP. NEW YORK, 2005.

HARRIS. Harris Falcon III RF-7800V-HH. NEW YORK, 2017.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). World Atlas of Ground Conductivities. Recommendation 832. 1992.

JOHNSON, Richard C. Antenna Engineering Handbook. 3rd ed. McGraw-Hill. NEW YORK, 1993.

LASTER, Clay. The Beginner's Handbook of Amateur Radio. 4th ed. McGraw-Hill. NEW YORK, 2001.

NVIS-TUGA. NVIS Tático. 2010. Acesso em 24/10/2018. Disponível em <http://nvis-tuga.blogspot.com/2010/11/nvis-tactico.html>.

Optimum Antenna Height for Horizontal Dipole Antennas. 2015. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 57, No. 1, February 2015.

WIVLET, B. A. et al. Near Vertical Incidence Skywave Propagation: Elevation Angles and Optimum Antenna Height for Horizontal Dipole Antennas. 2015. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 57, No. 1, February 2015.

O autor é graduado em Ciências Militares pela Academia Militar das Agulhas Negras. Pós-Graduado em Gestão de Sistemas Táticos de Comando e Controle pela Escola de Comunicações. Mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília. Possui cursos na área de Rádios definidos por software, Sistemas Satelitais e Comando e Controle. Foi instrutor na Academia Militar das Agulhas Negras. Atualmente serve na Escola de Comunicações. Pode ser contactado através do e-mail: silvamarques.anderson@eb.mil.br.

