

PROPAGAÇÃO DE FREQUÊNCIA ULTRA-ALTA SOBRE A SUPERFÍCIE DO MAR APLICADA À VIGILÂNCIA ACÚSTICA DA COSTA BRASILEIRA

Ultra-high frequency propagation over sea surface
applied to acoustic surveillance of the Brazilian coast

Stilson Veras Cardoso¹, Leonardo Pestana de Souza², Vitor Luiz Gomes Mota³,
Leni Joaquim de Matos⁴, Vanessa Przybylski Ribeiro Magri⁵

Resumo: Esta pesquisa visa ao estudo e à análise das transmissões de frequência ultra-alta (UHF) que podem ser utilizadas em um projeto de vigilância acústica da costa brasileira pela Marinha do Brasil. Inclui cálculos e simulações das perdas de percurso por meio do modelo da Terra esférica, considerando a propagação sobre a superfície do mar entre boias de vigilância acústica e navios que irão coletar os dados, a ponto de atingir distâncias superiores a 20 milhas náuticas.

Palavras-chave: Vigilância, Acústica, Transmissão, UHF, Boia, Navio.

Abstract: This research aimed to study and analyze UHF transmissions that can be used in an Acoustic Surveillance Project of the Brazilian Coast for the Brazilian Navy. It also includes calculations and simulations of path losses through the spherical Earth model, considering the propagation on the sea surface between acoustic surveillance buoys and ships that will collect the data, reaching distances greater than 20 nautical miles.

Keywords: Surveillance, Acoustics, Transmission, UHF, Buoy, Ship.

1. Servidor Civil Nível Superior. Mestre em Engenharia Oceânica e Tecnologista Pleno do Grupo de Sistemas Acústicos Submarinos, Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: stilson@marinha.mil.br

2. Capitão de Corveta. Mestrando em Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: leonardo.pestana@marinha.mil.br

3. Doutorado em Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: vitorluiz@id.uff.br

4. Doutora em Engenharia Elétrica. Professora do Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: lenijm@id.uff.br

5. Doutora em Engenharia Elétrica. Professora do Departamento de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: vanessamagri@id.uff.br

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma extensa área marítima denominada Amazônia Azul, que é a principal via do comércio exterior do país e rica em recursos naturais e minerais. Nesse vasto espaço oceânico, devem existir garantias de segurança e condições para exercer a autoridade do Estado. Isso requer capacidade de vigilância, com o objetivo de identificar eventuais ameaças e transmitir os dados coletados para centros de processamento e análise tática, permitindo atuar perante situações adversas. Contribuindo para esse fim, é conveniente que a Marinha do Brasil instale um projeto piloto de vigilância acústica da costa brasileira, o qual poderá servir de base na composição de uma rede de sensoriamento acústico submarino.

Um modelo genérico de projeto de vigilância acústica da costa brasileira é mostrado na Figura 1. O sistema é composto de boias equipadas com hidrofones para recepção de sinais acústicos de embarcações de superfície e submersas que estejam navegando em sua região de abrangência. Os dados acústicos brutos são pré-processados, e são mantidos apenas sinais coerentes com ruídos de embarcações. Instalam-se um

Automatic Identification System (AIS) para transmissão da identificação da boia e recepção de dados eventualmente transmitidos por embarcações, um *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para fornecer sua localização, placas solares e bateria para suprir energia, unidade central de processamento (CPU) e memória para processamento e armazenamento das informações transmitidas e recebidas e antena de frequência ultra-alta (UHF) para transmissão e recepção entre as boias e entre estas e navios ou outros meios que recebam as informações.

Para que esse sistema tenha ampla cobertura, ele deve ser modular, permitindo que se adicionem boias onde se deseja ampliar o alcance. A fim de que os navios que irão coletar os dados possam realizar essa tarefa sem a necessidade de se deslocarem demasiadamente, poupando tempo e recursos, o sistema será concebido de forma que as boias tenham cobertura de, pelo menos, 20 milhas náuticas (37,04 km). Dessa forma, elas deverão ser instaladas com espaçamento entre si de distâncias compatíveis com essa cobertura e ter capacidade para se comunicarem nesse mesmo alcance com os navios que irão coletar os dados.

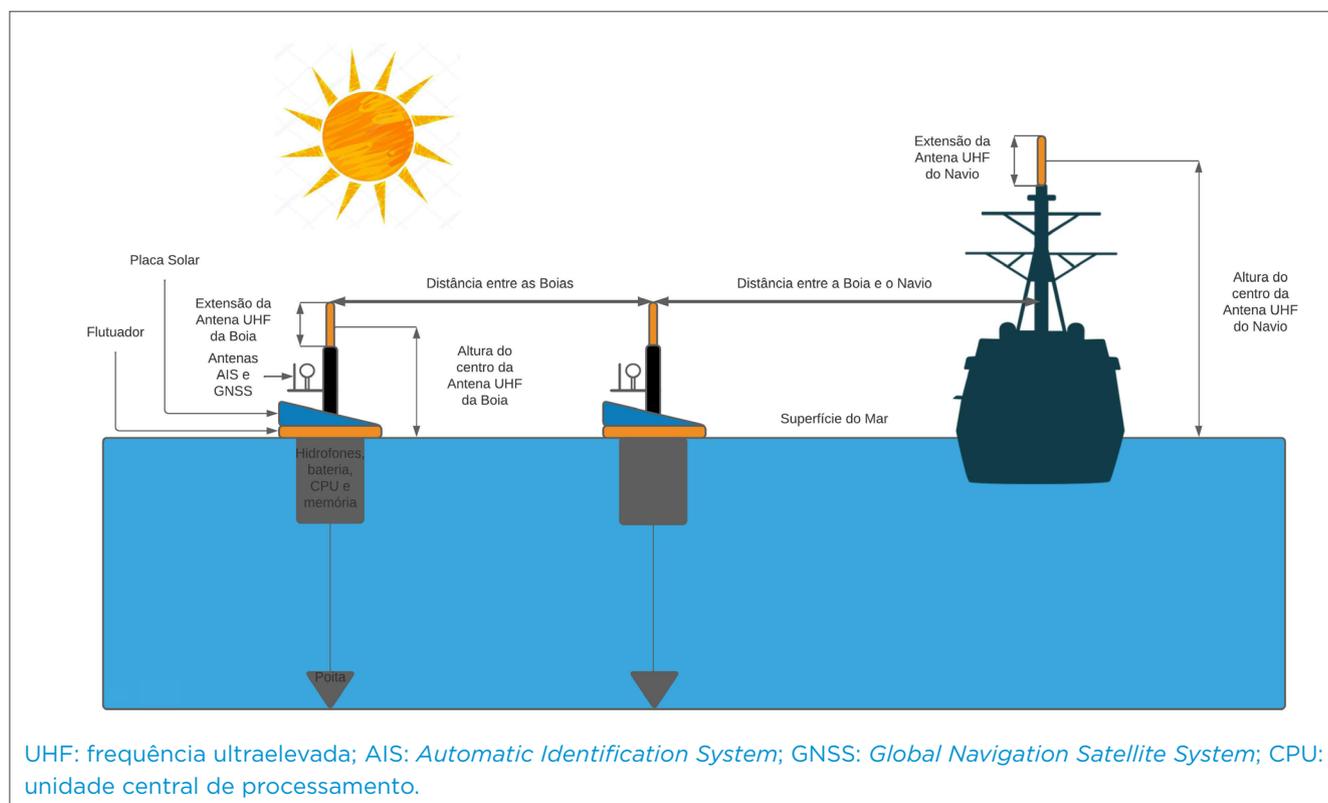


Figura 1. Esquema de projeto de vigilância acústica da costa brasileira.

Com o propósito de viabilizar as transmissões requeridas no projeto, optou-se por utilizar um enlace de radiofrequência, tendo em vista que os serviços de comunicação celular não estão disponíveis em regiões no mar afastadas da costa, e as comunicações por satélite, apesar de proporcionarem alta mobilidade (FREITAS, 2018), apresentam custo elevado e tornam os usuários dependentes da confiabilidade e da garantia de sigilo das empresas que prestam esses serviços. O enlace de radiofrequência, por outro lado, não demanda custo de mensalidade para transmissão e constitui uma rede militar própria para essa finalidade.

Posto isso, a proposta deste artigo é contribuir com uma análise das transmissões UHF, que podem ser utilizadas em um projeto de vigilância acústica da costa brasileira, por meio de simulações das perdas de percurso e empregando o modelo da Terra esférica (DAL BELLO, 2014; ITU-R, 2019), considerando a boia e o navio parados no momento em que se estabelece a comunicação do enlace UHF de vigilância.

Ressalta-se que, caso se opte pela coleta de dados em mobilidade nos navios, deve-se substituir o modelo de Terra esférica, aplicado para esse enlace fixo, por um de predição apropriado para o canal rádio móvel marítimo, aplicável para a faixa de frequências desejada. Cabe observar também que, neste artigo, o cálculo de cobertura de sinal foi efetuado considerando-se o estado de mar calmo, de forma que o balanço das boias é desprezado.

2. OBJETIVOS

A finalidade deste trabalho é avaliar a transmissão UHF que pode ser utilizada em um projeto de vigilância acústica da costa brasileira, calculando-se as perdas de percurso para diferentes frequências, distâncias e alturas das antenas, com a finalidade de viabilizar a cobertura de, pelo menos, 20 milhas náuticas.

3. METODOLOGIA

Para as simulações, foi utilizado o método de cálculo para Terra esférica formulado a seguir, para transmissão UHF sobre a superfície do mar, sendo os resultados apresentados em gráficos obtidos no *software* MATLAB®.

Para distâncias que satisfazem à Equação 1, a propagação deve ser calculada sobre a Terra esférica se:

$$d \geq 15^3 \sqrt{\lambda_m} \quad (1)$$

Em que:

d = a distância, em km, entre as antenas de transmissão (Tx) e recepção (Rx);

λ_m = o comprimento de onda, em m, dado pela razão da velocidade de propagação do sinal (3×10^8 m/s) e sua frequência em Hz.

No caso de Equação 1 ser satisfeita, devem-se calcular as distâncias ao horizonte rádio (Equações 2 e 3):

$$d_{Tx-HR} = \sqrt{2a_e h_1} \quad (2),$$

$$d_{Rx-HR} = \sqrt{2a_e h_2} \quad (3)$$

Em que:

d_{Tx-HR} = a distância (retilínea), em km, da antenna da estação de transmissão ao horizonte rádio;

d_{Rx-HR} = a distância (retilínea), em km, da antenna da estação de recepção ao horizonte rádio;

$h_{1(ou\ 2)}$ = a altura de transmissão (ou recepção), em km;

a_e = o raio equivalente da Terra, em km, dado por $a_e = Ka = 8493,33$ km, em que a é o raio da Terra em km ($a = 6370$ km) e K é o fator próprio para a região do enlace, igual a $4/3$ para a atmosfera padrão.

Como referência da altura da antenna da boia, foi utilizado valor próximo àquele do Projeto da Raia Virtual de Tiro do Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP) (SOUZA, 2019). Tal sistema opera entre 400 e 500 MHz, portanto a frequência central desse intervalo também foi utilizada como referência. Para as diferentes alturas da antenna do navio que irá receber os dados das boias, foram propostos valores que abrangem a maioria dos mastros nos navios utilizados pela Marinha do Brasil. Assim, calcularam-se as perdas de percurso na transmissão sobre a superfície do mar para distâncias de 15 até 50 km, nas frequências de 300 MHz, 450 MHz, 1 GHz, 2 GHz e 3 GHz, visando cobrir toda faixa de frequência UHF, para a altura do centro da antenna UHF da boia de 3 m e a altura do centro da antenna UHF do navio em 3, 10, 20, 30, 40 e 50

m da superfície do mar, conforme Figura 1. Com tais dados, empregando-se a Equação 1, verificou-se que para as frequências limite inferior e superior se obtêm, respectivamente:

Para $f = 300\text{MHz}$, então $d > 15\text{km}$, e para $f = 3\text{GHz}$, então $d > 6,96\text{km}$.

Com base nas Equações 2 e 3, as distâncias ao horizonte rádio são iguais a 7,14 km para 3 m de altura da antena e 29,14 km para 50 m.

As seguintes condições podem ocorrer (Figura 2).

Para todas as distâncias de 15 até 50 km, em que o transmissor Tx é uma boia, conclui-se que o receptor Rx seja ele outra boia ou o navio, encontra-se na zona de difração da Terra esférica. Então, deve-se calcular (Equações 4 e 5):

$$X = 2,188 \cdot \beta \cdot f^{1/3} \cdot a_e^{-2/3} \cdot d \quad (4)$$

$$Y_{1(ou2)} = 9,575 \cdot 10^{-3} \cdot \beta \cdot f^{2/3} \cdot a_e^{-1/3} \cdot h_{1(ou2)} \quad (5)$$

Em que:

β = um parâmetro que considera o tipo de solo e a polarização.

Para a polarização horizontal, qualquer que seja a frequência superior a 20 MHz sobre a terra, polarização vertical e frequência acima de 300 MHz sobre o mar, utiliza-se $\beta = 1$; f é a frequência portadora de transmissão, em MHz; e $h_{1(ou2)}$ é a altura de transmissão (ou recepção), em m.

A perda no espaço livre é dada por Equação 6:

$$FSL(dB) = -[32,44 + 20 \log(d) + 20 \log(f_{MHz})] \quad (6)$$

E a perda adicional de sinal na zona de difração é uma função dos fatores $F(X)$ e $G(Y_{1(ou2)})$ (Equação 7):

$$L_d(dB) = -[F(X) + G(Y_1) + G(Y_2)] \quad (7)$$

Em que (Equações 8 e 9):

$$F(X) = \begin{cases} 11 + 10 \log(X) - 17,6X; & \forall X \geq 1,6 \\ -20 \log(X) - 5,6488X^{1,425}; & \forall X < 1,6 \end{cases} \quad (8)$$

$$G(Y_{1(ou2)}) = \begin{cases} 17,6(B - 1,1)^{1/2} - 5 \log(B - 1,1) - 8; & \forall B > 2 \\ 20 \log(B + 0,1B^3); & \forall B < 2 \end{cases} \quad (9)$$

Com (Equação 10):

$$B = \beta Y_{1(ou2)} \quad (10)$$

A perda total de sinal no percurso é a soma das perdas de sinal na zona de difração e no espaço livre (Equação 11).

$$L(dB) = L_d(dB) + FSL(dB) \quad (11)$$

Para alguns casos em que o transmissor Tx é um navio, conclui-se que o receptor Rx, uma boia, encontra-se na zona de interferência. Para que nesses casos haja comunicação entre o navio e a boia, devem-se calcular (Equações 12, 13, 14, 15 e 16):

$$m = \frac{d^2}{4ae(h_1+h_2)} \quad (12),$$

$$c = \frac{|h_1-h_2|}{h_1+h_2} \quad (13)$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right], \forall m > 0 \quad (14)$$

$$d_1 = \frac{(d+bd)}{2} \quad (15),$$

$$d_2 = \frac{(d-bd)}{2} \quad (16)$$

Em que:

d_1 e d_2 = as distâncias retilíneas, em km, das antenas Tx e Rx ao ponto de tangência.

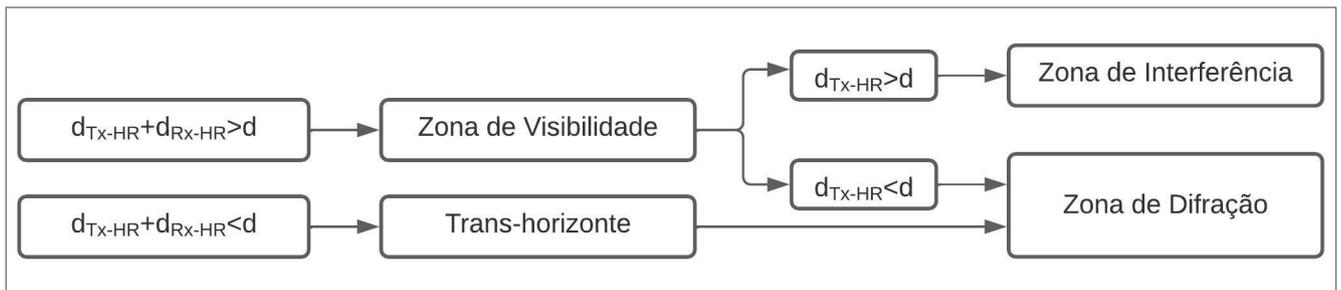


Figura 2. Fluxograma para identificar se a transmissão ocorre na zona de interferência ou na zona de difração.

Para a situação de frequências acima de 10 MHz, calcule-se (Equações 17 e 18):

$$h = \frac{\left(h_1 - \frac{d_1^2}{2ae}\right)d_2 + \left(h_2 - \frac{d_2^2}{2ae}\right)d_1}{d} \quad (17),$$

$$h_{req} = 0,552 \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d}} \quad (18)$$

Em que:

d_1, d_2, a_e devem ser utilizados em km para h , e d_1, d_2, d em m para h_{req} .

Para $h \geq h_{req}$, a perda L_d é igual a zero. No caso de $h < h_{req}$, deve-se calcular o raio da Terra equivalente modificado aem , em km, dado por Equação 19:

$$aem = 0,5 \left(\frac{d}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}\right)^2 \quad (19)$$

Em que:

d deve ser utilizado em m.

Deve-se então calcular a perda L_d em dB, por Equação 20:

$$L_d = \left[1 - \frac{h}{h_{req}}\right] L_h \quad (20)$$

Em que:

a perda L_d , em dB, é calculada pela Equação 7, utilizando aem , em km, nas Equações 4, 5, 8 e 9. Em seguida, deve-se calcular a perda L , em dB, conforme a Equação 11.

Para identificar o *beamforming* e a região de cobertura das antenas das boias e do navio, foi simulada uma antena monopolo para ser utilizada neste projeto. A Figura 3 mostra o esquema e apresenta as distâncias A e B, em km, e o ângulo γ , em graus, que formam as regiões de cobertura dessas antenas, considerando seu respectivo diagrama de radiação.

A distância entre as antenas é dada por d , em km, e o ângulo α , em graus, é o ângulo de abertura de meia potência da antena (HPBW), posicionada tanto no navio quanto na boia, o qual é obtido da análise do diagrama polar de potência irradiada em campo distante. Esse parâmetro está de acordo com o resultado da diretividade das antenas, que são consideradas de forma ideal como um monopolo centrado na frequência de 420 MHz.

A Figura 3 apresenta o diagrama de radiação polar das antenas, obtido por meio de simulação eletromagnética 3D no

software HFSS, que permite assim descrever o apontamento entre as antenas da boia e do navio em grandes distâncias na condição de mar calmo.

4. RESULTADOS

Para cada frequência analisada, foram calculadas as distâncias mínimas entre as antenas de transmissão e de recepção, considerando o modelo da Terra esférica, como mostra a Tabela 1. Tendo em vista que em 300 MHz a distância mínima é de 15 km, optou-se por realizar as análises partindo desse valor e chegando até 50 km, o que cumpre o objetivo do projeto de alcance mínimo de 20 milhas náuticas (37,04 km).

Para as simulações, foram calculadas as perdas de percurso, de acordo com as Equações 1 até 11, para a transmissão da boia para o navio ou outra boia, em função das distâncias entre as antenas para as alturas de 3, 10, 20, 30, 40 e 50 m nas frequências de 300 MHz, 450 MHz, 1 GHz, 2 GHz e 3 GHz, como mostram os gráficos das Figuras 4A até 4E. Para cada distância, foram destacadas as menores perdas de percurso

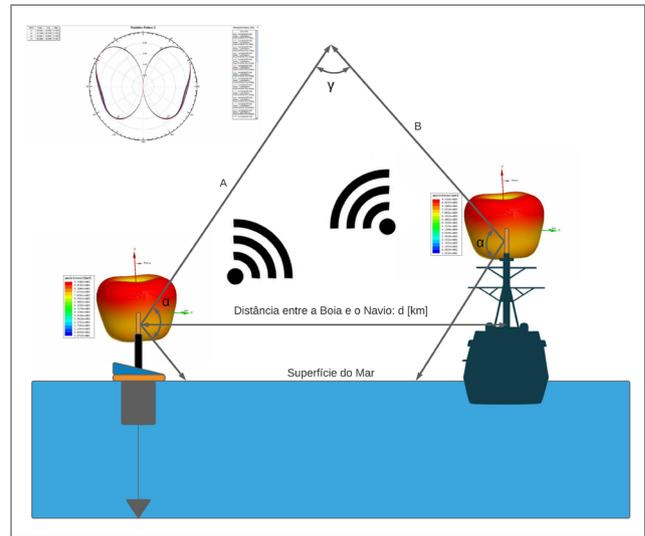


Figura 3. Beamforming e região de cobertura das antenas da boia e do navio.

Tabela 1. Distâncias mínimas para a faixa de frequência ultra-alta no modelo da Terra esférica.

f [MHz]	300	450	1.000	2.000	3.000
Distâncias mínimas [km]	15,00	13,10	10,04	7,97	6,96

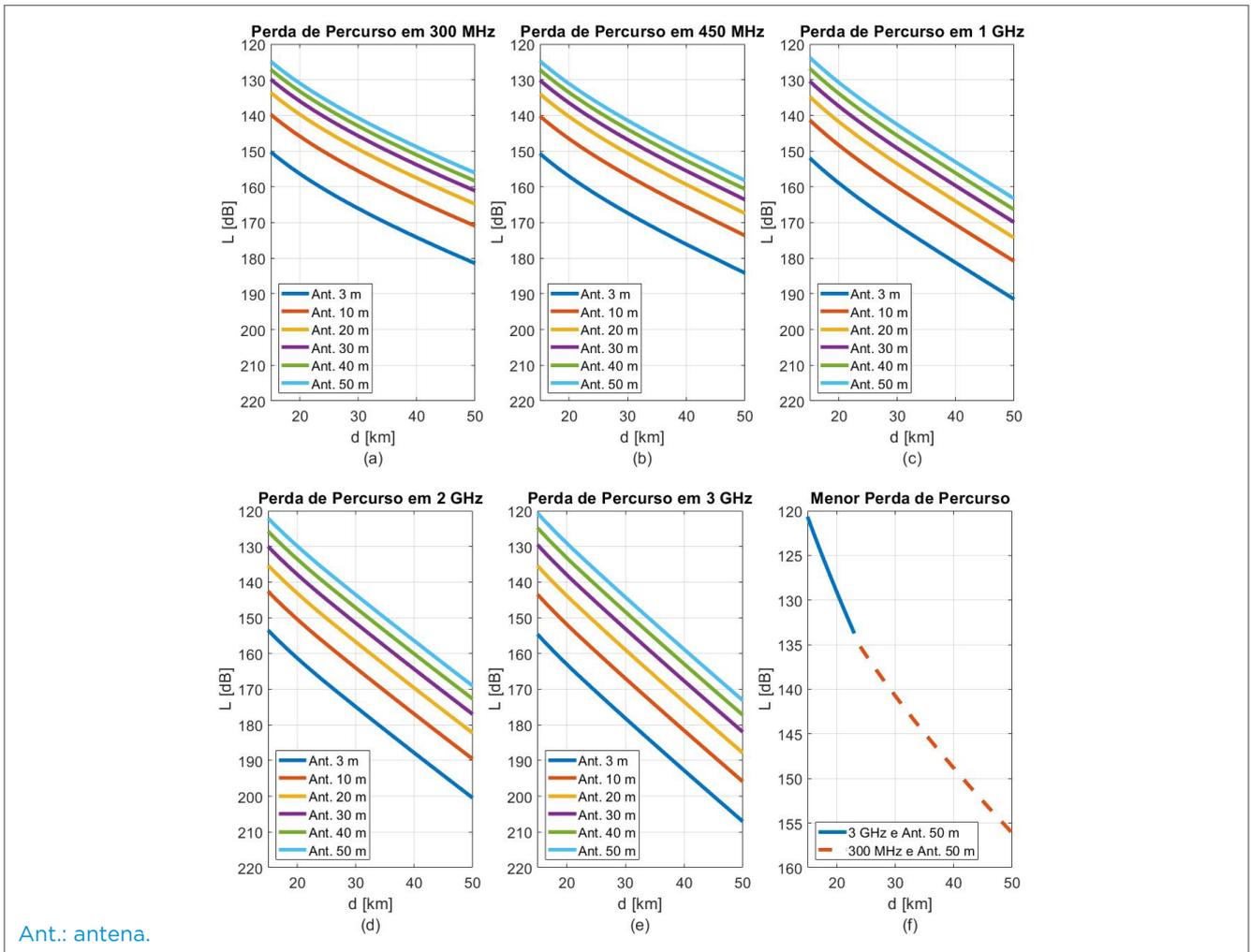


Figura 4. Gráficos da perda de percurso com a distância: (A) 300 MHz; (B) 450 MHz; (C) 1 GHz; (D) 2 GHz; (E) 3 GHz; (F) menor perda de percurso com a distância.

calculadas, como mostra o gráfico da Figura 4F e, adicionalmente, foram calculadas as perdas de percurso para distância de 20 milhas náuticas em função da altura das antenas de 3 até 50 m, como mostra o gráfico da Figura 5.

A Tabela 2 apresenta os casos em que as perdas de percurso na transmissão do navio para a boia, calculadas de acordo com as Equações 12 a 20, foram superiores às da boia para o navio.

Para a Figura 3, foram calculadas as distâncias $A = 17,77$ km e $B = 17,72$ km para $d = 15$ km e $A = 59,18$ km e $B = 59,13$ km para $d = 50$ km, que formam as regiões de cobertura das antenas para os limites de distância entre boia e navio, considerando-se a antena do navio de 50 m, $\gamma = 50^\circ$ e o ângulo de abertura de meia potência $\alpha = 116^\circ$.

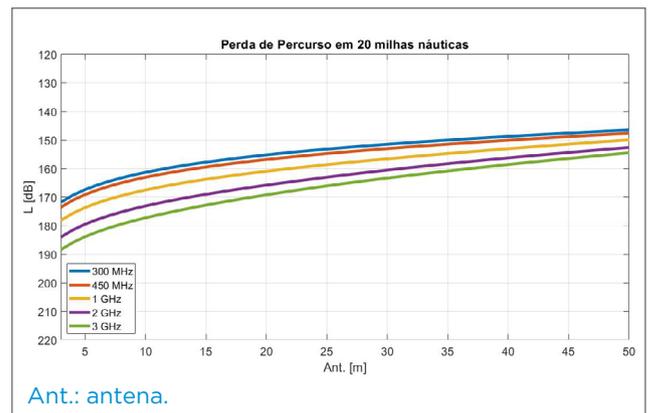


Figura 5. Gráfico da perda de percurso com a altura da antena em 20 milhas náuticas, nas diferentes frequências.

Tabela 2. Perdas de percurso para os casos em que na transmissão do navio para a boia foram superiores às da boia para o navio.

d [km]	L [dB]								
	Ant. 50 m, f = 3 GHz			Ant. 50 m, f = 2 GHz			Ant. 40 m, f = 3 GHz		
	Navio → Boia	Boia → Navio	Δ	Navio → Boia	Boia → Navio	Δ	Navio → Boia	Boia → Navio	Δ
15	123,00	120,66	2,33	123,18	122,07	1,10	125,07	124,76	0,31
16	124,16	122,44	1,73	124,31	123,73	0,58	-	-	-
17	125,25	124,16	1,09	125,37	125,34	0,03	-	-	-
18	126,28	125,84	0,43	-	-	-	-	-	-

5. CONCLUSÕES

Com base nas simulações, é possível concluir que, para mesma frequência de transmissão, as perdas de percurso elevam-se com o aumento da distância entre as antenas e com a redução da altura da antena do navio.

Para cada quilômetro acrescentado na distância entre as antenas, nas transmissões da boia para o navio, pode-se observar que até, 23 km, a frequência de 3 GHz com altura da antena do navio de 50 m apresenta a menor perda de percurso. Já entre 23 e 50 km, a frequência de 300 MHz com altura da antena do navio de 50 m é a que apresenta a menor perda de percurso.

Para a distância de 20 milhas náuticas (37,04 km) entre as antenas, as perdas decrescem com o aumento da altura da antena e com a redução da frequência de transmissão.

A maior variação das perdas de percurso ocorre no caso da transmissão em 50 km entre a frequência de 300 MHz com altura da antena do navio de 50 m (156,12 dB) e

3 GHz com altura da antena do navio ou outra boia de 3 m (207,07 dB).

No caso da transmissão em 20 milhas náuticas, a maior variação entre as perdas de percurso é para a antena do navio ou outra boia com altura de 3 m, sendo a menor perda de percurso para a frequência de 300 MHz (171,89 dB) e a maior em 3 GHz (188,48 dB).

Para as perdas de percurso nas transmissões do navio para boia de 15 até 18 km, foi possível identificar alguns casos para antenas do navio de 40 e 50 m, nas frequências de 2 e 3 GHz, em que as perdas de percurso foram superiores às das transmissões da boia para o navio. Sendo assim, deve-se considerar a maior perda de percurso a fim de garantir que seja possível a comunicação do navio com as boias.

As análises deste artigo servirão de referência para transmissões UHF realizadas entre boia e navio, considerando-se os valores de perda de propagação do sinal sobre a superfície do mar, em distâncias de até 50 km, cujos enlaces podem ser caracterizados experimentalmente.

REFERÊNCIAS

ANSYS HFSS 15.0. *Software*. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. 30 nov. 2021.

DAL BELLO, J.C.R. *Propagação de ondas eletromagnéticas: teorias e projetos*. Rio de Janeiro: Publit, 2014.

FREITAS, L. de L. *Análise da propagação troposférica em meios inhomôgenos bidimensionais marítimos utilizando traçado de raios e dados meteorológico de boias oceanográficas*. Dissertação

(Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ITU-R P.526-15. *Propagation by diffraction*. 2019.

MATHWORKS INC. *Matrix Laboratory (Matlab) software*. MathWorks Inc., 2018.

SOUZA, L.C.C. de. *Contribuições ao desenvolvimento do projeto da raia virtual de tiro da Marinha*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.