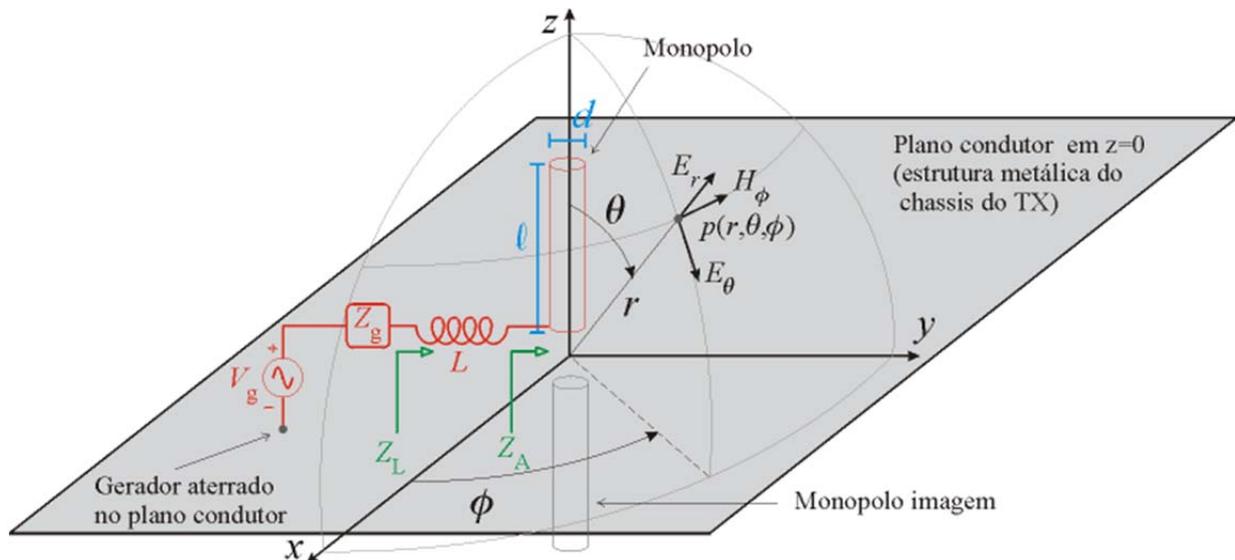


Dois transceptores (TX/RX) portáteis estabelecem um enlace na frequência de operação  $f = 128.45$  MHz. Os transceptores possuem antenas idênticas e de tamanho  $\ell = 10.5$  cm, sendo ambas constituídas por fio de cobre de bitola 15AWG, retilíneo, cujo diâmetro é  $d = 1.45$ mm. O fio de cobre é eletricamente isolado do chassis metálico do transceptor e é fixo a ele através de uma peça de sustentação cilíndrica de material dielétrico mecanicamente rígido, de modo que cada antena pode ser esquematicamente aproximada por um monopolo vertical aterrado conforme a Figura 1, sendo o chassis do receptor representado pelo plano condutor em  $z=0$  (plano de terra) mostrado na figura.



**Figura 1:** Monopolo vertical de tamanho  $\ell$  equivalente à antena de cada transceptor.  $V_g$  e  $Z_g$  representam o Equivalente de Thévenin do amplificador final de potência do transmissor TX. O amplificador final possui impedância de saída  $Z_g = 0.25 + j0 \Omega$  e entrega  $P_g = 80$ W à carga quando opera sob ROE 1:1. Uma vez que a antena é de tamanho reduzido em relação ao comprimento de onda, um indutor de valor  $L$  é inserido entre o amplificador final de potência do TX e a antena de modo a torná-la ressonante na frequência de operação  $f$ .

**Determine:**

- 1) O valor de  $L$  que torna a antena ressonante na frequência de operação  $f$ . Assuma como desprezível o efeito da proximidade do usuário do transceptor na impedância da antena.
- 2) A potência entregue à antena e o valor instantâneo máximo da corrente na mesma, assumindo que a resistência de aterramento é desprezível, mas levando em conta a resistência de perdas  $R_{ac}$  do fio de cobre na frequência de operação  $f$ . Sabe-se que a resistência ôhmica DC por metro de um fio de cobre 15AWG é de  $10.45 \times 10^{-3} \Omega/m$  e que a ação do efeito pelicular (*skin effect*) sobre a resistência DC de um fio de cobre de diâmetro  $d$  é dada por

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \left[ \left( 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d}{\text{mm}} \cdot \sqrt{\frac{f}{\text{Hz}}} \right) + 0.26 \right]$$

- 3) O valor instantâneo máximo do campo elétrico  $E_\theta$  e o módulo do Vetor de Poynting em um ponto  $p$  a uma distância  $r = 500$ Km da antena TX e sob um ângulo  $\theta = 90^\circ$ .

⇒ Para a solução das questões 4) e 5) assuma que: (i) O transceptor que opera como receptor (RX) esteja localizado no ponto  $p$  referido em 3). (ii) Ambos transceptores (TX e RX) encontram-se com suas antenas perpendiculares ao nível do solo não havendo obstáculos entre eles. (iii) A reflexão da onda eletromagnética no solo é desprezível. Nota: (ii) e (iii) permitem assumir que as condições de propagação entre as antenas TX e RX aproximam-se às do espaço livre.

- 4) A área de recepção máxima da antena RX localizada em  $p$  e o equivalente de Thévenin da mesma quando esta é submetida ao campo eletromagnético irradiado pela antena TX. Para a determinação do equivalente de Thévenin da antena RX, assuma que a mesma não possui perdas.
- 5) O valor instantâneo máximo da tensão originada sobre a impedância de carga da antena RX (impedância de entrada do amplificador de sinal do receptor conectado à antena RX), levando em consideração as perdas na antena RX. Sabe-se que a impedância de entrada do amplificador de sinal é  $1.5 \Omega$  e que a rede de acoplamento entre antena RX e amplificador insere uma reatância  $jX \Omega$  no circuito de forma a tornar a antena RX ressonante.

**Nota:** Utilize o programa Zi\_CyDip com a constante  $EPS = 1 \times 10^{-2}$  para determinar a impedância de radiação referida aos terminais da antena.

# Solução:

## 1) Do enunciado são dados:

$$f := 128.45 \cdot \text{MHz} \quad l_w := 10.5 \cdot \text{cm} \quad d := 1.45 \cdot \text{mm} \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 2.333923 \text{ m} \quad \frac{2 \cdot l}{\lambda} = 0.09 \quad \rightarrow \text{Logo, a antena é um dipolo curto.}$$

Impedância de entrada  $Z_{Ad}$  do dipolo (note que "l" é a dimensão do monopolo mostrada na Fig.1 do enunciado):

$$Z_{Ad} := Z_{in\_Schelkunoff} \left( \frac{0.5 \cdot d}{\text{mm}}, \frac{\lambda}{\text{m}}, \frac{2 \cdot l}{\text{m}} \right) \quad Z_{Ad} = (1.359 - 1.676i \times 10^3) \cdot \Omega \quad (\text{EPS}=1\text{E-}2)$$

Impedância de entrada  $Z_A$  do monopolo aterrado:

$$Z_A := \frac{Z_{Ad}}{2} \quad \rightarrow \text{Porque um monopolo aterrado apresenta metade da impedância de radiação de um dipolo no espaço livre.}$$

$$Z_A = (0.679 - 837.878i) \cdot \Omega$$

$$X_L = \text{Im}(Z_r) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$L_w := \frac{-\text{Im}(Z_A)}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad L = 1.038 \cdot \mu\text{H}$$

## 2) Do enunciado são dados:

$P_g := 80.0 \cdot \text{W}$   $\rightarrow$  Visto que a impedância  $Z_g$  é real (resistiva), então ROE 1:1 especificada no enunciado implica na condição de *Conjugate Matching*, isto é,  $Z_L = Z_g^*$ , condição em que é obtida máxima transferência de potência (MTP) entre gerador e carga. Em outras palavras, nesta condição, a  $P_g$  dada é a potência que o TX entrega à uma carga  $Z_L = Z_g^*$  (resistiva), e este valor é a máxima potência que este gerador consegue entregar.

A tensão RMS na carga  $Z_L$  (resistiva) sob MTP ( $Z_L = Z_g^*$ ) é dada por:

$$V_{Lmtp} := \sqrt{P_g \cdot Z_g} \quad V_{Lmtp} = 4.472 \cdot \text{V (rms)}$$

Visto que sob MTP o Equivalente de Thévenin é formado um divisor de tensão por 2, temos que a tensão  $V_g$  do gerador é dada por:

$$V_g := 2 \cdot V_{Lmtp} \quad V_g = 8.944 \cdot \text{V (rms)}$$

Do enunciado é dado:

$$R_{Distrib} := 10.45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\Omega}{\text{m}} \quad l = 0.105 \text{ m}$$

Daí a Resistência de Perdas  $R_p$  é obtida através de:

$$R_{pDC} := R_{Distrib} \cdot l \quad R_{pDC} = 1.097 \times 10^{-3} \cdot \Omega \quad (\text{Note que "l" é a dimensão do monopolo mostrada na Fig.1 do enunciado})$$

$$R_p := R_{pDC} \cdot \left[ \left( 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d}{\text{mm}} \cdot \sqrt{\frac{f}{\text{Hz}}} \right) + 0.26 \right] \quad R_p = 0.069 \cdot \Omega \quad \rightarrow \quad \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \left[ \left( 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d}{\text{mm}} \cdot \sqrt{\frac{f}{\text{Hz}}} \right) + 0.26 \right]$$

Visto que o indutor L anula a reatância capacitiva da antena (anula a parte imaginária de  $Z_A$ ) temos que a impedância de carga  $Z_L$  "vista" pelo gerador é dada pela soma da parte real de  $Z_A$  com  $R_p$ :

$$Z_L := \text{Re}(Z_A) + R_p \quad Z_L = 0.748 \cdot \Omega$$

A corrente  $I_L$  que atravessa  $Z_L$  é dada por:

$$I_L := \frac{V_g}{Z_g + Z_L} \quad I_L = 8.961 \text{ A (rms)}$$

E o valor instantâneo máximo da corrente na antena transmissora é:

$$I_o := \sqrt{2} \cdot I_L \quad I_o = 12.672 \text{ A}$$

Daí, a potência fornecida à antena transmissora pelo gerador é:

$$P_{Atx} := I_L^2 \cdot \text{Re}(Z_A) \quad P_{Atx} = 54.549 \cdot \text{W}$$

**3) Do enunciado é dado:**

$r := 500 \cdot \text{km}$        $\theta := 90 \cdot \text{deg}$

E sabemos que (vide apostila Cap II):

$E_{\theta}(\theta, \phi) = 60\pi I_0 \left( \frac{\ell}{r\lambda} \right) e^{j\left(\omega t - \beta r + \frac{\pi}{2}\right)} \sin \theta$       → Expressão de  $E_{\theta}$  no campo distante de um dipolo curto, sendo  $60\pi = 0.5Z_0$ .

$Z_0 := 120 \cdot \pi \cdot \Omega$       → Impedância do espaço livre.

O tamanho equivalente  $L_e$  de um dipolo curto é metade de seu tamanho total, ou seja, é igual ao tamanho "l" de um de seus braços:

$L_e := l$       →  $L_e = 0.105 \text{ m}$

Daí o campo  $E_{\theta}$  nas vizinhanças do RX é dado por:

$E_{\theta} := 0.5 \cdot Z_0 \cdot I_0 \cdot \left( \frac{L_e}{r \cdot \lambda} \right) \cdot \sin(\theta)$        $E_{\theta} = 2.149 \times 10^{-4} \cdot \frac{\text{V}}{\text{m}}$

E o módulo do Vetor de Poynting resultante nas vizinhanças do RX é dado por:

$S := \frac{E_{\theta}^2}{2 \cdot Z_0}$        $S = 6.127 \times 10^{-11} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

**4)  $\frac{2l}{\lambda} = 0.09$       → A antena é um dipolo curto. Logo:**

$ARX_{\text{maxDip}} := \frac{3}{8 \cdot \pi} \cdot \lambda^2$       →  $ARX_{\text{max}}$  de um dipolo curto - vide Cap III apostila equação (73).

Mas um monopolo aterrado apresenta o dobro da diretividade de um dipolo de mesmas dimensões. Isto ocorre devido ao limite de integração de  $\theta$  na equação (47) do Cap III da apostila ser  $\pi/2$  em razão do padrão de irradiação do monopolo (irradia em um só hemisfério). E, portanto, a  $ARX_{\text{max}}$  de um monopolo aterrado é o dobro da  $ARX_{\text{max}}$  de um dipolo de mesmas dimensões. Assim, temos:.

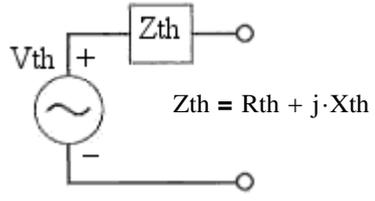
$ARX_{\text{max}} := 2 \cdot ARX_{\text{maxDip}}$        $ARX_{\text{max}} = 1.3 \text{ m}^2$

O Equivalente de Thévenin da antena RX é definido por:

$V_{\text{th}} := \sqrt{4 \cdot ARX_{\text{max}} \cdot S \cdot \text{Re}(Z_A)}$        $V_{\text{th}} = 1.471 \times 10^{-5} \cdot \text{V (rms)}$

$V_{\text{th}} := \sqrt{2} \cdot V_{\text{th}}^{\text{rms}}$        $V_{\text{th}} = 2.081 \times 10^{-5} \cdot \text{V (peak)}$

$R_{\text{th}} := \text{Re}(Z_A)$        $R_{\text{th}} = 0.679 \cdot \Omega$

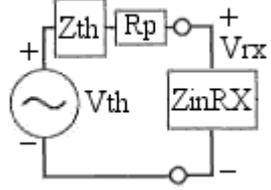


**5) Do enunciado, a resistência de entrada do amplificador de sinal do receptor conectado à antena RX é  $R_{\text{inRX}} := 1.5\Omega$ .**

Ainda do enunciado, sabe-se que a rede de acoplamento entre antena RX e a entrada do amplificador de sinal conectado aos terminais da antena RX insere uma reatância  $jX$  no circuito de forma a tornar a antena RX ressonante. Portanto  $X = -X_{\text{th}}$ , isto é,  $X$  anula a parte reativa  $X_{\text{th}}$  da impedância  $Z_{\text{th}} = R_{\text{th}} + jX_{\text{th}}$  do equivalente de Thévenin da antena RX.

Daí, dos Equivalentes de Thévenin da Antena RX e do amplificador de sinal, ambos em série com a resistência de perdas  $R_p$ , temos que a tensão na entrada do amplificador de sinal é:

$V_{\text{rx}} := \frac{V_{\text{th}} \cdot R_{\text{inRX}}}{R_{\text{th}} + R_p + R_{\text{inRX}}}$        $V_{\text{rx}} = 1.388 \times 10^{-5} \cdot \text{V}$



Note que, uma vez que as antenas TX e RX são idênticas, é válido atribuir a resistência de perdas  $R_p$  da antena TX à antena RX.