

Linhas de Transmissão e Choques Elétricos em um Passarinho

(Transmission Lines and Electric Shocks in a Bird)

José Arnaldo Redinz

*Departamento de Física,
Universidade Federal de Viçosa,
CEP: 36571-000, Viçosa, MG
e-mail: redinz@mail.ufv.br*

Recebido 27 de Dezembro, 1997

Por que um passarinho pousado em um fio da rede elétrica não toma choque? Essa questão é abordada aqui sob o ponto de vista dos conceitos básicos de circuitos elétricos e linhas de transmissão. Consideramos separadamente os efeitos devidos à auto-capacitância, às perdas na resistência da linha e à diferença de fase. Parâmetros reais de linhas de transmissão são usados para demonstrar, com base nas equações deduzidas para a voltagem ao longo da linha, a ausência de choques elétricos sobre um passarinho.

Abstract

Why a bird resting in a wire of the electrical system doesn't receive a shock? This question is addressed here by the point of view of the basic concepts of electric circuits and transmission lines. We consider separately the effects due to the self-capacitance, to the losses in the line's resistance and to the phase difference. Real parameters of transmission lines are used to show, based in the equations derived for the voltage along the line, the absence of electric shocks in a bird.

I Introdução

Por que um passarinho pousado em um fio da rede elétrica não toma choque? Essa pergunta, sobre uma constatação óbvia para qualquer pessoa que vê um passarinho pousado nos fios da rede de energia elétrica, pode gerar respostas diversas, quase todas, ou completamente equivocadas, ou demasiado simplificadoras. O passarinho não toma choque porque é isolante, porque ele não fecha nenhum circuito, porque ele pousa com as duas patas, porque a distância entre suas patas é muito pequena. Essas são algumas das respostas que, caso a pergunta seja feita em uma sala de aula de eletromagnetismo, provavelmente serão ouvidas e defendidas com afinco. A questão, como pretendemos mostrar aqui, envolve conceitos básicos de eletricidade tais como corrente elétrica, circuitos elétricos e linhas de transmissão,

bem como detalhes dos efeitos da corrente elétrica sobre um tecido vivo - o choque elétrico.

Iniciaremos fazendo um breve apanhado sobre a teoria das linhas de transmissão e depois, consideraremos a aplicação dessa teoria a situações reais simuladas com dados obtidos na Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Certamente estamos descartando de início a resposta que classifica o passarinho como um corpo isolante. Essa aliás pode ser apontada como a pior resposta entre todas as outras. Com certeza o tecido que compõe o organismo das aves é bastante similar àquele que compõe os seres humanos e todos nós já tomamos um choque elétrico para nos certificarmos de que estamos longe de sermos isolantes.

A sensação do choque elétrico, que consiste, basicamente, em contrações musculares e queimaduras, de-

pende exclusivamente do valor da corrente que atravessa o organismo e não da diferença de potencial a que este está submetido. Essa diferença de potencial provocará um fluxo de cargas apenas se as condições de (ou falta de) isolamento permitirem. É sabido que pode-se perfeitamente trabalhar na manutenção de linhas de transmissão energizadas (com cerca de 500 KV de diferença de potencial entre duas fases) sem que haja risco de choque elétrico. Além disso, o perigo que um choque elétrico pode oferecer para aquele que o recebe depende também do caminho que a corrente elétrica percorre dentro do organismo e do intervalo de tempo em que ele ocorre. Para os seres humanos, o choque mais perigoso é aquele onde a corrente flui de um braço para o outro, passando pelo músculo cardíaco. Nesse casos, uma corrente de apenas 10 mA pode provocar uma parada cardíaca. A sensação de desconforto com a passagem da corrente elétrica pelo organismo tem início quando a corrente atinge cerca de 5 mA, quando começam a ser sentidas contrações musculares. Para uma corrente acima de 100 mA podem ocorrer asfixia e queimaduras graves.

De fato, o parâmetro verdadeiramente importante para determinar os efeitos de um choque elétrico deve ser a densidade de corrente e não apenas o valor da corrente em si. Uma mesma corrente que percorra, em duas situações diferentes de contato, caminhos com diferentes áreas efetivas de tecido onde as cargas se deslocam, deve produzir danos maiores na área menor. Nesse sentido, um choque elétrico que percorre o caminho que vai de um braço ao outro, produz uma corrente bastante concentrada na região do coração. Por outro lado, para um caminho que vai de um braço em direção ao chão, passando pelas pernas, ainda que a corrente fosse a mesma da situação anterior, a densidade de corrente seria bem menor na região do coração.

No que se segue consideraremos a situação em que um ser vivo, como, por exemplo, um passarinho, entra em contato (direto) com um (e apenas um) dos fios de uma linha de transmissão energizada, como ilustrado na Figura 1. O caso em que houvesse o contato direto em dois fios simultaneamente, ou em um fio e em um objeto aterrado, não precisa ser discutido. Mesmo para uma linha de distribuição residencial, onde a diferença de potencial entre fase e neutro é da ordem de 120 V, haveria um choque elétrico com uma corrente da ordem de 100 mA, o suficiente para provocar, conforme o percurso da corrente e a duração do choque, morte instantânea por parada cardíaca e queimaduras graves.

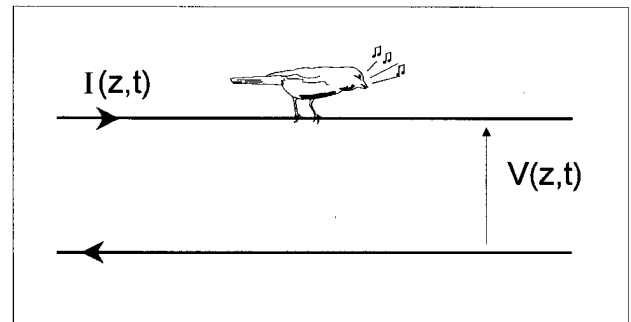


Figura 1. Ilustração da situação considerada nesse artigo: um passarinho pousado em um dos fios de uma linha de transmissão de dois fios com diferença de potencial $V(z,t)$ e corrente $I(z,t)$.

II. Linhas de Transmissão

Para discutir os efeitos da rede elétrica sobre um passarinho vamos inicialmente elaborar alguns conceitos relativos às linhas de transmissão em geral.

Em geral, podemos dividir as linhas de energia elétrica em linhas de transmissão, que trazem a energia das usinas geradoras para as cidades, e linhas de distribuição que distribuem essa energia entre as diferentes cargas dentro da cidade. Nessas linhas o dielétrico entre os fios é, geralmente, o ar cuja condutividade é da ordem de $10^{-14} (\Omega \text{ m})^{-1}$ em condições normais de temperatura e umidade. Os níveis de tensão entre duas fases diferentes são, tipicamente, de 138 KV a 500 KV para as linhas de transmissão e 220 V a 13,8 KV para as de distribuição. Essas tensões oscilam senoidalmente no tempo com uma frequência de 60 Hz. Os fios condutores dessas linhas são geralmente constituídos de alumínio e aço e apresentam uma resistência elétrica da ordem de 0,2 a 1,8 Ω/Km .

Consideraremos uma linha de transmissão formada por dois fios condutores retos, paralelos entre si, homogêneos e muito longos. Cada um dos fios possui uma resistência elétrica por unidade de comprimento $R \Omega/\text{m}$ e uma auto-indutância por unidade de comprimento $L \text{ H}/\text{m}$. Os dois fios estão isolados um do outro por um dielétrico que possui uma condutância por unidade de comprimento $G (\Omega \text{ m})^{-1}$. O conjunto formado pelos dois fios separados por um isolante forma um capacitor, que, suporemos, possui uma capacitância por unidade de comprimento $C \text{ F}/\text{m}$.

Um circuito equivalente para a linha de transmissão, representando a conexão destes componentes (resistores, capacitor e indutores), está mostrado na Figura 2. Nesta figura representamos um comprimento infinitesimal dz da linha. Este segmento da linha pode ser

pensado como sendo constituído por uma associação de dois resistores de resistência $R dz$ representando as perdas por efeito Joule nos dois fios, um resistor de condutância $G dz$ representando a conexão elétrica, entre os dois fios através do dielétrico, um capacitor de capacitância $C dz$ que representa o efeito do campo elétrico de um fio sobre o outro e duas bobinas de indutância $L dz$ representando a influência do campo magnético de cada um dos fios sobre si mesmo (auto-indutância). Assim, a linha de transmissão fica reduzida, do ponto de vista do eletromagnetismo, a uma associação sucessiva desses circuitos básicos.

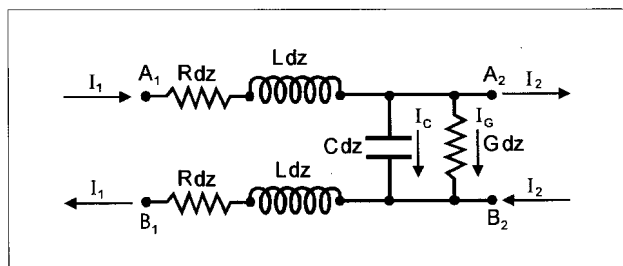


Figura 2. Circuito elétrico equivalente a um segmento de comprimento infinitesimal da linha de transmissão.

Para deduzir as equações que governam os comportamentos da tensão e da corrente em uma linha de transmissão faremos o uso das leis de Kirchhoff. Por hipótese assumiremos inicialmente que a tensão V e a corrente I na linha são funções da coordenada z (medida paralelamente à linha) e do tempo t .

Considere o ponto A_1 na Figura 2. Suponha que nesse ponto o potencial elétrico (em relação a um referencial particular) seja $V(A_1)$ e a corrente $I(A_1)$. Se caminharmos no sentido de A_1 para A_2 obtemos, segundo a lei das malhas (omitiremos aqui o argumento t de V e I):

$$V(A_1) - (R dz) I(A_1) - (L dz) \frac{\partial I(A_1)}{\partial t} = V(A_2) \quad (1)$$

onde usamos a lei de Faraday para a força eletromotriz induzida em uma bobina de indutância $L dz$. Da mesma forma, para o caminho que vai do ponto B_1 para o ponto B_2 , obtemos

$$V(B_1) + (R dz) I(B_1) + (L dz) \frac{\partial I(B_1)}{\partial t} = V(B_2) \quad (2)$$

A lei dos nós aplicada ao ponto A_1 fornece

$$I(A_1) = I_G + I_C + I(A_2) \quad (3)$$

onde I_G é a corrente (de fuga) que vai de um fio para o outro através do dielétrico e I_C é a corrente de carga e

descarga do capacitor $C dz$ formado pelos dois segmentos de fio. Podemos usar ainda as equações

$$I(A_1) = I(B_1) = I_1 \quad \text{e} \quad I(A_2) = I(B_2) = I_2 \quad (4)$$

devido à continuidade da corrente na linha, ou seja, a corrente que vai pelo fio superior volta pelo fio inferior.

Seja V_1 a diferença de potencial entre os pontos A_1 e B_1 , ou seja, $V_1 = V(A_1) - V(B_1)$, analogamente para V_2 . Subtraindo (2) de (1) resulta:

$$\frac{V_2 - V_1}{dz} = -2 R I_1 - 2 L \frac{\partial I_1}{\partial t} \quad (5)$$

Levando em conta agora, que o ponto A_1 está em uma posição z qualquer ao longo da linha e que o ponto A_2 está na posição vizinha $z + dz$, podemos assumir que

$$V_2 = V_1 + \left(\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} \right) dz \quad (6)$$

e assim:

$$\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = -R I(z,t) - L \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} \quad (7)$$

que é a primeira equação que obtemos para a linha de transmissão. Note que nessa equação, por conveniência, redefinimos o parâmetro R como sendo a resistência por unidade de comprimento da linha que é, simplesmente, o dobro da resistência de um dos fios. De maneira análoga, L representa agora a indutância por unidade de comprimento da linha. Usando, na Equação (3) as relações

$$I_G = G V_1 \quad (\text{Lei de Ohm aplicada a } G) \quad (8)$$

e

$$I_C = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{\partial C V_1}{\partial t} = C \frac{\partial V_1}{\partial t} \quad (9)$$

onde $q(t)$ é a carga no capacitor no tempo t , obtemos:

$$I_1 = G V_1 + C \frac{\partial V_1}{\partial t} + I_2 \quad (10)$$

Usando uma relação análoga a (6) para as correntes, qual seja:

$$I_2 = I_1 + \left(\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} \right) dz \quad (11)$$

obtemos, finalmente,

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -G V(z,t) - C \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} \quad (12)$$

que é a segunda equação para as linhas de transmissão.

Em seguida, abordaremos dois casos em separado: a linha sem perdas ($R = G = 0$) com corrente e tensão

alternadas e a linha com perdas com corrente e tensão contínuas (independentes do tempo).

III. Efeitos da Linha Sobre um Passarinho

Se levamos em conta as respostas à pergunta que mencionamos no início da nossa discussão, vemos que acredita-se que o passarinho não toma choque por duas razões básicas: 1) ele não fecha nenhum circuito pois só toca em um fio da rede; 2) a distância entre suas patas é muito pequena para que a diferença de potencial existente entre elas, devido à queda de potencial na linha (causada por sua resistência elétrica), seja suficiente para provocar um choque elétrico. De fato, um outro efeito que raramente é lembrado nas discussões é a diferença de potencial entre as patas do passarinho devido à diferença de fase na tensão ao longo da linha. Discutiremos aqui os três efeitos separadamente. Inicialmente mostraremos que o passarinho não necessita tocar em outro fio da linha ou em um objeto aterrado para ‘fechar um circuito’. De fato, ele fecha um circuito tanto quanto qualquer capacitor ligado a um circuito de corrente alternada. A esse primeiro efeito denominamos ‘Efeito Capacitivo’. Em segundo lugar iremos considerar o efeito da queda de potencial (DDP) ao longo da linha devido às perdas produzidas por R e G . Neste caso consideraremos que a tensão e a corrente são independentes do tempo. Finalmente discutiremos o efeito da diferença de fase da tensão (e da corrente) ao longo da linha. Para isso consideraremos uma linha ideal sem perdas com tensão e corrente alternadas (senoidais).

III.1 O Efeito Capacitivo

No estudo deste primeiro efeito não é necessário o uso das equações da linha de transmissão obtidas anteriormente. A transferência de carga devido ao contato entre o passarinho e a linha é análoga àquela que ocorreria em uma situação em que duas esferas condutoras de potenciais inicialmente diferentes se tocassem e atingissem, através da transferência de cargas entre elas, o mesmo potencial eletrostático final. Aqui não temos uma situação eletrostática, já que o potencial da linha oscila no tempo e esta se encontra, de fato, eletricamente neutra. No entanto, a fonte de energia elétrica conectada à linha ‘bombeia cargas constantemente de tal forma a manter o potencial elétrico com amplitude constante em cada ponto. Assim, qualquer objeto condutor que toque a linha deverá ter, em cada instante, o mesmo potencial do ponto de contato com a linha

(vamos desprezar aqui a distância entre as patas do passarinho, essa será considerada nas próximas seções).

Para estimar a corrente a que o passarinho fica submetido devido ao simples contato com um dos fios da linha, assumirei que este funcione como uma placa de um capacitor, a outra placa sendo a própria terra ou mesmo o segundo fio da linha. De fato não necessitamos procurar uma outra placa para esse capacitor, o conceito que estamos usando aqui é o de auto-capacitância, ou seja, a razão entre a carga e o potencial de um objeto condutor. Esse capacitor será constantemente carregado e descarregado, havendo um fluxo de cargas oscilante no tempo deste para a linha. Para estimar o valor desse capacitor, vamos admitir que o passarinho possa ser aproximado por uma esfera condutora de raio r . Sua capacitância será, portanto (ver [1] pag. 95)

$$C = 4\pi\epsilon_0 r \quad (13)$$

onde ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo (bastante próxima da permissividade elétrica do ar). Efetivamente, qualquer hipótese sobre a forma desse capacitor não é determinante para as estimativas que pretendemos fazer aqui. Não é difícil mostrar que a auto-capacitância de um condutor de formato arbitrário será sempre da forma $C = K\epsilon_0 l$ onde l é um comprimento característico desse condutor e K uma constante (4π no caso da esfera). Nossa hipótese de um capacitor esférico é apenas uma escolha sem implicações marcantes sobre nossas conclusões futuras. Se a carga no capacitor vale $q(t)$, a corrente será dada por:

$$I_C(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{dCV(t)}{dt} = 4\pi\epsilon_0 r \frac{dV(t)}{dt} \quad (14)$$

onde $V(t)$ é o potencial da placa (que é o mesmo do ponto da linha onde o passarinho está pousado) em função do tempo. Vamos assumir um comportamento senoidal para esse potencial, ou seja

$$V(t) = V_0 \text{sen}(wt) \quad (15)$$

que é o comportamento usual em uma linha real de transmissão. Assim

$$I_C(t) = 4\pi\epsilon_0 r V_0 w \cos(wt) \quad (16)$$

A amplitude dessa corrente é $I_{C0} = 4\pi\epsilon_0 r V_0 w$. Consideremos um caso real porém extremo, o contato com uma linha de transmissão com potencial fase-terra da ordem de 500 KV ($5 \times 10^5 V$) oscilando com uma frequência de 60 Hz. Para a constante ϵ_0 adotaremos

o valor aproximado $\epsilon_0 \simeq 9 \times 10^{-12}$ F/m. Para o ‘raio’ do passarinho adotaremos (como ordem de grandeza) $r \simeq 0,1$ m. Com esse valores obtemos uma amplitude para a corrente de contato

$$I_{C0} \simeq 2 \text{ mA} \quad (17)$$

Esse resultado mostra um valor de corrente que não pode ser desconsiderado nas discussões, já que seria suficiente para provocar contrações musculares. No entanto, para essa situação particular, essa corrente não afeta o organismo do passarinho. Como discutimos anteriormente, devido ao fato de que essa corrente não possui um caminho preferencial no organismo (pela ausência de um segundo ponto de contato), a densidade de corrente em qualquer ponto será bastante baixa, com a corrente se concentrando principalmente na superfície da pele. Dessa forma, não haverá a sensação de choque elétrico devido ao simples contato com um dos fios da linha de transmissão, apesar de haver corrente elétrica fluindo constantemente da linha para o corpo do passarinho. Essa situação é análoga aquela onde uma pessoa que está de pé sobre uma plataforma isolante toca em um gerador de Van de Graaff (ver, por exemplo, [1]) e fica com os cabelos todos de pé sem acusar a sensação de choque elétrico. No instante do toque, há uma corrente que vai do gerador para a pessoa, no entanto, essa flui quase que exclusivamente pela superfície da pele e não provoca contrações musculares. Se, por outro lado, houvesse o toque de outra parte do corpo em um ponto aterrado, a corrente fluiria imediatamente para esse ponto, percorrendo o menor caminho, o que incluiria, com certeza, partes internas do organismo e, por conseguinte, o choque elétrico seria inevitável.

III.2 A DDP Gerada Pela Resistência da Linha

Consideraremos uma linha com perdas submetida a corrente e tensão contínuas. As equações (7) e (12) ficam:

$$\frac{\partial V(z)}{\partial z} = -R I(z) \quad (18)$$

e

$$\frac{\partial I(z)}{\partial z} = -G V(z) \quad (19)$$

Derivando (18) em relação a z e usando a equação (19) obtemos:

$$\frac{\partial^2 V(z)}{\partial z^2} = R G V(z) \quad (20)$$

cuja solução geral é da forma:

$$V(z) = A e^{\sqrt{RG}z} + B e^{-\sqrt{RG}z} \quad (21)$$

com a condição inicial $V(0) = V_0$. Uma solução análoga para $I(z)$ pode ser obtida das equações acima. Para que tenhamos uma solução fisicamente aceitável para $V(z)$ devemos impor ainda que $V(z \rightarrow \infty) \rightarrow 0$, já que não esperamos que as perdas na linha aumentem o potencial elétrico à medida que nos afastamos da fonte. Portanto, ficamos com:

$$V(z) = V_0 e^{-\sqrt{RG}z} \quad (22)$$

que tem a forma mostrada na Figura 3. A corrente $I(z)$ na linha será, nesse caso, simplesmente $V(z)/Z_0$ onde $Z_0 = \sqrt{R/G}$ é a impedância característica da linha.

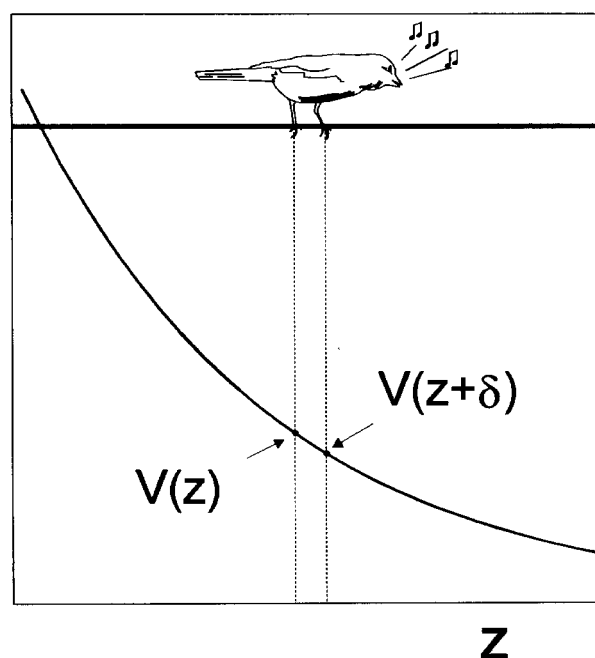


Figura 3. Diferença de potencial entre as duas patas de um passarinho devido às perdas causadas pelas resistências R e $1/G$ na linha. δ é a distância entre as patas.

Portanto, devido a esse efeito de decaimento da tensão ao longo da linha, caso o passarinho toque simultaneamente em dois pontos do mesmo fio, um em uma posição z e outro em uma posição mais distante $z+\delta$ (com $\delta > 0$), este ficaria submetido a uma diferença de potencial ΔV_{RG} dada por:

$$\Delta V_{RG} = V(z) - V(z + \delta) = V_0 e^{-\sqrt{RG}z} (1 - e^{-\sqrt{RG}\delta}) \quad (23)$$

Admitindo que os cabos da linha de transmissão sejam constituídos de alumínio e aço, com área de seção transversal $S = 100 \text{ mm}^2$, sua resistência típica será da ordem de $R=0,4 \Omega/\text{Km}$. O dielétrico entre os fios é o ar cuja condutância por unidade de comprimento pode

ser estimada pelo valor da sua condutividade que é da ordem de $10^{-14} (\Omega \text{ m})^{-1}$. Dessa forma, obtemos para essa situação $\sqrt{RG} \simeq 2 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$. Admitindo que a distância entre as patas de um passarinho normal é da ordem de 0,1 m, obtemos, finalmente (para $z \simeq 1$)

$$\Delta V_{RG} \simeq 10^{-4} V \quad (24)$$

para uma linha de transmissão com $V_0 = 500 \text{ KV}$. Essa é uma tensão muito baixo para provocar um choque elétrico. De fato, se considerarmos as mesmas condições anteriores, para que o passarinho ficasse submetido a uma diferença de potencial de 100 V (e tomasse um bom choque), as suas patas deveriam tocar em pontos distantes 100 Km um do outro.

III.3 A DDP Gerada Pela Diferença de Fase

Consideraremos uma linha sem perdas, ou seja, $R = G = 0$. As equações (7) e (12) ficam:

$$\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} = -L \frac{\partial I(z, t)}{\partial t} \quad (25)$$

e

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = -C \frac{\partial V(z, t)}{\partial t} \quad (26)$$

Derivando a equação (25) em relação a z e usando a equação (26) obtemos:

$$\frac{\partial^2 V(z, t)}{\partial z^2} = L C \frac{\partial^2 V(z, t)}{\partial t^2} \quad (27)$$

Nessa dedução supusemos que a função $I(z, t)$ é bem comportada de tal forma que possamos inverter a ordem de derivação (nas variáveis z e t) sem alterar o resultado final. De maneira análoga, podemos obter uma equação similar para $I(z, t)$

$$\frac{\partial^2 I(z, t)}{\partial z^2} = L C \frac{\partial^2 I(z, t)}{\partial t^2} \quad (28)$$

As equações diferenciais (27) e (28) são casos particulares (unidimensionais) da equação da onda cujas soluções têm a forma:

$$f(z, t) = G_1(t - kz) + G_2(t + kz) \quad (29)$$

onde G_1 e G_2 são funções quaisquer (suficientemente diferenciáveis), que representam ondas que se propagam no sentido de $z > 0$ (G_1) e $z < 0$ (G_2) com velocidade v dada por $v = 1/k = 1/\sqrt{LC}$. Se admitimos que a fonte de energia elétrica que alimenta a linha se encontra em $z = 0$, as soluções fisicamente aceitáveis serão aquelas que se propagam no sentido de $z > 0$. As ondas que

se propagam no sentido contrário representariam, nesse caso, ondas refletidas que poderiam ocorrer em discontinuidades ao longo da linha como, por exemplo, interrupções ou emendas. Estamos admitindo uma linha homogênea e infinita e portanto essas ondas refletidas não existirão. Uma solução particular que reflete bem o caso real de uma linha de transmissão é

$$V(z, t) = V_0 \text{ sen } w(t - z/v) \quad (30)$$

onde w é a frequência de oscilação da tensão. Note que nesse caso, como estamos desprezando as perdas na linha, não haverá nenhuma atenuação da tensão ou da corrente à medida que nos afastamos da fonte ($z = 0$). Esses sinais elétricos vão simplesmente se propagar ao longo da linha, transportando a energia gerada pela fonte. A corrente $I(z, t)$ na linha será, nesse caso, simplesmente $V(z, t)/Z_0$ onde $Z_0 = \sqrt{L/C}$.

Pode-se mostrar que para uma linha de transmissão arbitrária (sem perdas) (ver problema 6.5 de [2]) vale a relação :

$$LC = \mu_{diel} \epsilon_{diel} \quad (31)$$

onde μ_{diel} e ϵ_{diel} são as constantes características, permeabilidade magnética e permissividade elétrica, do meio dielétrico entre os condutores. Assim, a velocidade de propagação das ondas de tensão e corrente na linha é a mesma da propagação da luz no meio dielétrico, nesse caso, o ar. Dessa forma, teremos $v \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Portanto, o comprimento de onda das ondas de tensão e corrente será:

$$\lambda = v T \simeq 5000 \text{ Km} \quad (32)$$

onde T é o período das oscilações da tensão e da corrente (usamos $f=60 \text{ Hz}$). Assim, para que um passarinho ficasse submetido a uma diferença de potencial de V_0 , a amplitude da tensão na linha, a distância entre suas patas deveria ser da ordem de $\lambda/4$, ou seja, 1250 Km (ver ilustração na Figura 4). Assim, o efeito da diferença de fase será insuficiente para provocar qualquer sensação de choque elétrico em um passarinho devido à pequena distância entre suas patas.

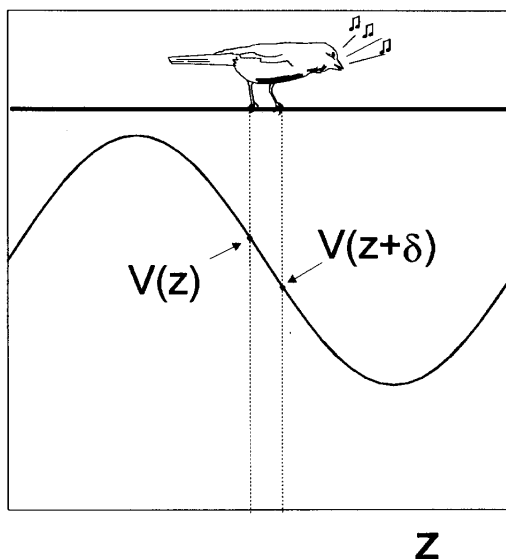


Figura 4. Diferença de potencial entre as duas patas de um passarinho devido à diferença de fase da tensão ao longo da linha. δ é a distância entre as patas.

IV. Conclusões

Fizemos estimativas numéricas para os efeitos provocados por uma linha de transmissão sobre um passarinho que repousa em um de seus fios. Levamos em conta, separadamente, três efeitos importantes, o efeito capacitivo, o efeito devido às perdas nas resistências e o efeito devido à diferença de fase. Em uma situação real esses efeitos ocorrerão simultaneamente. As soluções das equações para V e I na linha serão funções oscilantes (ondas) com amplitudes que decaem ao longo da linha (ver, por exemplo, [3]). Escolhemos a estratégia de separar os efeitos resistivos dos efeitos gerados pela diferença de fase para aumentar a clareza e simplificar a análise matemática das soluções. Concluimos que a ausência de choques elétricos sobre o passarinho pode ser atribuída ao fato de que este não fecha nenhum circuito, no sentido de que toca em apenas um fio da linha, e/ou à reduzida distância en-

tre suas patas, desde que levemos em consideração as peculiaridades das linhas de distribuição e transmissão reais. Com base no que foi discutido aqui, não é muito difícil mostrar que se a frequência da rede fosse muito maior do que os atuais 60 Hz (como numa linha de telecomunicações, por exemplo) ou se o material que compõe as linhas fosse um condutor de baixa qualidade (independentemente da utilidade prática dessas escolhas), a realidade poderia ser diferente. Enfim, procuramos mostrar que a ausência de choques elétricos não é uma impossibilidade física (como a frase 'ele não fecha nenhum circuito' parece supor) mas uma contingência dos parâmetros reais das redes elétricas. Além disso, acreditamos que esse exemplo, do passarinho pousado na rede elétrica, é bastante interessante para fomentar a discussão, em uma classe de eletromagnetismo, da aplicação do formalismo a uma situação real e, em particular, dos perigos que a corrente elétrica oferece para o organismo de um ser vivo.

Agradecimentos: O autor agradece as informações técnicas fornecidas pelo Engenheiro Chefe da CEMIG/Viçosa, Caio César Raposo.

Referências

References

- [1] Halliday D., Resnick R. e Walker J., *Fundamentos de Física 3 - Eletromagnetismo*, 4ª edição, LTC Editora S. A. 1996.
- [2] Jackson J. D., *Eletrodinâmica Clássica*, 2ª edição, Guanabara Dois 1983.
- [3] Ramo S. e Whinnery J. R., *Fields and Waves in Modern Radio*, John Wiley & Sons, New York, 1953.