

Equações das correntes axiais induzidas no corpo humano por campo elétrico de linha de alta tensão, nas condições isolado do solo e com braços elevados em ângulos diferentes

*Edson Nazareno Sozinho de Souza**, *Victor Carvalho dos Santos** e *Domingos D'Oliveira Cardoso***

Resumo

Este trabalho apresenta metodologia de cálculo de correntes induzidas no corpo humano eletricamente isolado do solo por calçado de sola de borracha, por asfalto ou por camada de concreto, pela ação de campo elétrico de linha de transmissão de circuito trifásico horizontal de energia elétrica em alta tensão.

Palavras-chave

Campo elétrico de linha de transmissão; corrente induzida; radiação não ionizante.

Introdução

A corrente induzida no corpo humano é o único mecanismo bem estabelecido de interação de campos de 60 Hz com tecidos biológicos.^[1] Em 1995, o formalismo teórico para análise da solução de correntes induzidas em condutores cruzados eletricamente longos e finos de raios iguais^[3] foi adaptado ao corpo humano^{[2][4]} modelado como condutores cruzados (corpo-cabeça e braços), de comprimentos eletricamente muito curtos e de raios diferentes.

O desenvolvimento analítico de expressões de correntes induzidas em condutores cruzados e sua adequação ao corpo humano são apresentados na referência.^[5]

O objetivo deste trabalho é apresentar as equações para correntes induzidas no corpo humano eletricamente isolado do solo pelo campo elétrico de linha de transmissão de circuito trifásico horizontal de energia elétrica em alta tensão. A importância deste trabalho está em fornecer recurso teórico para avaliação das quantidades de correntes elétricas induzidas no corpo

* Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio 80, 22290-270 – Rio de Janeiro, Brasil

** Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rua Gen. Severiano 90, 22290-010 – Rio de Janeiro, Brasil

humano eletricamente isolado do solo a partir de campos de alta tensão.

Equações para correntes induzidas no corpo eletricamente isolado

Hipóteses para a condição corpo eletricamente isolado

A expressão corpo na condição *isolado* refere-se ao corpo humano com as solas dos pés isoladas do solo por calçado com sola de borracha, por asfalto ou por camada de concreto.

Considerando o corpo humano na condição em pé, isolado do solo pelo calçado ou outro tipo qualquer de material isolante, com os braços elevados em ângulos diferentes, α e β , entre o braço direito e o corpo e entre o braço esquerdo e o corpo, respectivamente, é estabelecido o modelo da figura 1, com referencial $z = 0$ nos pés.

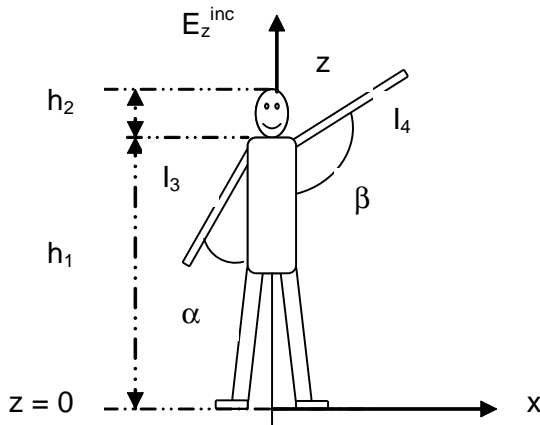


Figura 1 – Modelo de corpo de altura $h = h_1 + h_2$, em pé, isolado do solo; braços de comprimento $l_1 = l_2 = l$, elevados em ângulos α e β com o corpo.

A corrente no corpo é $I_1(z)$, $0 \leq z \leq h_1$, a corrente no pescoço e cabeça é $I_2(z)$, $h_1 \leq z \leq h_1 + h_2$ e as correntes nos braços direito e esquerdo são $I_3(x)$, $-l_1 \leq x \leq 0$, e $I_4(x)$, $0 \leq x \leq l_2$, respectivamente. E_z^{inc} é o campo elétrico gerado pela linha de transmissão de energia elétrica.

O desenvolvimento das equações das correntes induzidas no corpo humano na condição *isolado* é feito a partir da generalização das expressões induzidas no corpo na condição *aterrado*.^[7] Quando as solas dos pés estão isoladas do solo por calçado com sola de borracha, por asfalto ou por camada de concreto, as equações da condição corpo *aterrado*^[7] podem ser adaptadas para a condição corpo *isolado* pela inclusão de impedância de acoplamento entre o corpo e o solo, modificando a aproximação de corpo curto-circuitado ao solo da condição *aterrado*^[7] para a condição corpo *isolado*, resultando condições de junção e de contorno específicas da condição *isolado*.

Considerando a diferença de potencial V em $z = 0$, gerada na sola dos pés em função da corrente induzida no corpo e das impedâncias, pode-se escrever:

$$V = -[I_1(0)]_A \frac{Z_0 \cdot Z_L}{Z_0 + Z_L} \quad (1)$$

onde $[I_1(0)]_A$ é a corrente nos pés na condição aterrado, dada pela equação 29 da referência^[7] para $x = 0$. O subscrito “A” identifica a corrente na condição aterrado; Z_0 é a impedância do corpo com os braços elevados num ângulo qualquer e Z_L , a impedância de acoplamento entre o corpo e o solo, dada pela expressão

$$Z_L = \frac{-j}{\omega C_0} \quad (2a)$$

$$C_0 = \frac{A_0 \epsilon_r \epsilon_0}{d} \quad (2b)$$

onde $\omega = 2\pi f$, C_0 é a capacitância entre a sola dos pés e sua imagem no solo, A_0 , a área das solas dos pés, ϵ_r , a permissividade relativa da camada do material entre a sola dos pés e a terra, ϵ_0 , a permissividade relativa do ar, d , a espessura da camada isolante e sua imagem. A frequência f da corrente induzida é 60 Hz.

Como as correntes induzidas pelo campo elétrico incidente E_z^{inc} e as correntes geradas pela ddp V são mutuamente independentes. As correntes induzidas na condição corpo aterrado, equações 1 da referência^[7] são generalizadas para incluir os parâmetros de isolamento^[2] com um subscrito "v" indicando as correntes induzidas, na condição corpo aterrado, acrescidas das geradas pela tensão V .

$$[I_1(z)]_v = A_v [c_1' \cos kz + 1/2 V \sin kz] \quad 0 \leq z \leq h_1 \quad (3a)$$

$$[I_2(z)]_v = A_v [c_2' \cos kz + c_2'' \sin kz] \quad h_1 \leq z \leq h = h_1 + h_2 \quad (3b)$$

$$[I_3(x)]_v = A_v C [c_3' \cos kx + c_3'' \sin kx] \quad l_1 \leq x \leq 0 \quad (3c)$$

$$[I_4(x)]_v = A_v C [c_4' \cos kx + c_4'' \sin kx] \quad 0 \leq x \leq l_2 \quad (3d)$$

Para o corpo aterrado,^[7] a condição de contorno para a corrente na extremidade dos pés, em virtude da circunstância de curto-circuito, estabelece o coeficiente $c_1'' = 0$. Para o corpo isolado, este coeficiente é estabelecido em função da ddp V gerada na camada isolante. A equação 3a origina-se da equação 1a da referência,^[7] pela inclusão da impedância de isolamento que modifica a condição de contorno para a condição isolado.^[2] Esta condição de contorno traduz-se na existência do coeficiente

$$c_1'' = 1/2V \quad (4)$$

As cargas por unidade de comprimento são:

$$q(z) = \frac{dl(z)}{dz} \quad (5a)$$

$$q(x) = \frac{dl(x)}{dx} \quad (5b)$$

Aplicando as equações 5 às equações 3, resulta

$$[q_1(z)]_v = A_v' [-c_1' \sin kz + 1/2 V \cos kz] \quad (6a)$$

$$[q_2(z)]_v = A_v' [-c_2' \sin kz + c_2' \cos kz] \quad (6b)$$

$$[q_3(x)]_v = A_v' C [-c_3' \sin kx + c_3' \cos kx] \quad (6c)$$

$$[q_4(x)]_v = A_v' C [-c_4' \sin kx + c_4' \cos kx] \quad (6d)$$

onde,

$$A_v = -j \frac{4\pi}{\zeta_0 \Psi_h} \quad (7a)$$

$$dA_v/dz = A_v' = \frac{jA_v}{c} \quad (7b)$$

$$C = \frac{\Psi_h}{\Psi_l} \quad (7c)$$

$$\Psi_h = 2 \ln(2h/a_h) - 3 \quad (7d)$$

$$\Psi_l = 2 \ln(2l/a) - 3 \quad (7e)$$

$\zeta_0 = 120\pi \Omega$ é o valor da impedância do espaço livre; $c = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo; a_h é o raio médio do corpo; a_l , o raio médio dos braços; e C , o parâmetro de adequação do modelo de condutores cruzados para o caso do corpo humano.^[2]

Determinação dos coeficientes das condições de junção e de contorno

A condição de continuidade para as correntes na junção são

$$I_1(h_1) - I_2(h_1) + I_3(0) - I_4(0) = 0 \quad (8)$$

As condições de continuidade para as cargas na junção são

$$q_1(h_1) = q_2(h_1) = \frac{q_3(0)}{C} = \frac{q_4(0)}{C} \quad (9)$$

As condições de contorno para as correntes nas extremidades do corpo são

$$I_2(h) = I_3(-l_1) = I_4(l_2) = 0 \quad (10)$$

Aplicando as condições da equação 9 às equações 3, resulta

$$q_1(h_1) = A_v' [-c_1' \operatorname{sen} kh_1 + 1/2V \operatorname{cos} kh_1] \quad (11a)$$

$$q_2(h_1) = A_v' [-c_2' \operatorname{sen} kh_1 + c_2'' \operatorname{cos} kh_1] \quad (11b)$$

$$q_3(0) = A_v' C [c_3' \cdot 0 + c_3'' \cdot 1] \quad (11c)$$

$$q_4(0) = A_v' C [c_4' \cdot 0 + c_4'' \cdot 1] \quad (11d)$$

Substituindo as equações 11 na equação 9, resulta

$$-c_1' \operatorname{sen} kh_1 + 1/2V \operatorname{cos} kh_1 = -c_2' \operatorname{sen} kh_1 + c_2'' \operatorname{cos} kh_1 = c_3''' = c_4''' \quad (12a)$$

$$c_1' = c_2' + (1/2V - c_2''') \operatorname{cotg} kh_1 \quad (12b)$$

Aplicando as condições da equação 10 às equações 3, resulta

$$c_2' = -c_2'' \operatorname{tg} kh \quad (13)$$

$$c_3' = c_3'' \operatorname{tg} kl_1 \quad (14)$$

$$c_4' = -c_4'' \operatorname{tg} kl_2 = -c_3''' \operatorname{tg} kl_2 \quad (15)$$

Substituindo a equação 13 na equação 12b, resulta

$$c_1' = -c_2'' \left(\frac{\operatorname{cos} kh_2}{\operatorname{cos} kh \cdot \operatorname{sen} kh_1} \right) + 1/2V \operatorname{cotg} kh_1 \quad (16)$$

Substituindo a equação 13 na equação 12a, resulta

$$c_3''' = c_4''' = c_2''' \left(\frac{\operatorname{cos} kh_2}{\operatorname{cos} kh} \right) \quad (17)$$

Aplicando a condição de junção para correntes, equação 8, às equações 3, resulta

$$[I_1(h_1)]_v = A_v [c_1' \operatorname{cos} kh_1 + 1/2V \operatorname{sen} kh_1] \quad (18a)$$

$$[I_2(h_1)]_v = A_v [c_2' \operatorname{cos} kh_1 + c_2'' \operatorname{sen} kh_1] \quad (18b)$$

$$[I_3(0)]_v = A_v C [c_3' \operatorname{cos} 0 + c_3'' \operatorname{sen} 0] \quad (18c)$$

$$[I_4(0)]_v = A_v C [c_4' \operatorname{cos} 0 + c_4'' \operatorname{sen} 0] \quad (18d)$$

Substituindo as equações 3-18 na equação 8, resulta

$$[c_1' \operatorname{cos} kh_1 + 1/2V \operatorname{sen} kh_1] - [c_2' \operatorname{cos} kh_1 + c_2'' \operatorname{sen} kh_1] + [C \cdot c_3'] - [C \cdot c_4'] = 0$$

$$(c_1' - c_2') \operatorname{cos} kh_1 + (1/2V - c_2''') \operatorname{sen} kh_1 + C \cdot c_3''' (\operatorname{tg} kl_1 + \operatorname{tg} kl_2) = 0 \quad (19)$$

Substituindo as equações 13, 14 e 15 na equação 19, para $l_1 = l_2 = l$, resulta

$$c_2''' = \frac{V}{2} \left(\frac{\operatorname{cos} kh}{\operatorname{cos} kh - 2C \operatorname{cos} kh_2 \operatorname{sen} kh_1 \operatorname{tg} k} \right) \quad (20)$$

designando,

$$Q = \operatorname{cos} kh_2 \operatorname{sen} kh_1 \operatorname{tg} k \quad (21)$$

$$W = \operatorname{cos} kh - 2CQ \quad (22)$$

Substituindo a equação 22 na equação 20, resulta

$$c_2''' = \frac{V}{2} \left(\frac{\operatorname{cos} kh}{W} \right) \quad (23)$$

Substituindo a equação 23 na equação 16, resulta

$$c_1' = \frac{V}{2 \operatorname{sen} kh_1} \cdot \left(\operatorname{cos} kh_1 - \frac{\operatorname{cos} kh_2}{W} \right) \quad (24)$$

Substituindo a equação 23 na equação 13, resulta

$$c_2' = -\frac{V}{2} \frac{\operatorname{sen} kh}{W} \quad (25)$$

Determinação das equações das correntes associadas às impedâncias Z_0 E Z_L , e induzidas no corpo, na cabeça e nos braços

As equações completas na condição corpo *isolado* consistem da soma das seguintes equações:

- a) equações das correntes induzidas para a condição corpo *aterrado*, equações 29 a 32;^[7]
- b) equações das correntes associadas às impedâncias, do corpo, Z_0 , e do isolamento, Z_L , que incluem as equações das correntes induzidas pelo campo elétrico incidente e as geradas pela ddp, V.

Determinação da equação de I_1

Substituindo c_1' , equação 24, na equação 3a, de I_1 , resulta

$$[I_1(z)]_v = \frac{VA_v}{2W} \left(W[\cot gkh_1 \cdot \cos kz + \text{sen} kz] - \frac{\cos kh_2 \cos kz}{\text{sen} kh_1} \right) \quad (26)$$

Substituindo W, equação 22, eliminando $h_2 = h - h_1$, na equação 26, e após manipulações algébricas^[6] e utilizando a expressão de Q, equação 21, resulta

$$[I_1(z)]_v = - \frac{VA_v}{2W} [\text{sen} k(h-z) + 2C \cdot \cos k(h_1 - z) \cdot \cos kh_2 \cdot \text{tg} k l] \quad (27)$$

Determinação da equação de I_2

Substituindo c_2' , equação 13 e c_2'' , equação 23 na equação 3b, de I_2 , resulta

$$[I_2(z)]_v = - \frac{A_v V}{2W} [\text{sen} k(h - z)] \quad (28)$$

Determinação da equação de I_3

Substituindo c_3' , equação 14, c_3'' , equação 17 e c_3''' , equação 23, na equação 3c, de I_3 , resulta

$$[I_3(x)]_v = \frac{A_v VC}{2W} \left[\frac{\cosh h_2 \cdot \text{sen} k(I_1 + x)}{\cos k l_1} \right] \quad (29)$$

Determinação da equação de I_4

Substituindo c_4' , equação 15, c_4'' , equação 17 e c_4''' , equação 23, na equação 3d, de I_4 , resulta

$$[I_4(x)]_v = - \frac{A_v VC}{2W} \left[\frac{\cosh h_2 \cdot \text{sen} k(I_2 - x)}{\cos k l_2} \right] \quad (30)$$

Aplicação das aproximações das correntes associadas as impedâncias Z_0 E Z_L para o corpo humano modelado como condutores cruzados

Aproximações de comprimentos eletricamente muito curtos, $kh \ll 1$ e $kl \ll 1$:

$$kh \ll 1, kl \ll 1 \quad (31a)$$

$$l_1 = l_2 = l \quad (31b)$$

$$\text{sen} kh \approx kh, \text{sen} kl \approx kl \quad (31c)$$

$$\text{tg} k h \approx kh, \text{tg} k l \approx kl \quad (31d)$$

$$\cos kh \approx 1, \cos kl \approx 1 \quad (31e)$$

$$\text{sen}^2 kh \approx k^2 h^2, \text{sen}^2 kl \approx k^2 l^2 \quad (31f)$$

$$k = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad (31g)$$

Aplicando as aproximações das equações 31 à equação 22, de W, resulta

$$W = 1 - 2C \cdot k^2 \cdot h_1 \cdot l \approx 1 \quad (32)$$

Determinação da equação aproximada da corrente I_1

Usando as aproximações das equações 31 e as constantes, equações 7 na equação 27, de I_1 , resulta

$$[I_1(z)]_v = j \frac{2\pi V k}{\zeta_0 \Psi_h} [(h - z) + 2C \cdot l] \quad (33)$$

A impedância vista por V é $Z_0 = V \cdot [I_1(0)]_V$.

Fazendo $z = 0$ na equações 33, resulta

$$[I_1(0)]_V = \frac{V}{Z_0} = j \frac{2\pi V k}{\zeta_0 \Psi_h} [h + 2C \cdot l] \quad (34)$$

$$Z_0 = -j \frac{\zeta_0 \cdot \Psi_h}{2\pi k(h + 2C \cdot l)} \quad (35)$$

Substituindo Z_0 , equação 35, na equação 1, resulta

$$V = - [I_1(0)]_A \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[-j \frac{\zeta_0 \cdot \Psi_h}{2\pi k(h + 2C \cdot l)} \right] \quad (36)$$

Substituindo V, equação 36, na equação 33, resulta

$$[I_1(z)]_V = - [I_1(0)]_E \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[\frac{h - z + 2C \cdot l}{h + 2C \cdot l} \right] \quad (37)$$

Determinação da equação aproximada da corrente I_2

Usando as aproximações das equações 31 e substituindo V, equação 36 e $A\sqrt{2}$, equação 7a na equação 28 de I_2 , resulta

$$[I_2(z)]_V = - [I_1(0)]_A \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[\frac{h - z}{h + 2C \cdot l} \right] \quad (38)$$

Determinação da equação aproximada da corrente I_3

Usando as aproximações das equações 31 e substituindo V, equação 36 na equação, de I_3 , resulta

$$[I_3(x)]_V = [I_1(0)]_E \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[\frac{C(l + x)}{h + 2C \cdot l} \right] \quad (39)$$

Determinação da equação aproximada da corrente I_4

Usando as aproximações das equações 31 e substituindo W, equação 32 na equação 30 de I_4 , resulta

$$[I_4(x)]_V = - [I_1(0)]_E \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[\frac{C(l - x)}{h + 2C \cdot l} \right] \quad (40)$$

Conjunto das equações aproximadas das correntes axiais associadas às impedâncias Z_0 e Z_L , e induzidas no corpo na condição aterrado

As expressões finais para correntes, na condição corpo isolado, por causa de um valor finito de Z_L são:

$$[I_1(z)]_V = - [I_1(0)]_E \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[\frac{h - z + 2C \cdot l}{h + 2C \cdot l} \right] \quad (41a)$$

$$0 \leq z \leq h_1$$

$$[I_2(z)]_V = - [I_1(0)]_E \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[\frac{h - z}{h + 2C \cdot l} \right] \quad (41b)$$

$$h_1 \leq z \leq h$$

$$[I_3(x)]_V = [I_1(0)]_E \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[\frac{C(l + x)}{h + 2C \cdot l} \right] \quad (41c)$$

$$-1 \leq x \leq 0$$

$$[I_4(x)]_V = - [I_1(0)]_E \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left[\frac{C(l - x)}{h + 2C \cdot l} \right] \quad (41d)$$

$$0 \leq x \leq l$$

Equações completas das correntes para a condição corpo isolado

Como as equações completas para a condição corpo *isolado* consistem da soma das equações das correntes induzidas para a condição corpo *aterrado*, equações 29 a 32, e das equações das correntes associadas às impedâncias do corpo Z_0 , equações 41, e à impedância de isolamento Z_L , é necessário obter o termo $[I_1(0)]_A$, da equação de $I_1(z)$ para $z = 0$ na condição corpo *aterrado*.

Para a condição corpo *aterrado*,^[7] tem-se:

$$[I_1(0)]_A = - \frac{Ak^2 h^2}{2} \left\{ 1 + C \left(\frac{4h_1 l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \right\} \quad (42)$$

Substituindo a equação 42 nas equações 41, resulta

$$[I_1(z)]_v = \frac{Ak^2h^2}{2} \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \right) \left(\frac{h-z+2C.l}{h+2C.l} \right) \cdot \left\{ 1 + C \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \right\} \quad (43a)$$

$$[I_2(z)]_v = \frac{Ak^2h^2}{2} \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \right) \left(\frac{h-z}{h+2C.l} \right) \cdot \left\{ 1 + C \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \right\} \quad (43b)$$

$$[I_3(x)]_v = - \frac{Ak^2h^2}{2} \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \right) \left(\frac{C[l+x]}{h+2C.l} \right) \cdot \left\{ 1 + C \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \right\} \quad (43c)$$

$$[I_4(x)]_v = \frac{Ak^2h^2}{2} \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \right) \left(\frac{C[l-x]}{h+2C.l} \right) \cdot \left\{ 1 + C \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \right\} \quad (43d)$$

Equação completa da corrente I₁

Somando a equação 43a com a equação 29 de I₁, da condição corpo aterrado, e considerando

$$\frac{Ak^2h^2}{2} = \frac{-j2\pi kh^2 E_Z^{inc}}{\zeta_0 \cdot \Psi_h} \quad [2] \text{ resulta}$$

$$I_1(z) = j \frac{2\pi kh^2 E_Z^{inc}}{\zeta_0 \cdot \Psi_h} \left\{ \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{h-z+2C.l}{h+2C.l} \right) \right\} + C \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \left[1 - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{h-z+2C.l}{h+2C.l} \right) \right] \quad (44)$$

Equação completa da corrente I₂

Somando a equação 43b com a equação 30 de I₂, da condição corpo aterrado, resulta

$$I_2(z) = \frac{j2\pi kh^2 E_Z^{inc}}{\zeta_0 \cdot \Psi_h} \left\{ \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{h-z}{h+2C.l} \right) \right\} + C \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) [k^2 h_1 (h-z) - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{h-z}{h+2C.l} \right)] \quad (45)$$

Equação completa da corrente I₃

Somando a equação 44c com a equação 31 de I₃, da condição corpo aterrado, resulta

$$I_3(x) = -j \frac{2\pi kh^2 E_Z^{inc}}{\zeta_0 \cdot \Psi_l} \left\{ \frac{2h_1(l+x)}{h^2} - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{l+x}{h+2C.l} \right) \right\} - \frac{(l^2 - x^2)}{h^2} \cos \alpha - C \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \right) \left(\frac{l+x}{h+2C.l} \right) \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \quad (46)$$

Equação completa da corrente I₄

Somando a equação 44d com a equação 32 de I₄, da condição corpo aterrado, resulta,

$$I_4(x) = j \frac{2\pi kh^2 E_Z^{inc}}{\zeta_0 \cdot \Psi_l} \left\{ \frac{2h_1(l-x)}{h^2} - \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \right) \left(\frac{l-x}{h+2C.l} \right) - \left(\frac{l^2 - x^2}{h^2} \right) \cos \beta - C \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \right) \left(\frac{l-x}{h+2C.l} \right) \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \right\} \quad (47)$$

Conjunto das equações completas para a condição corpo isolado

$$I_1(z) = j \frac{kh^2 E_Z^{inc}}{60 \cdot \Psi_h} \left\{ \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{h-z+2C.l}{h+2C.l} \right) \right\} + C \left(\frac{4h_1l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2} \right) \left[1 - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{h-z+2C.l}{h+2C.l} \right) \right] \quad (48)$$

$$0 \leq z \leq h_1$$

$$I_2(z) = j \frac{kh^2 E_z^{inc}}{60 \cdot \psi_h} \left\{ \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{h-z}{h+2C.l}\right) + C \left(\frac{4h_1 l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2}\right) [k^2 h_1 (h-z) - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{h-z}{h+2C.l}\right)] \right\} \quad (49)$$

$$h_1 \leq z \leq h_1 + h_2 = h$$

$$I_3(x) = -j \frac{kh^2 E_z^{inc}}{60 \cdot \psi_l} \left\{ \frac{2h_1(l+x)}{h^2} - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{l+x}{h+2C.l}\right) - \left(\frac{l^2 - x^2}{h^2}\right) \cos \alpha - C \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L}\right) \left(\frac{l+x}{h+2C.l}\right) \left(\frac{4h_1 l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2}\right) \right\} \quad (50)$$

$$-l \leq x \leq 0$$

$$I_4(x) = j \frac{kh^2 E_z^{inc}}{60 \cdot \psi_l} \left\{ \frac{2h_1(l-x)}{h^2} - \frac{Z_L}{Z_0 + Z_L} \left(\frac{l-x}{h+2C.l}\right) - \left(\frac{l^2 - x^2}{h^2}\right) \cos \beta - C \left(\frac{Z_L}{Z_0 + Z_L}\right) \left(\frac{l-x}{h+2C.l}\right) \left(\frac{4h_1 l - 2l^2 [\cos \alpha + \cos \beta]}{h^2}\right) \right\} \quad (51)$$

$$0 \leq x \leq l$$

Resultados de uma aplicação

Especificações da linha de transmissão e do corpo humano

Os resultados numéricos são obtidos para linha de transmissão de energia elétrica com as especificações: 1 circuito trifásico na configuração horizontal; Frequência – 60 Hz; Tensão de linha – 100 kV; Corrente de linha – 300 A; Distância entre condutores – $L = 3$ m; Altura do condutor central – $H = 15$ m.

Para determinação das correntes induzidas I_1, I_2, I_3 e I_4 , é necessário o valor do campo elétrico incidente local, E_z^{inc} . Para determinar E_z^{inc} , é necessária a corrente de linha. Para determinar a corrente de linha são necessárias a tensão de linha e a impedância característica da linha. Os procedimentos para determinação de E_z^{inc} constam da referência.^[5]

Os pontos do corpo humano típico, de 1,75m de altura, relevantes para comparações de resultados que determinam coordenadas específicas nas tabelas e gráficos são:

- Para a corrente induzida no corpo, I_1 : região dos pés – $z = 0$ m; região do coração – $z = 1,30$ m.
- Para a corrente induzida na cabeça e pescoço, I_2 : região do pescoço – $z = 1,40$ m.
- Para a corrente induzida nos braços direito e esquerdo, I_3 e I_4 , respectivamente: na região da junção com o corpo – $x = 0$ m; na região do braço – $x = 0,3$ m.

As regiões do coração, do pescoço e dos braços foram escolhidas pelas seguintes razões: o coração, localizado numa região do corpo, tórax, de convergência de correntes; o pescoço, por concentrar as correntes na direção da cabeça, resultando alta densidade de corrente; e os braços, por se comportarem como antenas, “distribuindo” as correntes para corpo.

Resultados numéricos e gráficos das correntes para o corpo isolado do solo

Corrente induzida no corpo, I_1

A tabela 1 e o gráfico da figura 2 mostram resultados da corrente I_1 , em $Z = 1,3$ m, região do coração.

Tabela 1 – Valores da corrente induzida no corpo I_p , em mA, na condição corpo isolado.

$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	102	109	127	151	175	193	199
30°	109	115	133	157	182	199	206
60°	127	133	151	175	199	217	224
90°	151	157	175	199	224	241	248
120°	175	182	199	224	248	266	272
150°	193	199	217	241	266	283	290
180°	199	206	224	248	272	290	297

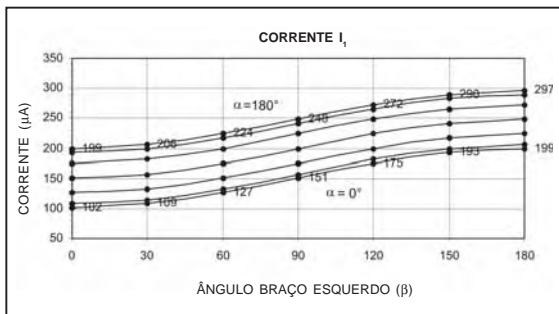


Figura 2 – Gráficos das correntes induzidas no corpo, I_1 , em $z = 1,3$ m, condição corpo isolado.

Corrente induzida na cabeça e pescoço, I_2

A tabela 2 e o gráfico da figura 3 mostram os resultados da corrente I_2 , em $Z = 1,4$ m, região do pescoço.

Tabela 2 – Valores da corrente I_2 em mA, na condição corpo isolado.

$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	51,4	50,9	49,5	47,7	45,8	44,4	44
30°	50,9	50,4	49,8	47,2	45,2	44	43,4
60°	49,5	49	47,7	45,8	44	42,6	42,1
90°	47,7	47,2	45,8	44	42,1	40,7	40,2
120°	45,8	45,3	44	42,1	40,2	38,9	38,4
150°	44,4	44	42,6	40,7	38,9	37,5	37
180°	44	43,5	42,1	40,2	38,4	37	36,5

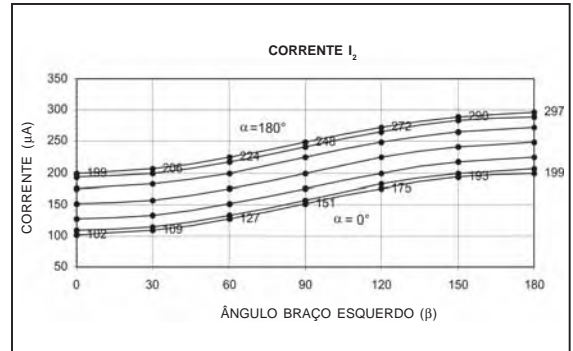


Figura 3 – Gráficos das correntes induzidas no pescoço, I_2 , em $z = 1,4$ m, condição corpo isolado.

Corrente induzida no braço direito, I_3

A tabela 3 e o gráfico da figura 4 mostram os resultados da corrente I_3 , em $X = -0,3$ m, região do braço direito. Os sinais negativos na tabela 3 indicam o sentido real da corrente no braço direito, contrário ao estabelecido na condição de contorno, equação 10, direção +x. Os resultados utilizados na obtenção do gráfico da figura 4 são os da tabela 3, multiplicados por (-1), em virtude da compatibilidade com a orientação +x, da condição de contorno.

Tabela 3 – Valores da corrente I_3 em mA, na condição isolado

$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	-25,6	-25	-23,3	-20,9	-18,6	-19,9	-16,3
30°	-28,9	-28,3	-26,6	-24,2	-21,9	-20,2	-19,6
60°	-37,9	-37,3	-35,6	-33,3	-30,9	-29,2	-28,6
90°	-50,2	-49,6	-47,9	-45,6	-43,3	-41,6	-40,9
120°	-62,5	-61,9	-60,2	-57,9	-55,6	-53,9	-53,3
150°	-71,6	-71	-69,3	-66,9	-64,6	-62,9	-62,3
180°	-74,9	-74,3	-72,6	-70,3	-67,9	-66,2	-65,6

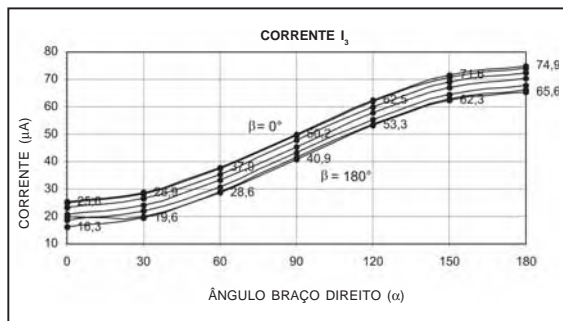


Figura 4 – Gráficos das correntes induzidas no braço direito, I_3 , $x = -0,3$ m, condição corpo *isolado*.

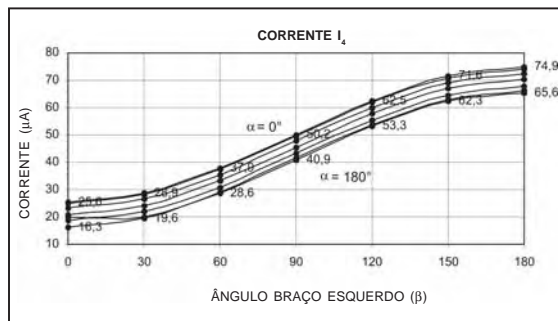


Figura 5 – Gráficos das correntes induzidas no braço esquerdo, I_4 , $x = 0,3$ m, na condição corpo *isolado*.

Corrente induzida no braço esquerdo, I_4

A tabela 4 e o gráfico da figura 5 mostram os resultados da corrente I_4 , em $X = 0,3$ m, região do braço esquerdo.

Tabela 4 – Valores da corrente I_4 em mA, n a condição corpo *isolado*

$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	25,6	28,9	37,9	50,2	62,5	71,6	74,9
30°	25	28,3	37,3	49,6	61,9	71	74,3
60°	23,3	26,6	35,6	47,9	60,2	69,3	72,6
90°	20,9	24,2	33,3	45,6	57,9	66,9	70,3
120°	18,6	21,9	30,9	43,3	55,6	64,6	67,9
150°	16,9	20,2	29,2	41,6	53,9	62,9	66,2
180°	16,3	19,6	28,6	40,9	53,3	62,3	65,6

Comentários

A situação mais crítica para a corrente no corpo corresponde ao valor de $I_1 = 297$ A, tabela 1, ocorre para os braços totalmente elevados, $\alpha = \beta = 180^\circ$, para a região do coração, o que é esperado a partir do conhecido “poder das pontas”.

Para a corrente na cabeça, I_2 , a situação mais crítica ocorre quando os braços estão totalmente baixados, $\alpha = \beta = 0^\circ$ na tabela 2.

As condições $\alpha = 180^\circ$ ou $\beta = 180^\circ$ indicam elevação na vertical de cada um dos braços isoladamente, nestes casos os valores das correntes nos braços são iguais em valor absoluto, tabela 3, linha $\alpha = 180^\circ$ e tabela 4, coluna $\beta = 180^\circ$, o que é esperado a partir do fato de os braços funcionarem segundo o conceito do “poder das pontas”.

Referências

- [1] ICNIRP – Non Ionizing Radiation. Proceedings Third International Non-ionizing Radiation Workshop, Baden, Austria: 1996.
- [2] KING, Ronald W.P. Currents and electric fields induced in the human body. Gordon McKay Laboratory, Harvard University, Cambridge, Massachusetts: J. Appl. Phys. 81 (11), 1997.
- [3] KING, Ronald W.P.; WU, Tai T. Analysis of crossed wires in a plane-wave field. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, v. emc-17, nº 4, 1975.
- [4] _____. The complete electromagnetic field of a three-phase transmission line over the earth and its interaction with the human body. Gordon McKay Laboratory, Harvard University, Cambridge, Massachusetts: J Appl. Phys. 78 (2), 1995.
- [5] SOUZA, E.N.S. Correntes elétricas induzidas no corpo humano com braços elevados em ângulos diferentes, por campo elétrico. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro: 2003.
- [6] SOUZA, E.N.S; SANTOS, V.C. e CARDOSO, D.O. Equações das correntes axiais induzidas por campo elétrico de linha de alta tensão, no corpo humano na condição suspenso, com braços elevados em ângulos diferentes. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* (ISSN 0102-3542), v. XXIV – 2º Quadrimestre de 2007.
- [7] _____. Equações das correntes axiais induzidas por campo elétrico de linha de alta tensão, no corpo humano nas condições aterrado e com braços elevados em ângulos diferentes. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* (ISSN 0102-3542), v. XXV – 3º Quadrimestre de 2007.