

# Escalonamento das correntes induzidas no corpo humano com braços elevados em ângulos diferentes exposto a campo elétrico de linha de alta tensão, por tipo de corrente e por condição do corpo

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

## RESUMO

Este trabalho apresenta comparação entre os resultados de correntes induzidas no corpo humano com braços elevados em ângulos diferentes por campo elétrico de linha de alta tensão, de circuito trifásico horizontal de energia elétrica, nas condições suspenso<sup>1,2</sup>, isolado do solo<sup>1,3</sup> e aterrado<sup>1,4</sup>. A finalidade desta comparação é estabelecer o escalonamento dos valores de corrente por tipo de corrente (tronco, pescoço, braços) e por condição do corpo.

## PALAVRAS-CHAVE

Campo elétrico de linha de transmissão; Corrente Induzida; Radiação não ionizante.

## INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o escalonamento, por tipo de corrente e por condição do corpo, entre os resultados das correntes induzidas no corpo humano, com braços elevados em ângulos diferentes, por campo elétrico de linha de alta tensão de circuito trifásico horizontal de energia elétrica, publicados na *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* no 2º quadrimestre de 2007 (condição corpo suspenso<sup>1,2</sup>), no 3º qua-

drimestre de 2007 (condição corpo isolado do solo<sup>1,3</sup>) e no 1º quadrimestre de 2008 (condição corpo aterrado<sup>1,4</sup>).

A Figura 1 apresenta esquematicamente as três condições de exposição.

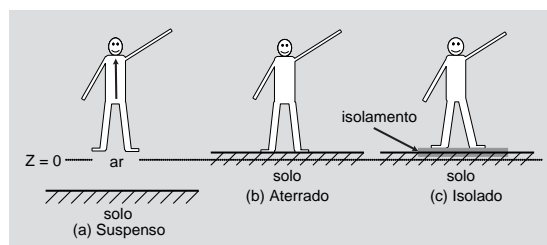


Figura 1 – Esquema comparativo das três condições, com referencial nos pés.

\* Instituto Militar de Engenharia.

\*\* Comissão Nacional de Energia Nuclear.

## Correntes induzidas

Os resultados publicados<sup>2,3,4</sup> segundo as condições do corpo (suspenso, isolado e aterrado) es-

tão organizados nas tabelas 1 a 4 segundo as correntes:  $I_1$ , no corpo,  $I_2$ , no pescoço (cabeça),  $I_3$ , no braço direito, e  $I_4$ , no braço esquerdo, respectivamente:

**Tabela 1 – Correntes induzidas no corpo  $I_1$  [ $\mu$ A] nas três condições**

<i>suspenso</i>	$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	0°	36,1	40,7	53,2	70,4	87,5	100	104
	30°	40,7	45,3	57,8	75	92,1	104	109
	60°	53,2	57,8	70,4	87,5	104	117	121
	90°	70,4	75	87,5	104	121	134	138
	120°	87,5	92,1	104	121	138	151	156
	150°	100	104	117	134	151	164	168
	180°	104	109	121	138	156	168	173
<i>isolado</i>	$\alpha \setminus \beta$	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
<i>aterrado</i>	$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	0°	185	195	220	254	288	313	322
	30°	195	204	229	263	297	322	331
	60°	220	229	254	288	322	347	356
	90°	254	263	288	322	356	381	390
	120°	288	297	322	356	390	415	424
	150°	313	322	347	381	415	440	449
	180°	322	331	356	390	424	449	458

**Tabela 2 – Correntes induzidas no pescoço (cabeça)  $I_2$  [ $\mu$ A] nas três condições**

<i>suspensa</i>	$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	0°	56	55	51	47	42	39	38
	30°	55	54	50	46	41	38	36
	60°	51	50	47	42	38	34	33
	90°	47	46	42	38	33	30	28
	120°	42	41	38	33	28	25	24
	150°	39	38	34	30	25	22	20
	180°	38	36	33	28	24	20	19
<i>isolado</i>	$\alpha \setminus \beta$	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
<i>aterrado</i>	$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	0°	67	67	67	67	67	67	67
	30°	67	67	67	67	67	67	67
	60°	67	67	67	67	67	67	67
	90°	67	67	67	67	67	67	67
	120°	67	67	67	67	67	67	67
	150°	67	67	67	67	67	67	67
	180°	67	67	67	67	67	67	67

**Tabela 3 – Correntes induzidas no braço direito  $I_3$  [ $\mu$ A] nas três condições**

<i>suspensa</i>	$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	0°	-3,4	-2,4	0,038	3,4	6,9	9,4	10,3
	30°	-6,4	-5,4	-2,9	0,47	3,9	6,4	7,3
	60°	-14,6	-13,6	-11,1	-7,7	-4,2	-1,7	-0,83
	90°	-25,8	-24,8	-22,3	-18,9	-15,4	-12,9	-12
	120°	-37	-36	-33,5	-30	-26,6	-24,1	-23,2
	150°	-45,2	-44,2	-41,7	-38,3	-34,9	-32,3	-31,4
	180°	-48,2	-47,3	-44,7	-41,3	-37,9	-35,3	-34,4
<i>isolado</i>	$\alpha \setminus \beta$	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
<i>aterrado</i>	$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	0°	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45
	30°	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49
	60°	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60
	90°	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74
	120°	-89	-89	-89	-89	-89	-89	-89
	150°	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
	180°	-103	-103	-103	-103	-103	-103	-103

**Tabela 4 – Correntes induzidas no braço esquerdo  $I_4$  [ $\mu$ A] nas três condições**

<i>suspensa</i>	$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	0°	3,4	6,4	14,6	25,8	37	45,2	48,2
	30°	2,4	5,4	13,6	24,8	36	44,2	47,3
	60°	-0,038	2,9	11,1	22,3	33,5	41,7	44,7
	90°	-3,4	-0,47	7,7	18,9	30,1	38,3	41,3
	120°	-6,9	-3,9	4,2	15,4	26,6	34,8	37,9
	150°	-9,4	-6,4	1,7	12,9	24,1	32,3	35,3
	180°	-10,3	-7,3	0,83	12	23,2	31,4	34,4
<i>isolado</i>	$\alpha \setminus \beta$	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
<i>aterrado</i>	$\alpha \setminus \beta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	0°	45	49	60	70	89	100	103
	30°	45	49	60	74	89	100	103
	60°	45	49	60	74	89	100	103
	90°	45	49	60	74	89	100	103
	120°	45	49	60	74	89	100	103
	150°	45	49	60	74	89	100	103
	180°	45	49	60	74	89	100	103

**Tabela 5 – Valores máximos das correntes induzidas no corpo nas três condições, em [μA]**

suspensão	α	β	
		0°	180°
	0°	$I_2 = 56$	$I_4 = 48,2$
	180°	$I_3 = 48,3$	$I_1 = 173$
isolado	α	β	
		0°	180°
	0°	$I_2 = 51,4$	$I_4 = 74,9$
	180°	$I_3 = 74,9$	$I_1 = 297$
aterrado	α	β	
		0°	180°
	0°	$I_2 = 67$	$I_4 = 103$
	180°	$I_3 = 103$	$I_1 = 458$

A tabela 5 mostra os valores máximos das correntes induzidas das tabelas 1 a 4, para valores particulares dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  nas três condições.

### Correntes no corpo, $I_1$

As situações mais críticas para as correntes no corpo, para a região do coração, correspondem aos valores  $I_1 = 173 \mu A$ , na condição suspensão,  $I_1 = 297 \mu A$ , na condição isolado, e  $I_1 = 458 \text{ mA}$ , na condição aterrado, e ocorrem para os braços totalmente elevados,  $\alpha = \beta = 180^\circ$ , o que é esperado a partir do conhecido “poder das pontas”

### Correntes no pescoço (cabeça), $I_2$

As situações mais críticas para as correntes na cabeça correspondem aos valores  $I_2 = 56 \mu A$ , na condição suspensão,  $I_2 = 51,4 \mu A$ , na condição isolado, e  $I_2 = 67 \mu A$ , na condição aterrado, e ocorrem para os braços totalmente abaixados,  $\alpha = \beta = 0^\circ$ .

O valor da corrente na cabeça e pescoço, de  $67 \mu A$ , constante ao longo das variações dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ , deve-se ao fato do valor da corrente  $I_2$  ser independente dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  na condição aterrado.

### Correntes nos braços $I_3$ e $I_4$

As situações extremas para as correntes nos braços correspondem aos valores  $I_3 = 48,3 \mu A$  e  $I_4 = 48,2 \mu A$ , na condição suspensão,  $I_3 = 74,9 \mu A$  e  $I_4 = 74,9 \mu A$ , na condição isolado, e  $I_3 = 103 \mu A$  e  $I_4 = 103 \mu A$ , na condição aterrado, e ocorrem para  $\alpha = 180^\circ$  e  $\beta = 0^\circ$ , ou  $\alpha = 0^\circ$  e  $\beta = 180^\circ$ , elevação na vertical de cada um dos braços separadamente, neste caso os valores das correntes

são muito próximos, e os braços funcionam também segundo o conceito do “poder das pontas”. No caso das correntes dos braços, são considerados somente os valores absolutos das correntes.

### Escalonamento dos máximos das correntes induzidas nas três condições

Os resultados da tabela 5 determinam um escalonamento para o conjunto dos valores das correntes  $I_n$ ,  $n = 1,2,3,4$ , expresso pela desigualdade da expressão (1), conforme valores reunidos na tabela 6:

$$I_{n \text{ suspensão}} < I_{n \text{ isolado}} < I_{n \text{ aterrado}} \quad (1)$$

**Tabela 6 – Escalonamento dos máximos das correntes induzidas nas três condições, em [μA] (suspensão / isolado / aterrado)**

α	β	
	0°	180°
0°	$I_2 = 56 / 51,4 / 67$	$I_4 = 48,2 / 74,9 / 103$
180°	$I_3 = 48,3 / 74,9 / 103$	$I_1 = 173 / 297 / 458$

## Validação em relação a outras pesquisas

### Validação em relação à fórmula empírica de Deno<sup>5</sup>

Um dos primeiros estudos de corrente induzida no corpo humano por campo elétrico de linha de transmissão de alta tensão estabeleceu a partir de critérios práticos uma expressão empírica para a corrente induzida de curto-circuito<sup>5</sup>, corpo aterrado eletricamente, conforme figura 2.

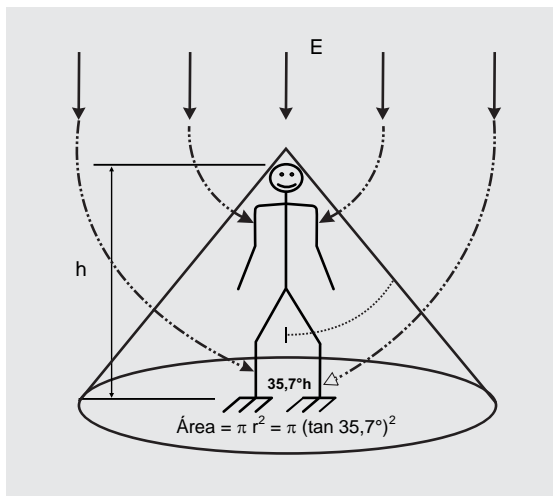


Figura 2 – Esquema de corpo humano aterrado exposto a campo elétrico<sup>5</sup>

A corrente de deslocamento por unidade de área, de Maxwell, é dada pela expressão (2):

$$\vec{I} = \omega \varepsilon \vec{E} \quad (2)$$

Para o corpo humano de altura  $h$  [m] em pé no solo com os braços ao lado do corpo, exposto a campo elétrico  $E$  [V/m] de frequência  $f$  [Hz], a corrente de curto-circuito  $I_{cc}$  [ $\mu$ A] através do corpo, é dada pela formulação empírica<sup>5</sup> expressa por

$$I_{cc} = (\omega \varepsilon E) \cdot (\pi h^2 \tan^2 35,7^\circ) \quad \text{ou} \\ I_{cc} = 5,4 \cdot 10^{-9} h^2 E \quad (3)$$

Em uma pessoa de 1,75m de altura, exposta a um campo elétrico de 10 kV/m (valor típico para linha de 100 a 700 kV), para a frequência de 60 Hz, resulta a corrente induzida  $I_{cc} = 165 \mu$ A.

Verifica-se como comparação na tabela 1, condição aterrado, que o valor da corrente induzida no corpo  $I_1$  na condição *aterrado* calculado a partir da dissertação<sup>1</sup>, nas mesmas condições do item anterior, é 185  $\mu$ A, para os braços totalmente baixados, e 458  $\mu$ A, para os braços totalmente elevados.

### Validação em relação ao caso de braços elevados em ângulos iguais

A determinação das correntes induzidas no corpo humano por campo elétrico, para ângulos diferentes entre o braço direito e o corpo  $\alpha$ , e o braço esquerdo e o corpo,  $\beta$ , é generalizada<sup>1</sup> em relação aos estudos<sup>9,10</sup> desenvolvidos para ângulos iguais,  $\theta$ . A validação mostra<sup>1</sup> resultados numéricos dos ângulos iguais<sup>10</sup> de elevação dos braços,  $\theta$ , como caso particular dos ângulos  $\alpha = \beta$ .

### Validação em relação a dosimetria numérica

Na comparação entre os resultados de correntes induzidas obtidos da literatura<sup>6,7,8,9</sup>, a maioria dos estudos de corrente induzida no corpo humano se refere à condição corpo eletricamente *aterrado*, de exposição a campos elétricos de 10 kV/m em 60 Hz e nas proximidades de linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão. A tabela 7 mostra os resultados de dosimetria numérica da literatura e da dissertação<sup>1</sup> que originou este estudo, para as mesmas condições: 60 Hz, 100 kV e  $\alpha = \beta = 0$ .

## CONCLUSÃO

As tabelas 6 e 8 são conclusivas no sentido que mostram o comportamento global dos valores das correntes pelo tipo de corrente (órgão do corpo) e pela condição do corpo.

**Tabela 7 – Resultados de correntes induzidas no pescoço, no tórax e no abdômen, em [ $\mu$ A], de dosimetria numérica e do modelo de condutores cruzados, para 60 Hz, 100 kV e  $\alpha = \beta = 0^\circ$ .**

Região do corpo	Dosimetria numérica				Modelo teórico <sup>1,9,10</sup> Condutores cruzados
	Kaune e Phillips <sup>6</sup>	Kaune e Forsythe <sup>7</sup>	Guy <i>et al</i> <sup>8</sup>	Kaune e Forsythe <sup>7</sup>	Dissertação <sup>1</sup> $\alpha = \beta = 0^\circ$
Pescoço	550	375	408	380	436
Tórax	190	260	* 479	* 393	300
Abdômen	250	330	379	370	291

\* Valores relatados para axilas, comparados com valores para altura equivalente, o tórax.

**Tabela 8 – Comportamento geral dos valores das correntes**

Condição	Corrente no corpo $I_1$	Corrente no pescoço $I_2$	Corrente no braço direito $I_3$	Corrente no braço esquerdo $I_4$
<i>SUSPENSO</i>	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços	O valor da corrente induzida <i>diminui</i> com a elevação dos braços	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços
<i>ISOLADO</i>	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços	O valor da corrente induzida <i>diminui</i> com a elevação dos braços	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços
<i>ATERRADO</i>	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços	O valor da corrente induzida <i>independe</i> da posição dos braços	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços	O valor da corrente induzida <i>umenta</i> com a elevação dos braços

## Referências

- 1 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.
- 2 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), Vol. XXIV – 2º Quadrimestre de 2007.
- 3 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 nas condições aterrado e com braços elevados em ângulos diferentes. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* (ISSN 0102-3542), Vol. XXIV – 3º Quadrimestre de 2007.
- 4 SOUZA, E.N.S.; Santos, V.C. e Cardoso, D.O. 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. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* (ISSN 0102-3542), Vol. XXV – 1º Quadrimestre de 2008.
- 5 DENO, D.W. Currents induced in the body by high voltage transmission lines electric field – measurement and calculation of distribution and dose. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol PAS-96, no. 5, 1977.
- 6 KAUNE, W.T., PHILLIPS R.D. *Comparison of the coupling of grounded humans, swine, and rats to vertical, 60 Hz electric fields*. *Bioelectromagnetics* 1:117-129, 1980.
- 7 KAUNE, W.T., FORSYTHE, W.C. *Current densities measured in human models exposed to 60 Hz electric fields*. *Passic Northwest Laboratory, Richland, Washington Bioelectromagnetics* 6:13-32, 1985.
- 8 GUY A.W., et al. *Determination of electric current distributions in animals and humans exposed to a uniform 60 Hz high-intensity electric field*. *Bioelectromagnetics* 3:47-71, 1982.
- 9 KING, Ronald W.P., WU, Tai T. *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.
- 10 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.