



UAlg/ISE

3^{as} Jornadas Tecnológicas de EEE

PERIGOS DA ELETRICIDADE

José Gonçalves

UAlg/ISE



1. INTRODUÇÃO

● O homem seria impune aos perigos da electricidade?

– Sim, se fosse de borracha ou de plástico (maleável) ...

– Mesmo assim, esses materiais deveriam ser de boa qualidade em **AT** (Alta Tensão).

● Mergulhando na realidade ...

“Já que a montanha não vem a Maomé, irá Maomé à montanha”,

do mal o menos, o homem, perante diversos perigos da electricidade, deve-se precaver, quando necessário, com **fatos, capacetes, viseiras, luvas, sapatos, ...**, de **material isolante**.



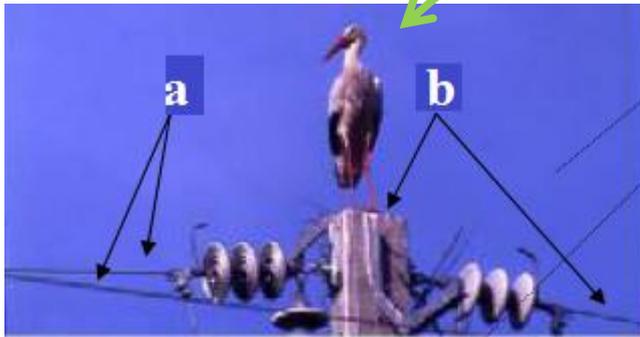
– De entre inúmeros exemplos, **Não esquecer:**

- Os pássaros apoiados nas linhas eléctricas, **sem isolamento**, não têm problemas (**todo o corpo está ao mesmo potencial**);

Fig. 1.1 – pássaros em cima de fios eléctricos.



- Idem para as **cegonhas**, **se não abrirem muito as asas**;



Cortesia: Estudo sobre o Impacte das Linhas Eléctricas de Média e Alta Tensão na Avifauna em Portugal (QUERCUS).

Fig. 1.2 – Cegonha num apoio, com elevado risco de Electrocussão;
•a) entre fases; •b) entre fase neutro no apoio.

- Não **urinar** dum ponto alto dum barreira para uma zona baixa, onde exista uma linha aérea, **a urina é boa condutora de eletricidade**;

- Na manutenção de linhas, existindo outras paralelas em tensão, estas devem ser shuntadas à terra nos troços em elaboração (**forças electromotrizes induzidas que podem ser fatais – para evitar, as linhas devem-se cruzar perpendicularmente**).

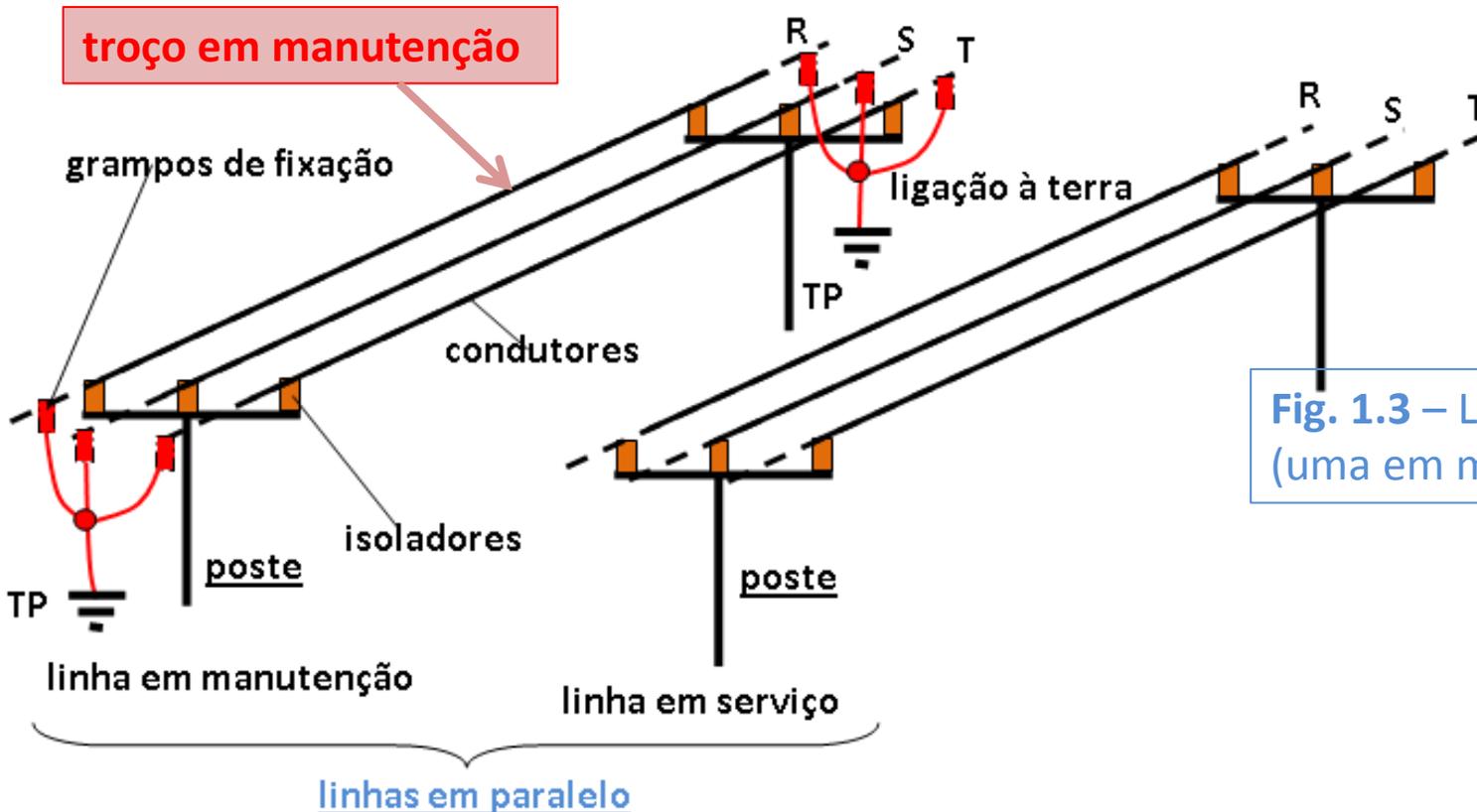


Fig. 1.3 – Linhas em paralelo (uma em manutenção).

• Quando há trovoada, não se deve permanecer debaixo das árvores, com a humidade formam-se cargas elétricas de sinal contrário ao das nuvens na vizinhança, o que facilita a descarga elétrica (**morte?**), mas a **estatística** nem sempre se verifica a **100 %**.

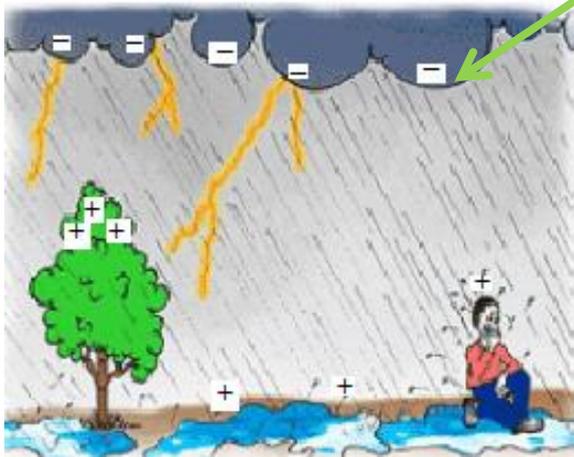


Fig. 1.4 – Quando há chuva e trovoada, não se deve permanecer debaixo das árvores.

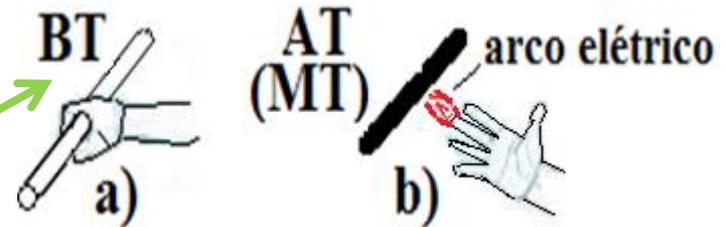


Fig. 1.5 –
a) BT a mão agarra o fio;
b) AT há arco elétrico antes da mão agarrar o fio.

• Por vezes a **AT** torna-se menos perigosa do que a **BT**.
 – Em **BT**, quando a mão retrai já está a agarrar o fio;
 – Em **AT**, quando a mão sente o efeito do arco, esta ao contrair-se não agarra o fio.

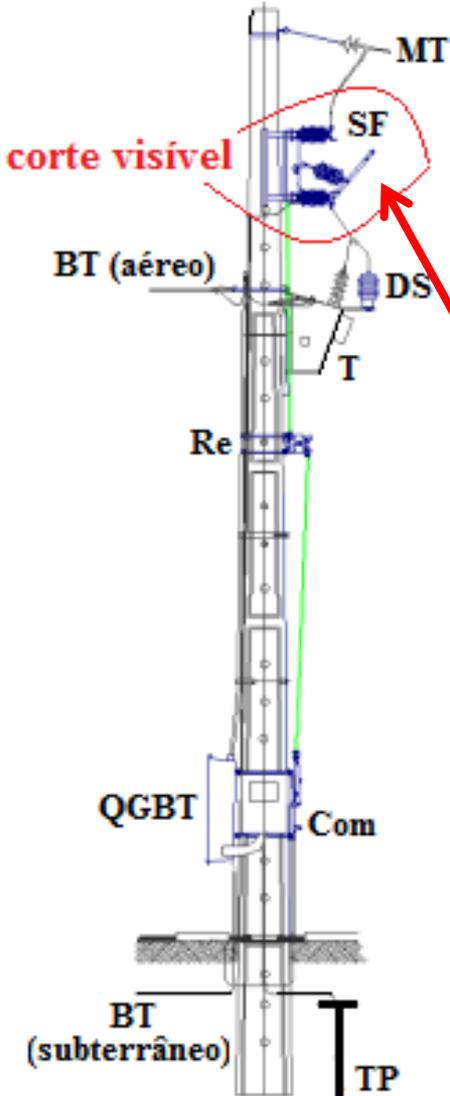
- Nunca atravessar uma linha de **MT**, ou de **AT**, com uma cana de pesca, de **fibra de carbono**, ao alto; pois entre a extremidade da cana e a linha pode-se formar um **arco eléctrico** que pode conduzir corrente através do indivíduo.

- Quando reparar avarias a jusante de um **PT**, ou na derivação de uma linha de **MT**, ou de **AT**, verificar se o **seccionar** está aberto (**CORTE VISÍVEL**).

Legenda:

MT – Média Tensão; **BT** – Baixa Tensão; **SF** – Seccionador com corte visível; **DS** – Descarregador de sobretensões;
T – Transformador de Potência; **Re** – Reenvio mecânico com fixação; **QGBT** – Quadro Geral de Baixa Tensão; **Com** – Punho de comando com fixação; **TP** – Terra de Proteção.

Fig. 1.6 – PT aéreo tipo AS.



• Num ambiente em que há cheiro a gás, nunca manobrar o interruptor.

• Num circuito de tomadas c/ terra, nunca interromper o condutor de terra, mesmo que se poupe alguns euros.

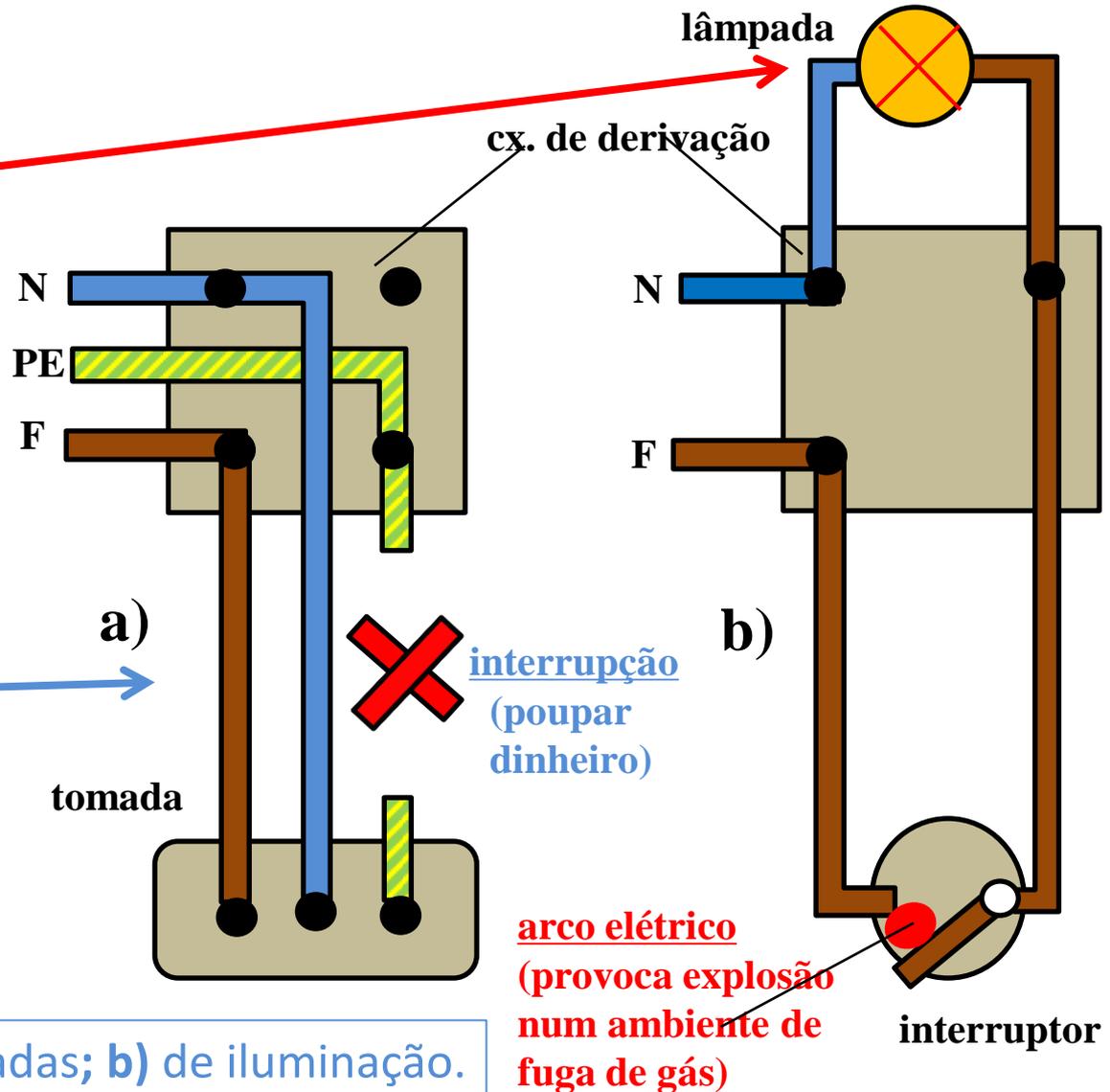


Fig. 1.7 – Circuitos: a) de tomadas; b) de iluminação.

2. SINALIZAÇÃO DOS PERIGOS

- Para sinalização de cabos elétricos, geralmente a **1 m** de profundidade, deve-se colocar acima **fita (ou malha) de plástico vermelha**;
- Nos passeios, o distribuidor sinaliza o cabo subterrâneo com **pequeno bloco de cimento** com inscrição “**MT**”, “**EDP**”, etc.;

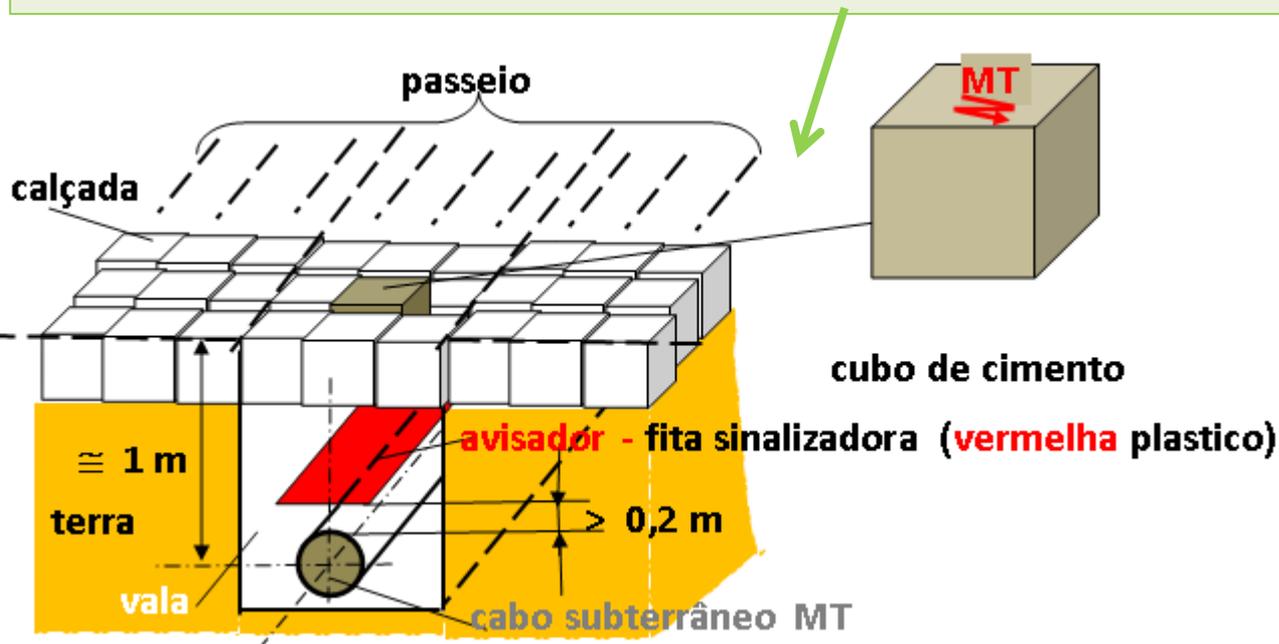


Fig. 2.1 – Sinalizações do cabo subterrâneo de MT.

2. SINALIZAÇÃO DE PERIGOS (Cont.)

- Os **armários de distribuição**, devem ter um dístico com o símbolo e a frase “**PERIGO DE MORTE**”.



Fig. 2.2 – Armário de distribuição para energia elétrica em BT.

- Nos **Postos de Transformação e Seccionamento (PTS)**, em alvenaria, devem existir **extintores**, à entrada das celas deve haver dísticos com símbolos e a frases “**PERIGO DE MORTE**”, uma placa com folhas informativas sobre “**OS PRIMEIROS SOCORROS**”.



–Este símbolo alerta a presença de “**tensão perigosa**”, com risco de descarga eléctrica.

2. SINALIZAÇÃO DE PERIGOS (Cont.)

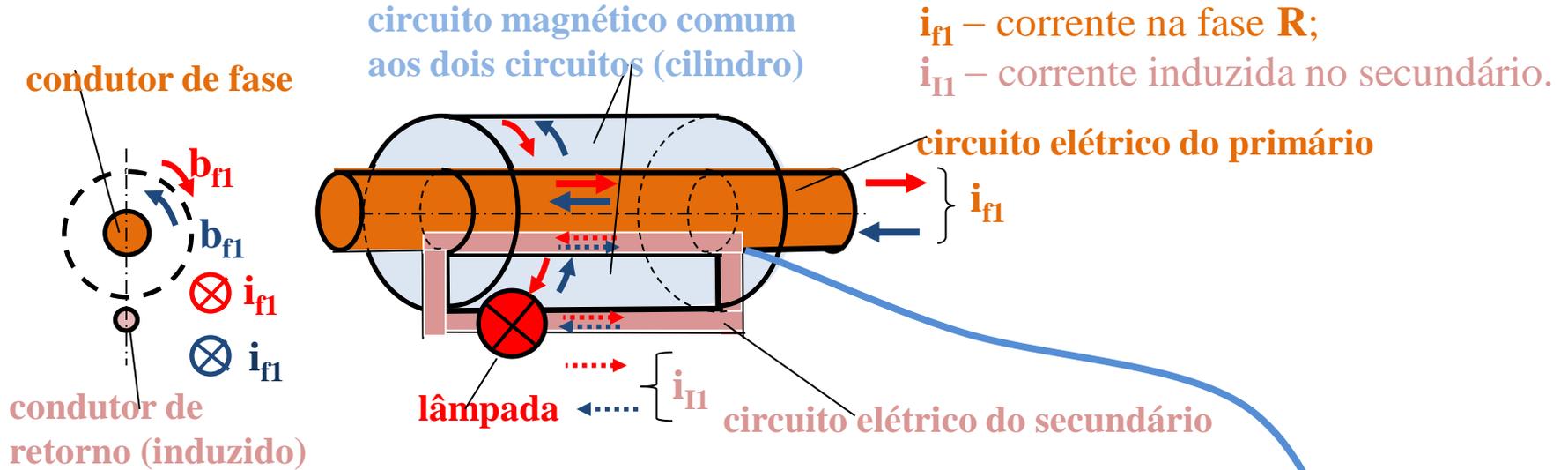


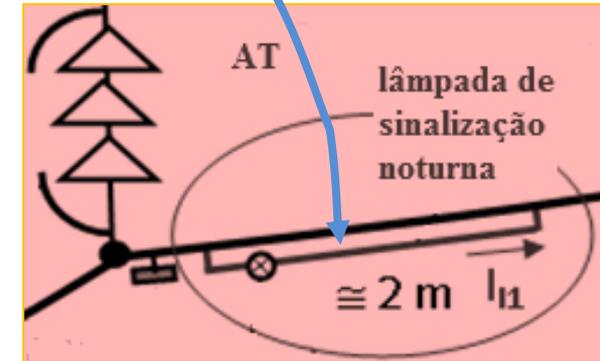
Fig. 2.4 – Funcionamento da lâmpada de sinalização (apenas se $I_{f1} > 0$, e se for alternada).

em que:

i_{f1} – corrente instantânea da fase R (variável no tempo) (A);

i_{11} – corrente instantânea induzida (A);

b_{f1} – indução magnética indutora (variável no tempo) (T).





3. EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA

• Resistência elétrica do corpo humano

- A corrente no **corpo humano** dependerá da:

- resistência que oferece à passagem da corrente (sendo maior na pele seca);
- resistência adicional à terra (revestimento, pavimento, eletrodo de terra).

- A resistência da parte interna do corpo (sangue, músculos e tecidos), é mais baixa, **300 a 500 Ω** , sendo na pele mais elevada.

- Para um valor médio da resistência do corpo humano, pode-se considerar **5000 Ω** , podendo ser inferior se o corpo estiver molhado (\cong **1000 Ω**).



3. EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA - (JUSTIFICAÇÃO)

–De acordo com a maioria dos **peritos**, pode-se admitir que:

- A **c.a.** (**$f = 50 \text{ Hz}$**) é mais perigosa do que a **c.c.**;
- Geralmente a **AT** é mais perigosa do que a **BT**.

–Partindo de literatura divulgada, **nem sempre consensual**, considera-se que a **corrente através do corpo humano**, é perigosa quando ultrapassa:

- 50 mA (c.c.)** (100 mA segundo **Merlin Gerin**);
- 25 mA (c.a. – $f = 50 \text{ Hz}$)** (30 mA segundo **Merlin Gerin**).

3. EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA - (JUSTIFICAÇÃO)

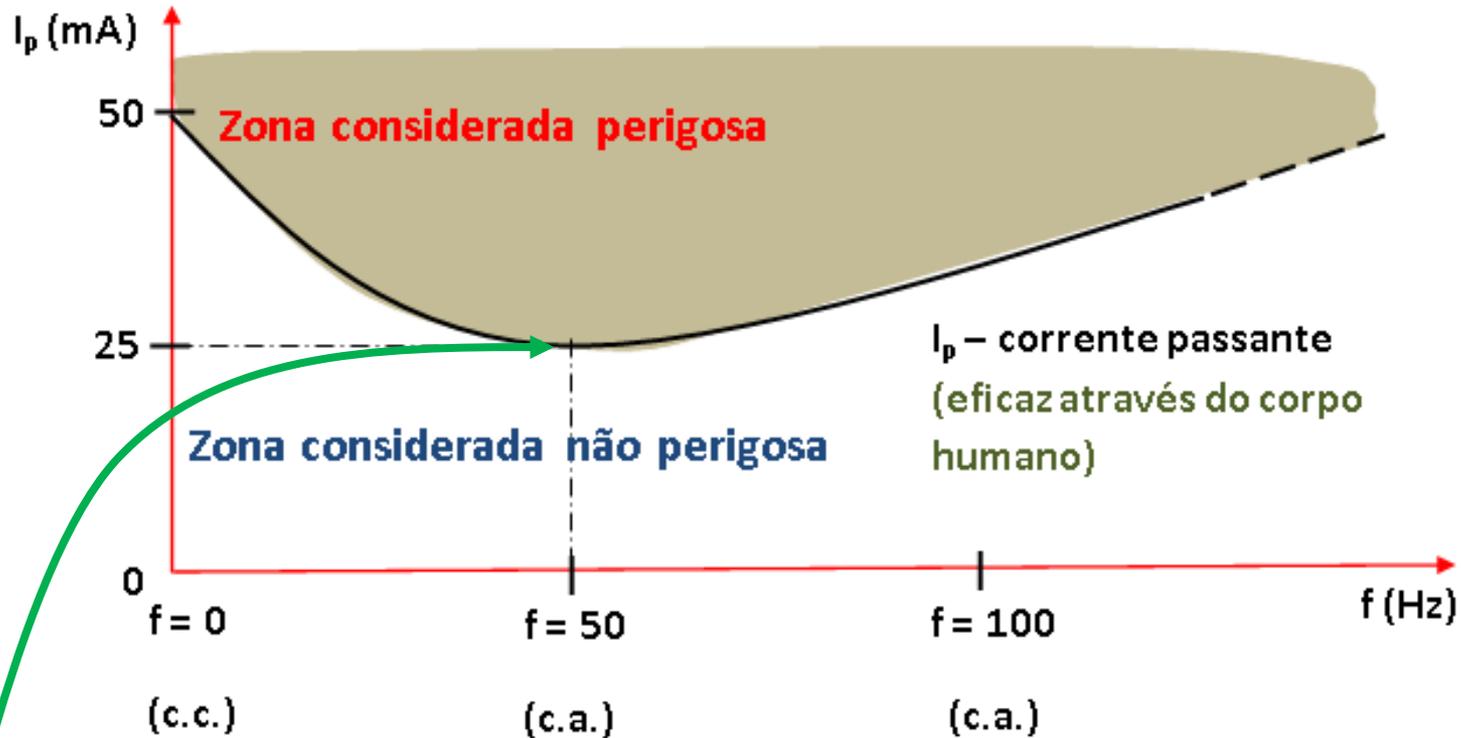


Fig. 3.1 - Corrente que se torna perigosa através do corpo humano, em função de f (Hz).

Da Fig.3.1, a mesma corrente torna-se **mais perigosa** para maiores frequências, mas a partir de **50 Hz** volta a ser **menos perigosa**.

3. EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA - (JUSTIFICAÇÃO)

(JUSTIFICAÇÃO)

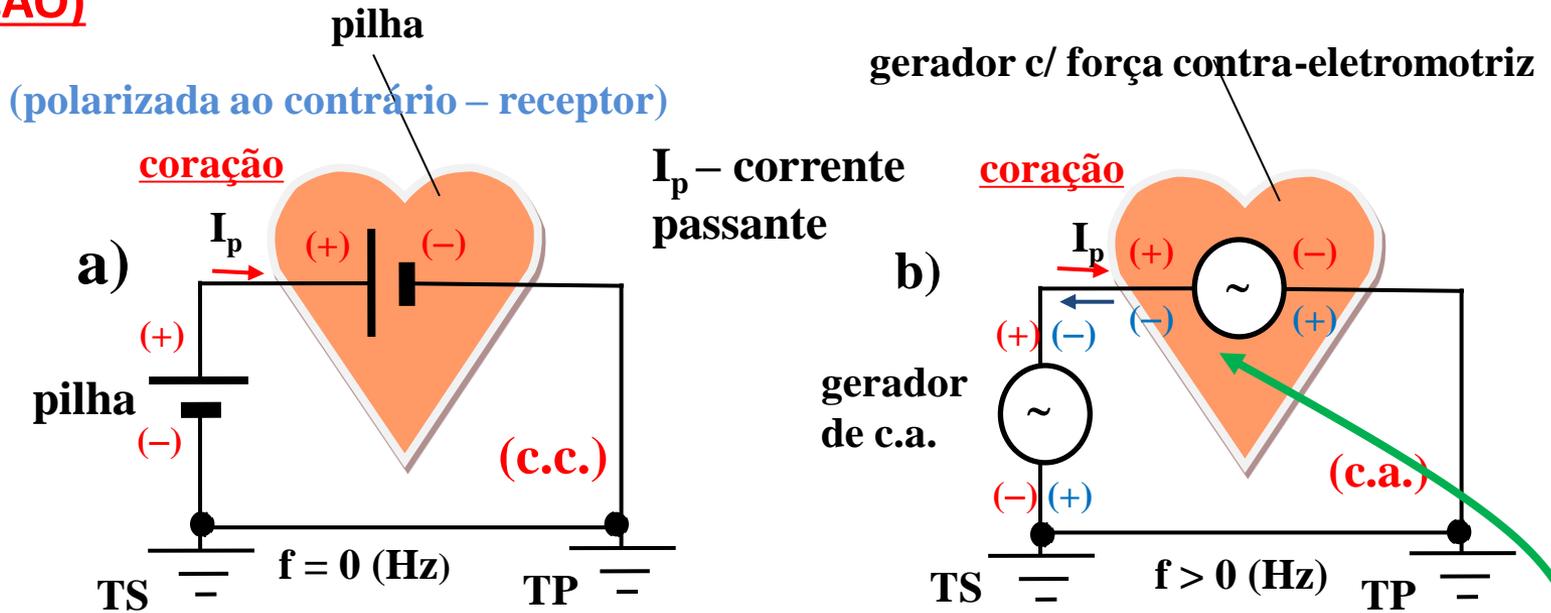


Fig. 3.2 – Coração funcionando como gerador com força contra electromotriz;
 •a) - em corrente contínua (c.c.);
 •b) - em corrente alternada (c.a.).

Da **Fig.3.2-b)**, em **c.a.**, o coração é solicitado a uma maior mudança de polarização, o que o torna mais fatigado, análogo ao se tentar **partir um arame** (Fig. seguinte).

3. EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA (JUSTIFICAÇÃO)

(JUSTIFICAÇÃO)
do coração ficar
fatigado

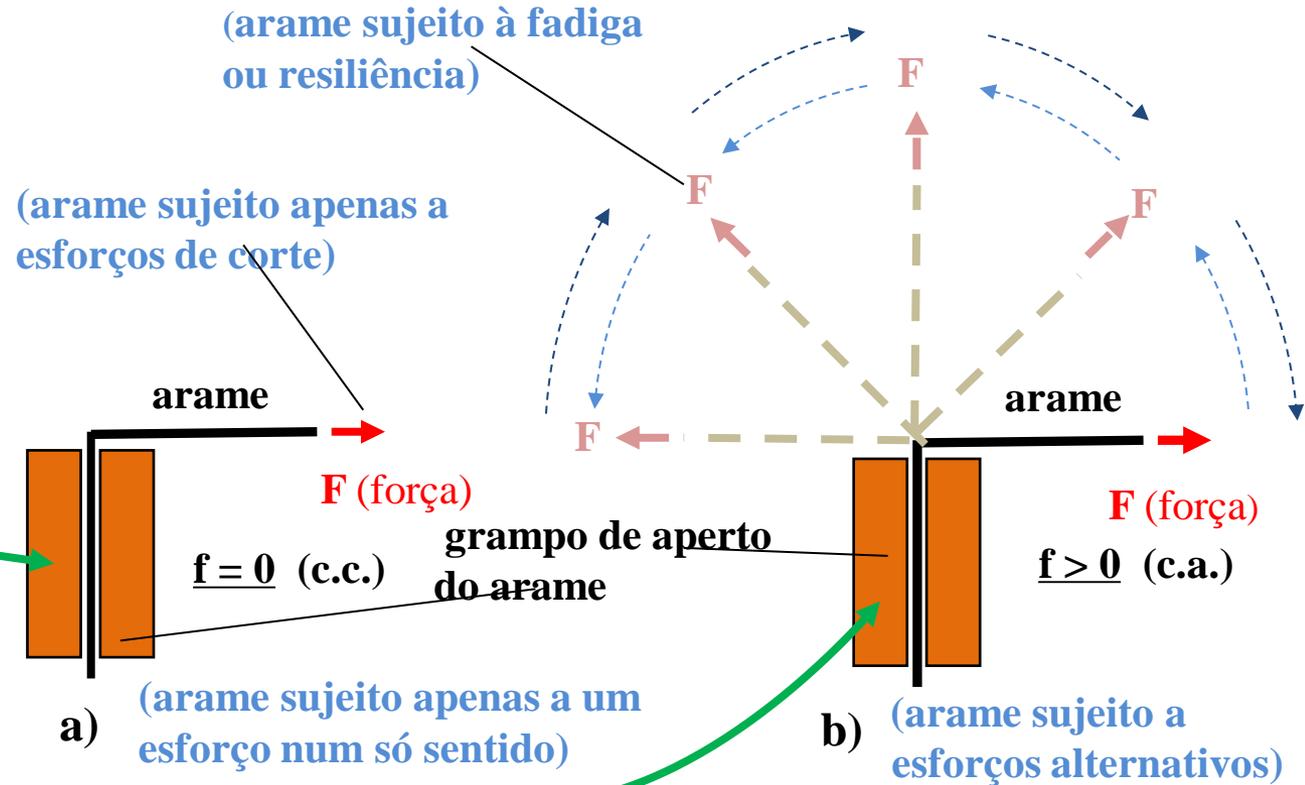
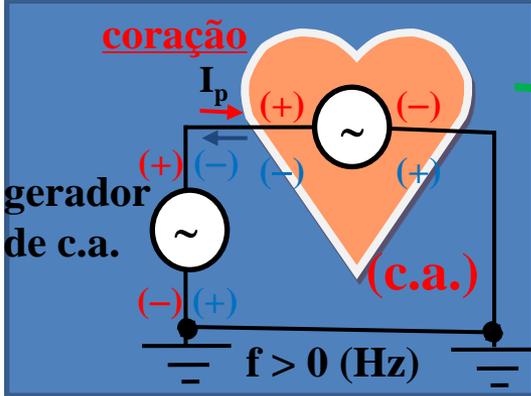
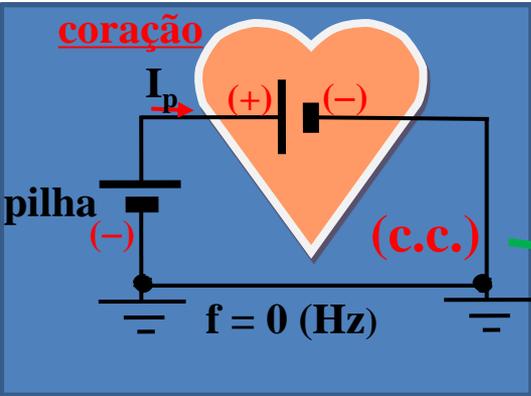


Fig. 3.3 – Arame sujeito a um esforço (F);
a) - sempre no mesmo sentido (análogo a c.c.);
b) - em diversos sentidos variáveis no tempo (análogo a c.a.).

3. EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA (JUSTIFICAÇÃO)

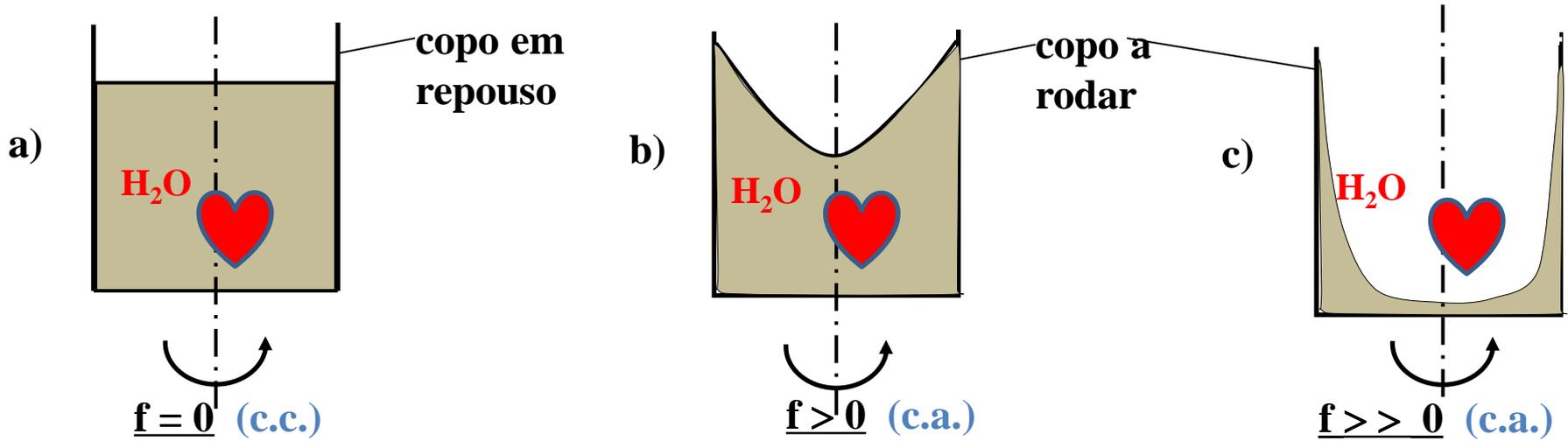


Fig. 3.4 – Aspecto qualitativo do efeito pelicular (analogia com os fluidos em movimento).

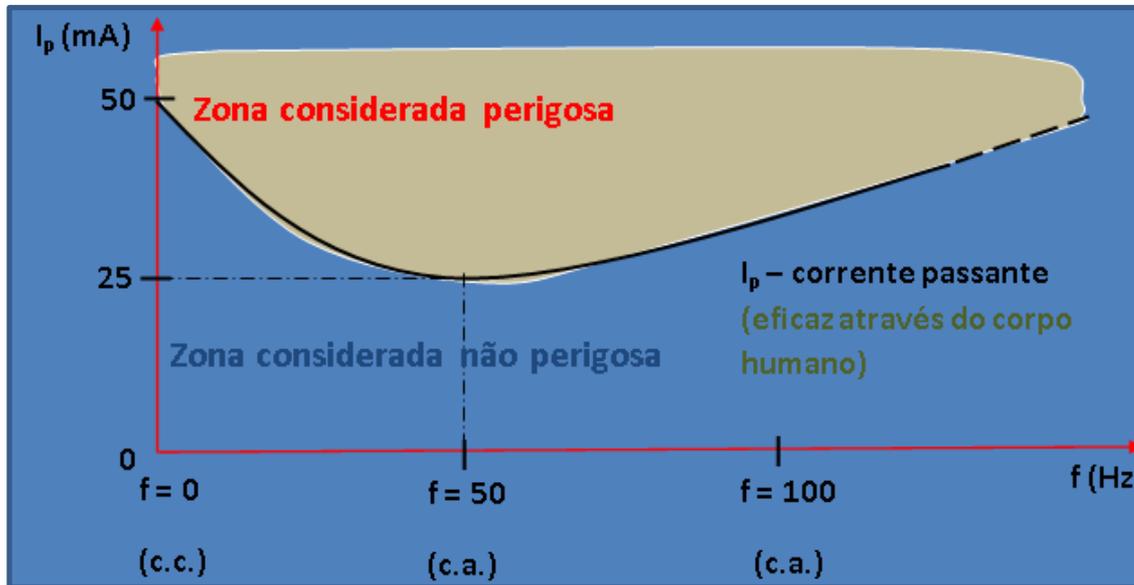


Fig. 3.1-a - Corrente que se torna perigosa através do **corpo humano**, em função de **f (Hz)**.

3.1 EFEITOS TÉRMICOS E ELECTRODINÂMICOS

3.1-a) EFEITOS TÉRMICOS

• A passagem de corrente através dum condutor cria o chamado efeito de joule, ou seja, uma certa quantidade de energia eléctrica é transformada em calor (**as pessoas também são condutores de eletricidade**).

$$Ri^2t = mc\Delta\Theta$$

(lei de joule)

R – resistência do condutor (Ω);

i – corrente instantânea (A);

t – tempo decorrido (s);

m – massa (kg);

$\Delta\Theta$ – variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

C – calor específico [$\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$].

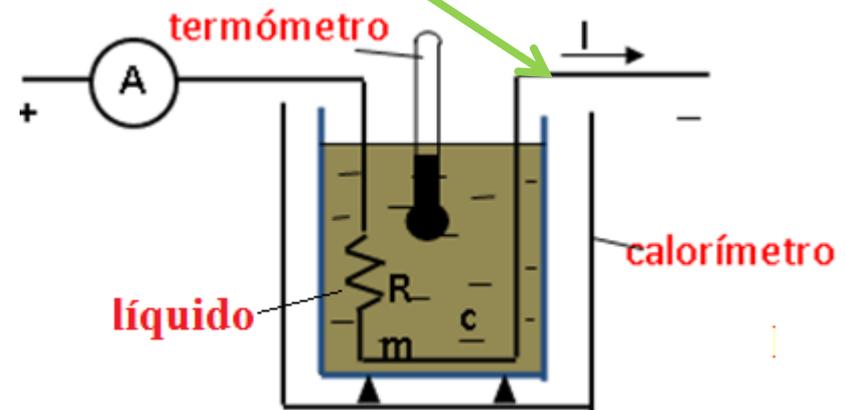


Fig. 3.5 - Calorímetro utilizado para o estudo da lei de Joule.

3.1 EFEITOS TÉRMICOS E ELECTRODINÂMICOS (Cont.)

3.1-b) EFEITOS ELECTRODINÂMICOS

•Dois condutores paralelos percorridos por correntes ficam sujeitos a forças electrodinâmicas de (ver Fig. 3.6):

a) atração (correntes no mesmo sentido);

b) repulsão (correntes em sentidos contrários).

$$f = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{d}$$

f – força (**N/m**);

i_1 e i_2 – corrente instantâneas (**A**);

d – distância entre condutores (**m**);

μ_0 – permeabilidade magnética do ar ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m).

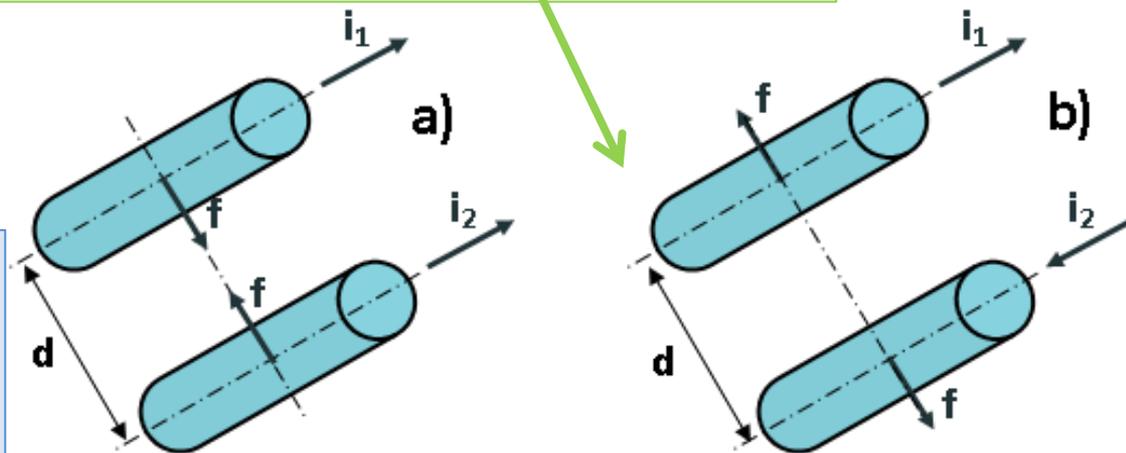


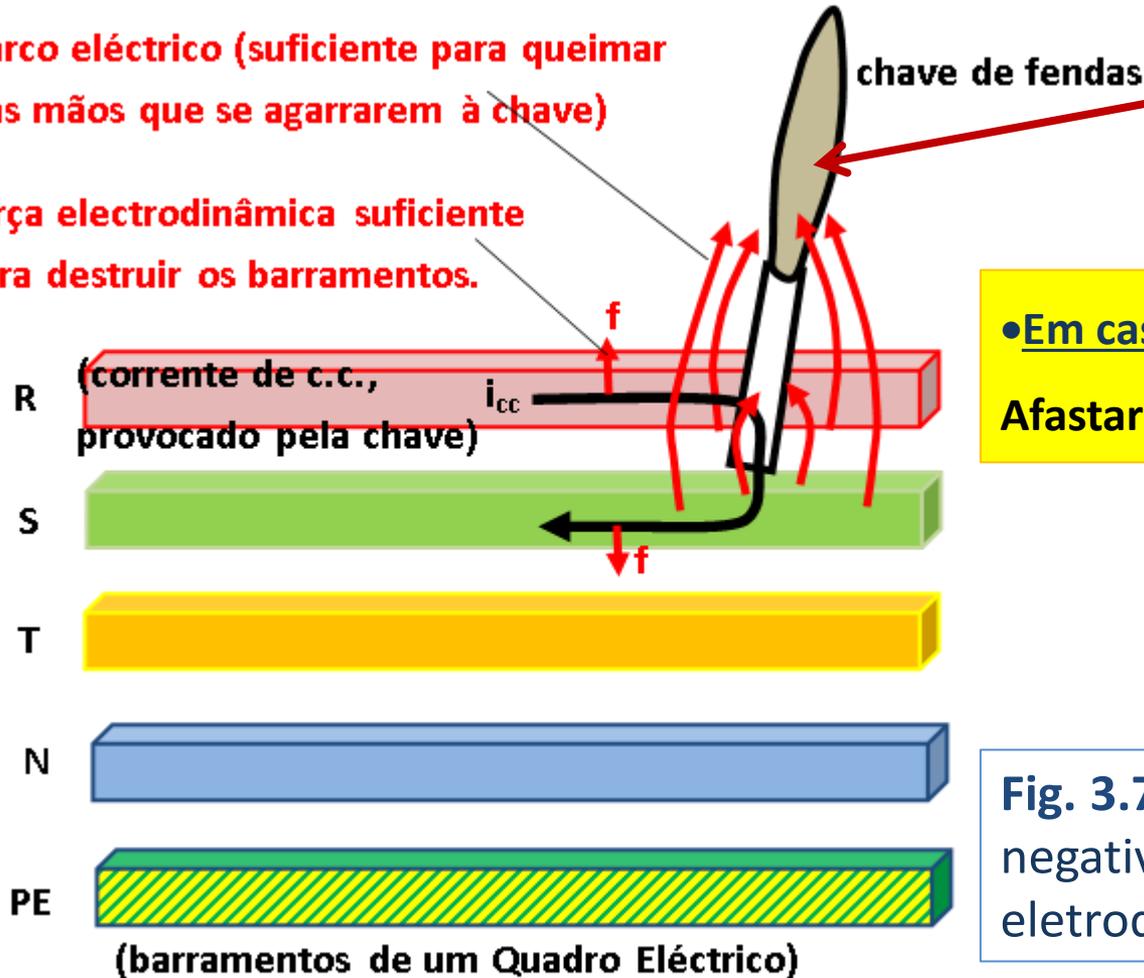
Fig. 3.6 – Forças electrodinâmicas entre condutores paralelos.

3.1 EFEITOS TÉRMICOS E ELETRODINÂMICOS (Cont.)

3.1-c) ALGUMAS CONSEQUÊNCIAS

arco eléctrico (suficiente para queimar as mãos que se agarrarem à chave)

força electrodinâmica suficiente para destruir os barramentos.



• Uma simples chave de fendas pode ser um desastre...

• Em caso de acidente, deve:

Afastar a vítima com objetos isolantes.

• Nunca atirar água, pois piora a situação.

Fig. 3.7 – Consequências negativas dos efeitos térmicos e eletrodinâmicos.



3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS

- Segundo dados da **Organização Mundial de Saúde (OMS)**, o **cérebro humano** pode tolerar, permanentemente:

- $E_{\text{máx}} = 5 \text{ kV/m}$ (campo eléctrico);
- $B_{\text{máx}} = 100 \text{ } \mu\text{T}$ (campo magnético).

- Perante estes dados, é possível determinar o valores de **E** e de **B**, quando um indivíduo estiver por baixo de uma linha de **AT**.

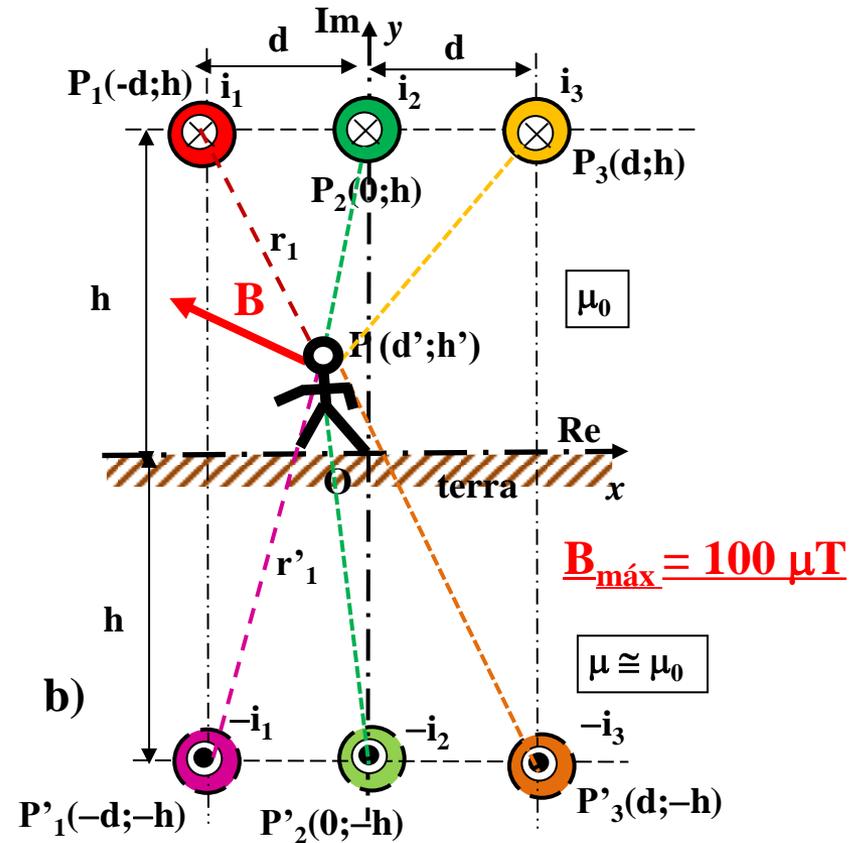
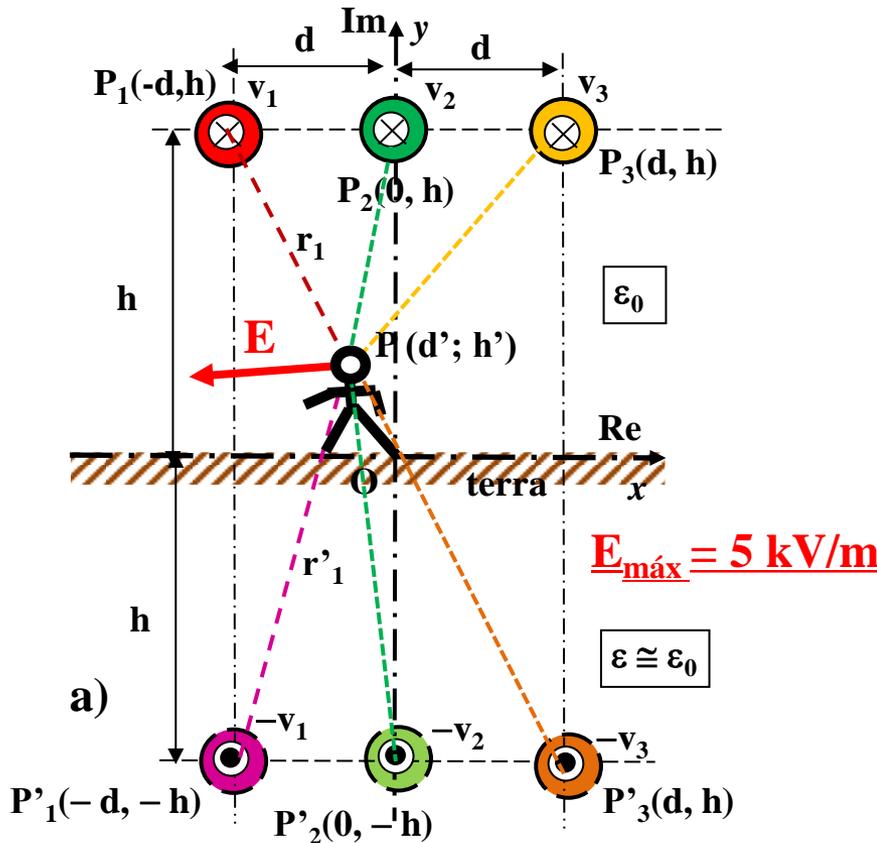
- **Dados importantes:**

- $\epsilon_0 \cong 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ – permitividade eléctrica (no ar e aproximadamente no terreno);
- $\mu_0 \cong 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ – permeabilidade magnética (no ar e aproximadamente no terreno).

3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

Valores máximos, no cérebro, segundo OMS:

$E_{\text{máx}} = 5 \text{ kV/m}$ (campo eléctrico);
 $B_{\text{máx}} = 100 \text{ } \mu\text{T}$ (campo magnético).



**Fig. 3.8 – Linha trifásica aérea (método das imagens);
a) campo eléctrico; b) campo magnético.**

3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

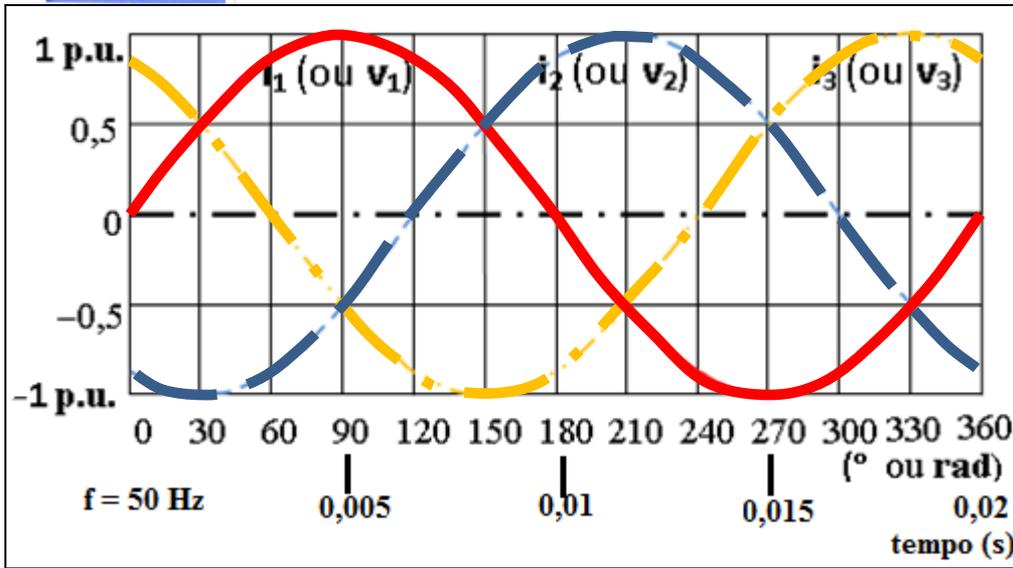


Fig. 3.9 – Sistema trifásico de correntes (ou de tensões) equilibradas, em valores unitários (p.u.).

Dados:

$$R = \frac{0.0318}{2} = 0.0159 \text{ m}$$

(raio de cada condutor por fase)

$$R_g = \frac{0.0234}{2} = 0.0117 \text{ m}$$

(raio de cada cabo de guarda)

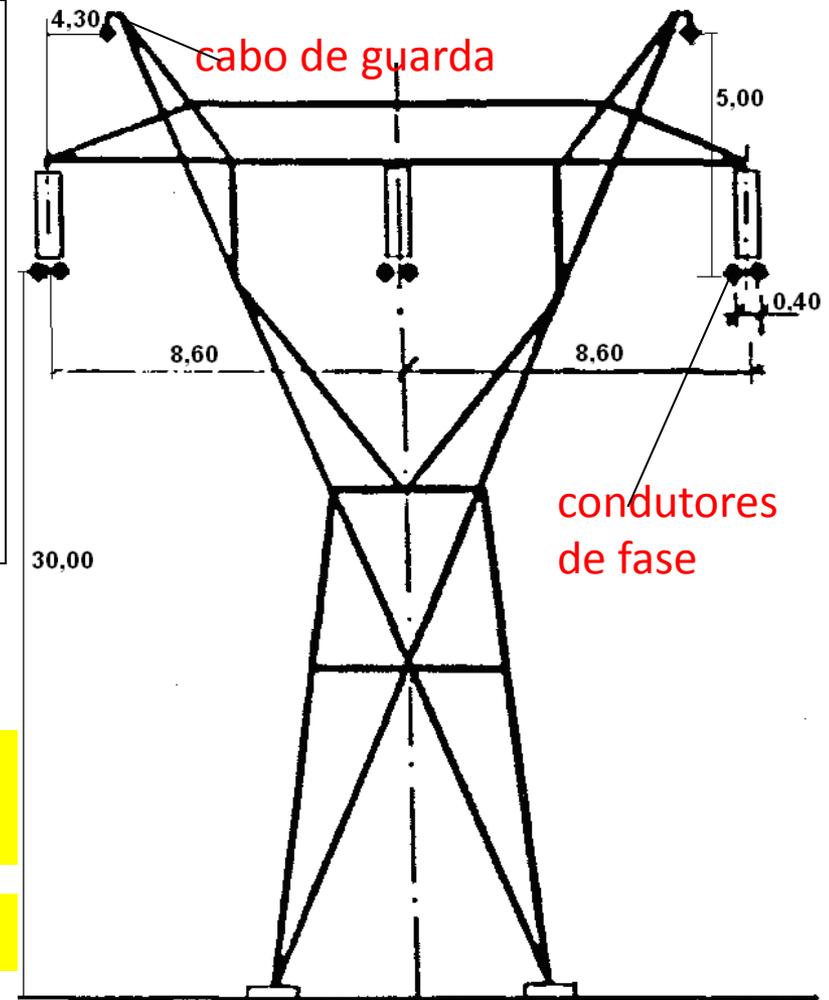


Fig. 3.10 – Representação do poste de apoio e respectivas dimensões em metros (linha de AT de **400 kV**, potência nominal **1200 MVA** (corrente nominal: $I_n \cong 1,732 \text{ kA}$)).



3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

• Como exemplo, analisa-se agora o campo electromagnético para cada instante.

– No sistema trifásico, para $t = 0 \text{ ms}$ ($\theta = \omega t = 0$) (ver Fig. 3.9), virá:

$$\begin{array}{lll} v_1(t) = 0 \text{ kV} & v_2(t) = -282,84 \text{ kV} & v_3(t) = 282,84 \text{ kV} \\ i_1(t) = 0 \text{ A} & i_2(t) = -2121,3 \text{ A} & i_3(t) = 2121,3 \text{ A} \end{array}$$

(ver Fig.s 3.11 e 3.12). Considera-se $\cos\varphi = 1$ (factor de potência).

– No sistema trifásico, para $t = 6,667 \text{ ms}$ ($\theta = \omega t = 2\pi/3 \equiv 120^\circ$) (ver Fig. 3.9), virá:

$$\begin{array}{lll} v_1(t) = 282,84 \text{ kV} & v_2(t) = 0 \text{ kV} & v_3(t) = -282,84 \text{ kV} \\ i_1(t) = 2121,3 \text{ A} & i_2(t) = 0 \text{ A} & i_3(t) = -2121,3 \text{ A} \end{array}$$

(ver Fig.s 3.13 e 3.14). Considera-se $\cos\varphi = 1$ (factor de potência).

3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

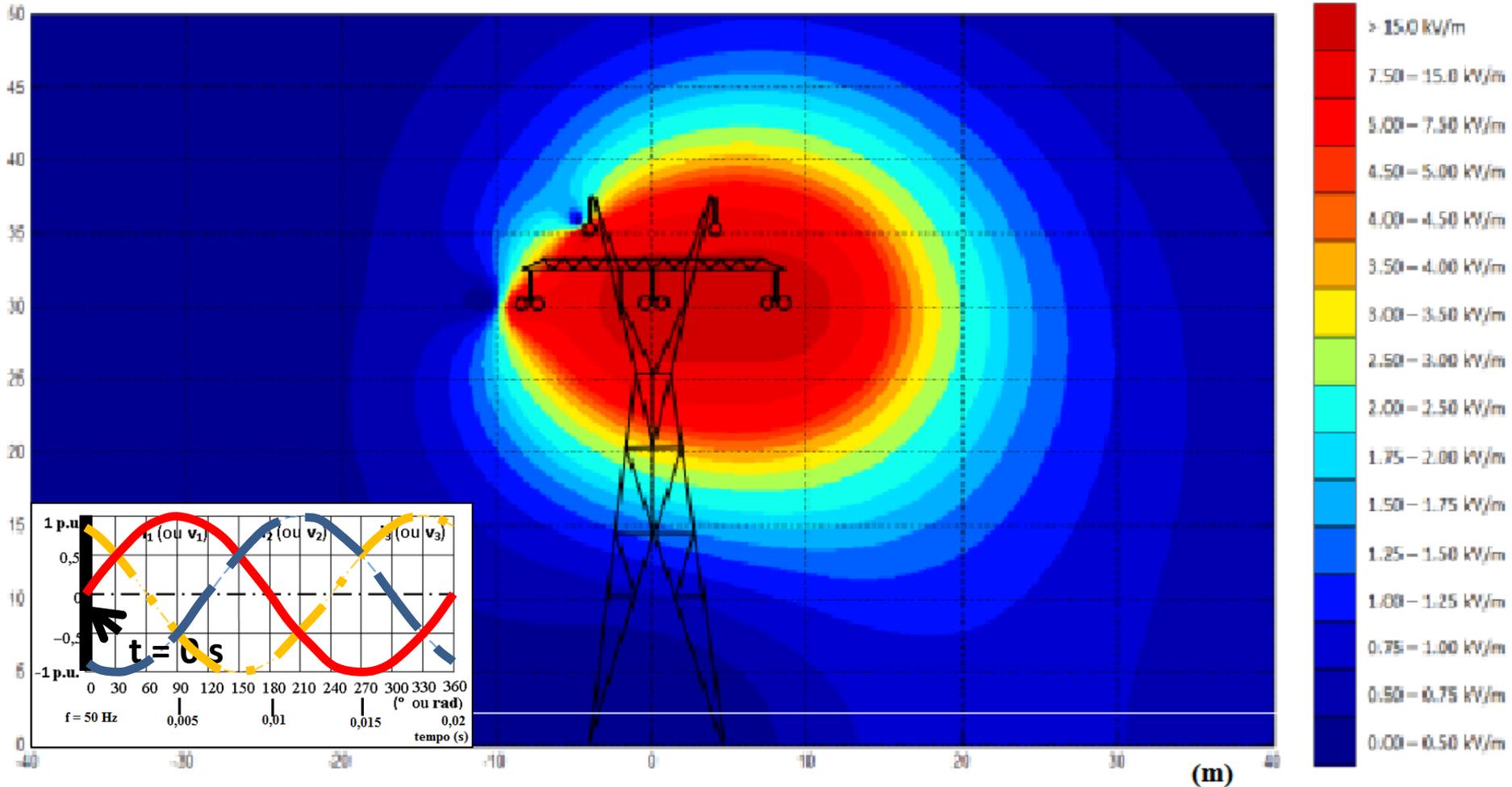


Fig. 3.11 – Campo eléctrico para $t = 0 \text{ ms}$ (0°) – $v_R = 0$
(J. Duarte – SEE, MEEE).

3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

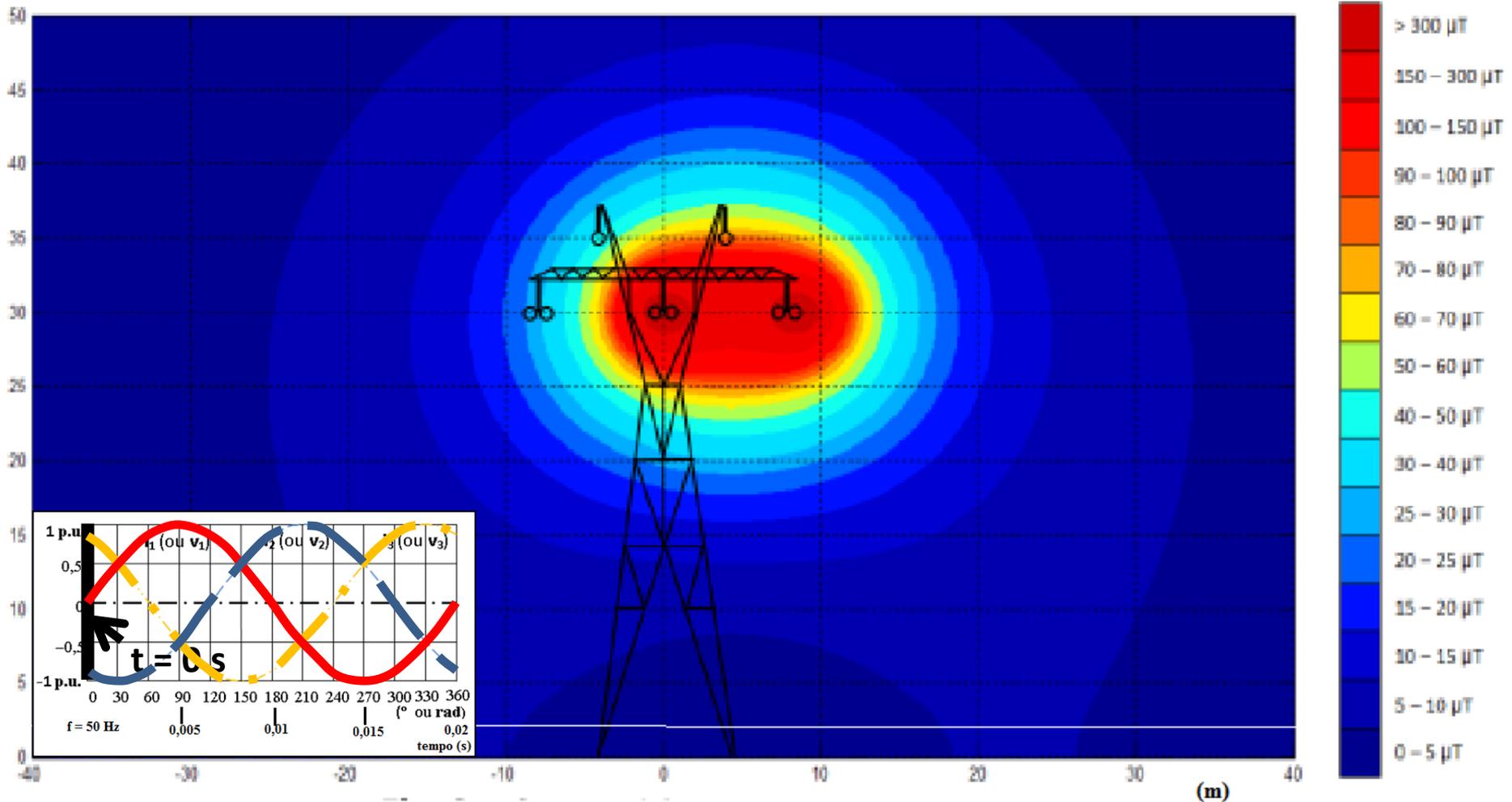


Fig. 3.12 – Campo magnético para $t = 0 \text{ ms}$ (0°) – $i_R = 0$
(J. Duarte – SEE, MEEE).

3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

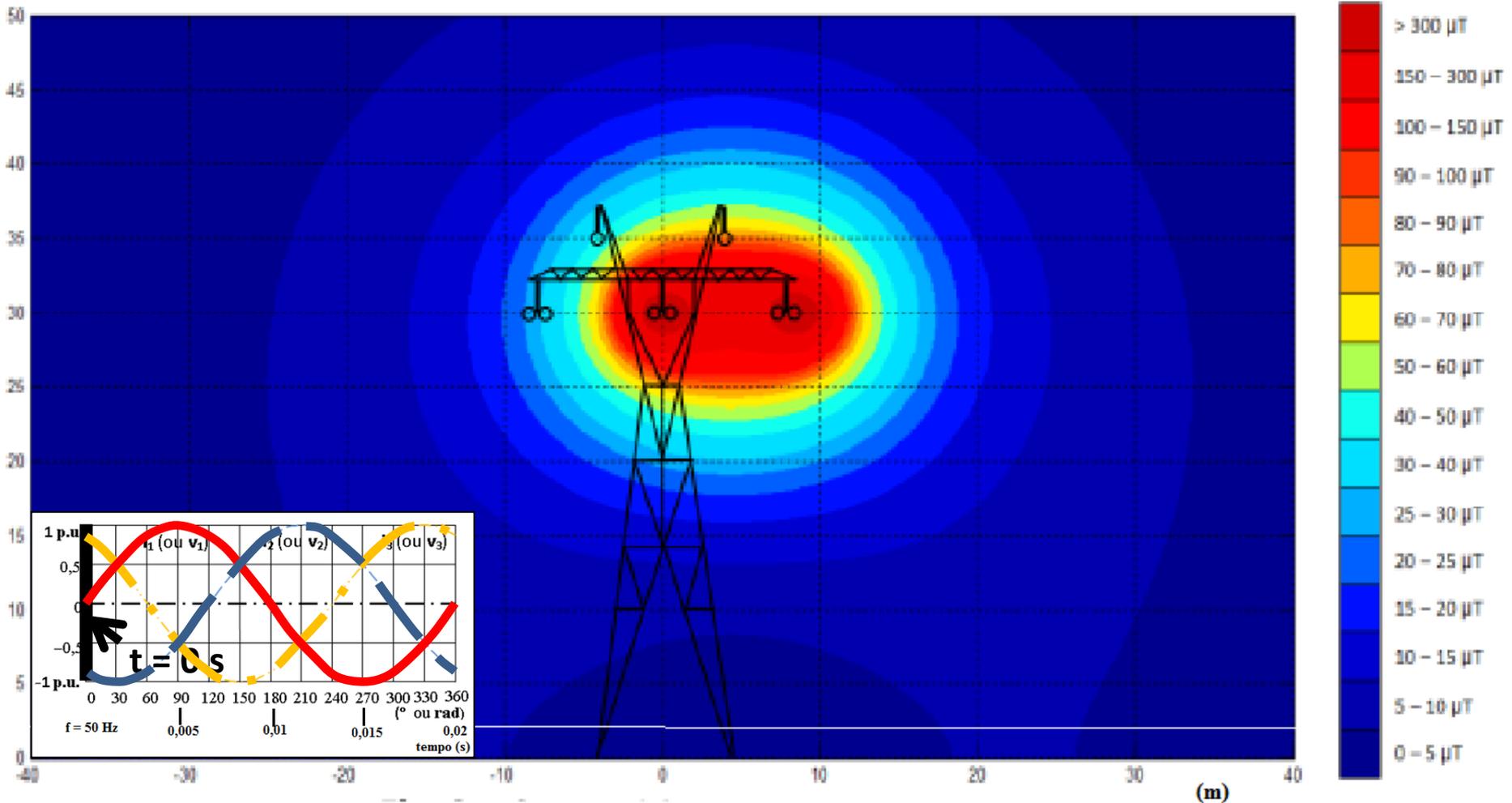


Fig. 3.12 – Campo magnético para $t = 0 \text{ ms}$ (0°) – $i_R = 0$
(J. Duarte – SEE, MEEE).

3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

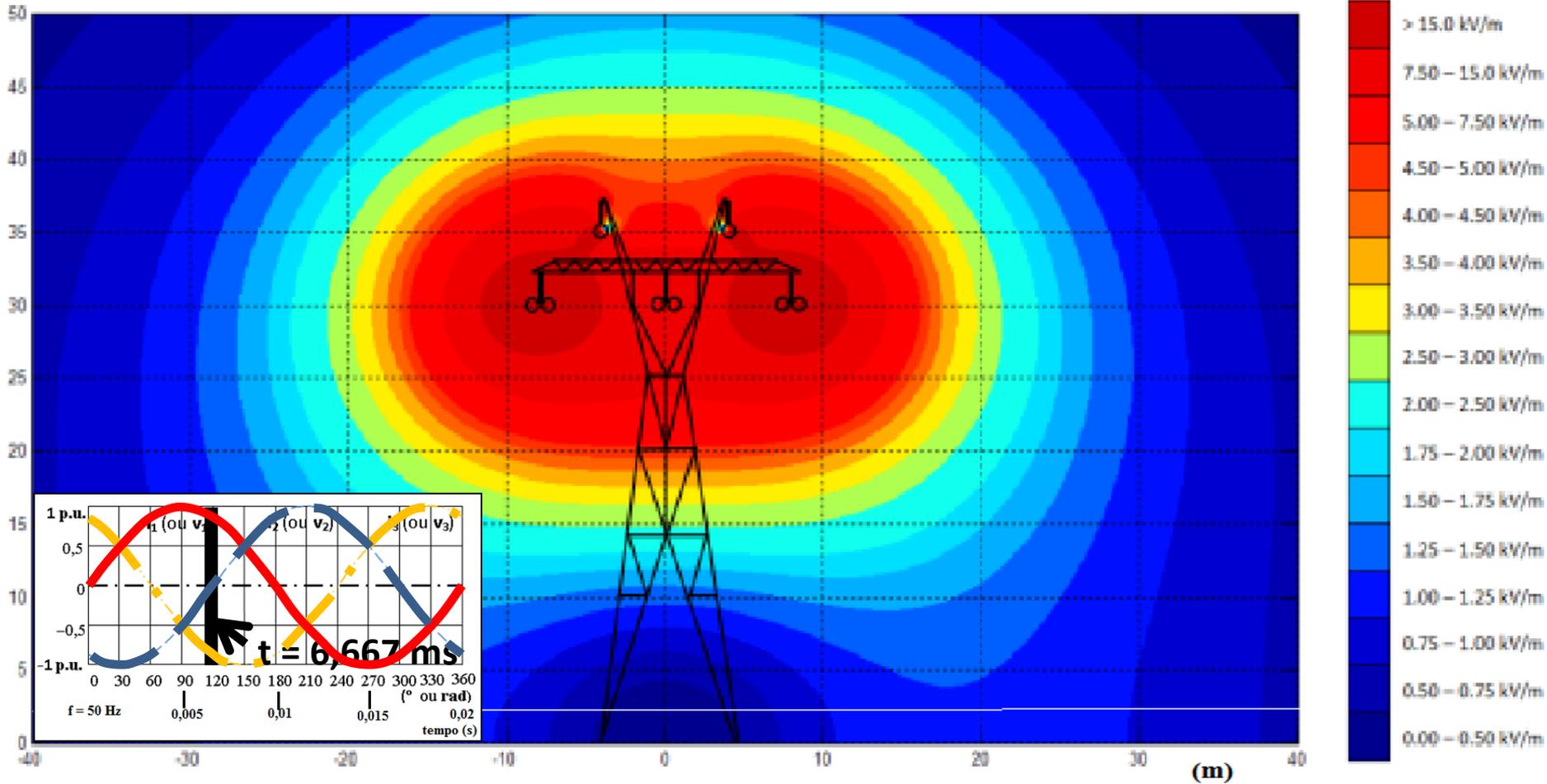


Fig. 3.13 – Campo eléctrico para $t = 6,667 \text{ ms}$ (120°) – $v_s = 0$ (pior situação)
(J. Duarte – SEE, MEEE).

3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

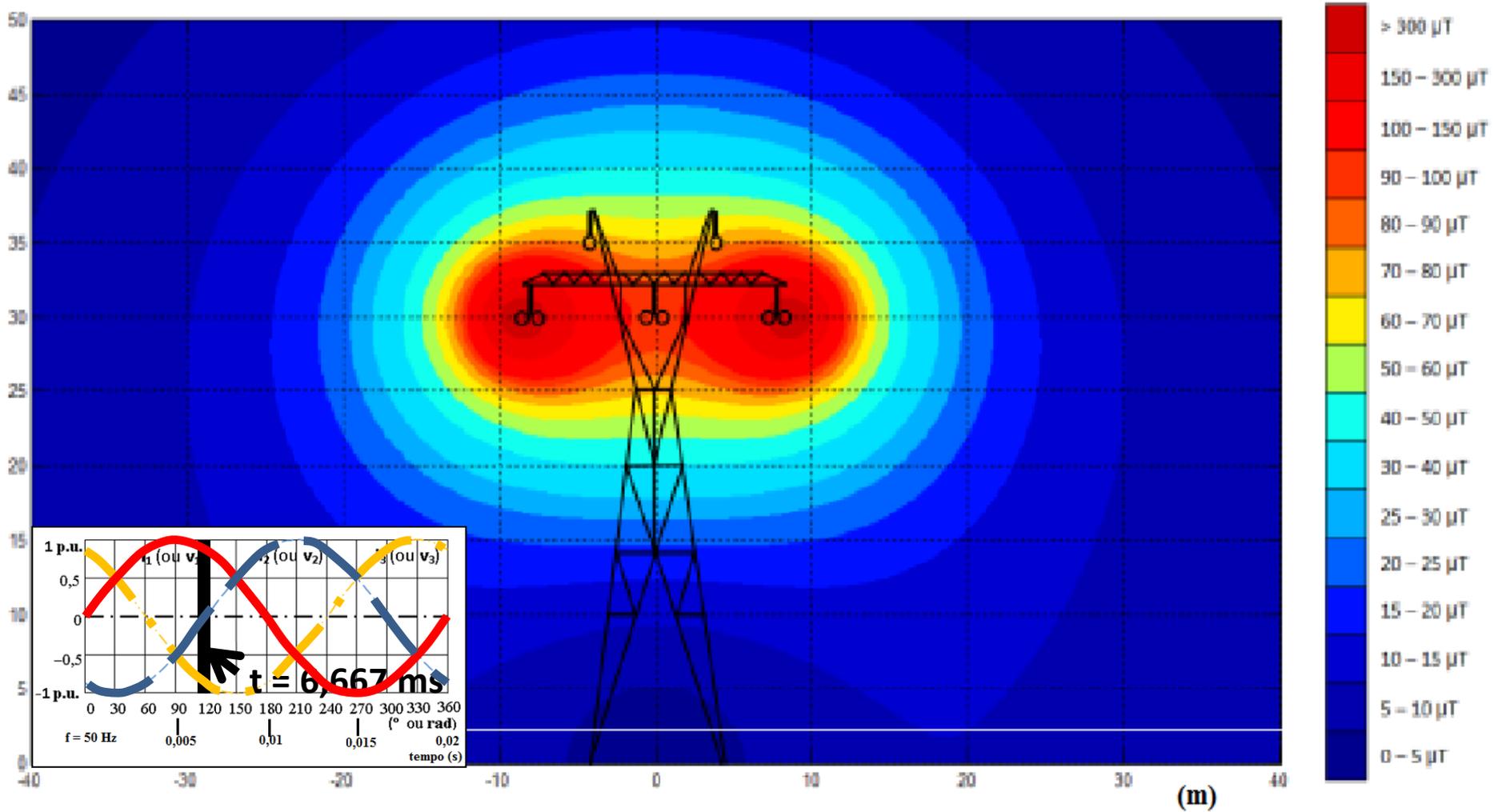


Fig. 3.14 – Campo magnético para $t = 6,667 \text{ ms}$ (120°) – $i_s = 0$ (pior situação) (J. Duarte – SEE, MEEE).

3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

Linha de AT

plataforma para nidificação

dispositivo dissuasor para ninhos

cabo de guarda

**Copiado de:
ERSE - Entidade Reguladora
dos Serviços Energéticos**

Fig. 3.15 – Ninhos de cegonhas em postes de AT.

cabo aéreo com 2 feixes de condutores por fase

Duas questões, relativamente aos campos eletromagnéticos nas linhas de AT (ou de MT) ...

“Então e quanto às cegonhas”?...

“Será que os dados da OMS estão corretos”?...



3.2 EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS (Cont.)

• Quanto aos **cabos eléctricos** (BT, MT ou AT), **enterrados no solo**, ou **em caleiras (ao ar livre)**, é preciso ter também em atenção os valores dos **campos**.

Afirmação:

• Os cabos estão bem mais próximos do indivíduo do que as linhas eléctricas ($\cong 2$ a 3 m).

• Neste caso é preciso ponderar muitos fatores, tais como:

- Se os cabos são **monopolares** (monofásicos) ou **tripolares** (trifásicos) (como são os isolamentos e as bainhas?, há ou não retorno de corrente pelas bainhas?, etc.);

- Se os cabos **monopolares** estão próximos uns dos outros (energia electromagnética menor);

- Se os cabos **monopolares** estão afastados uns dos outros (energia electromagnética maior – maior perigo);

- Na mesma caleira não se devem colocar todos os cabos da mesma fase, pois se for grande a distância aos cabos das outras fases, originam-se **intensas energias electromagnéticas**, com consequências nefastas no **estabelecimento**, na **interrupção** e, particularmente na variação do factor de potência ($\cos\phi$) \rightarrow **reatância indutiva ou também capacitiva**.



4 CONCLUSÕES

- Em trabalhos em **MT** ou em **AT**, munir-se sempre de equipamento isolante;
- Em trabalhos em **BT** ou em **MT**, a jusante de um seccionador, verificar se as facas estão abertas;
- Em redes elétricas,
 - o **campo elétrico** depende da **tensão**;
 - o **campo magnético** depende da **corrente**.
- Nas linhas aéreas e nos cabos subterrâneos, em *sistemas equilibrados*, quanto mais afastados estiverem os condutores de fases diferentes, uns dos outros, maiores serão os campos electromagnéticos na vizinhança dessas linhas ou desses cabos;
- Embora possa haver maior blindagem eletromagnética a envolver os cabos subterrâneos, os seus efeitos eletromagnéticos podem ser mais nefastos, em virtude de estarem bem mais próximos dos indivíduos.

Muito Obrigado



Atenção!

“O perigo vem donde menos se espera...”

QUESTÕES?

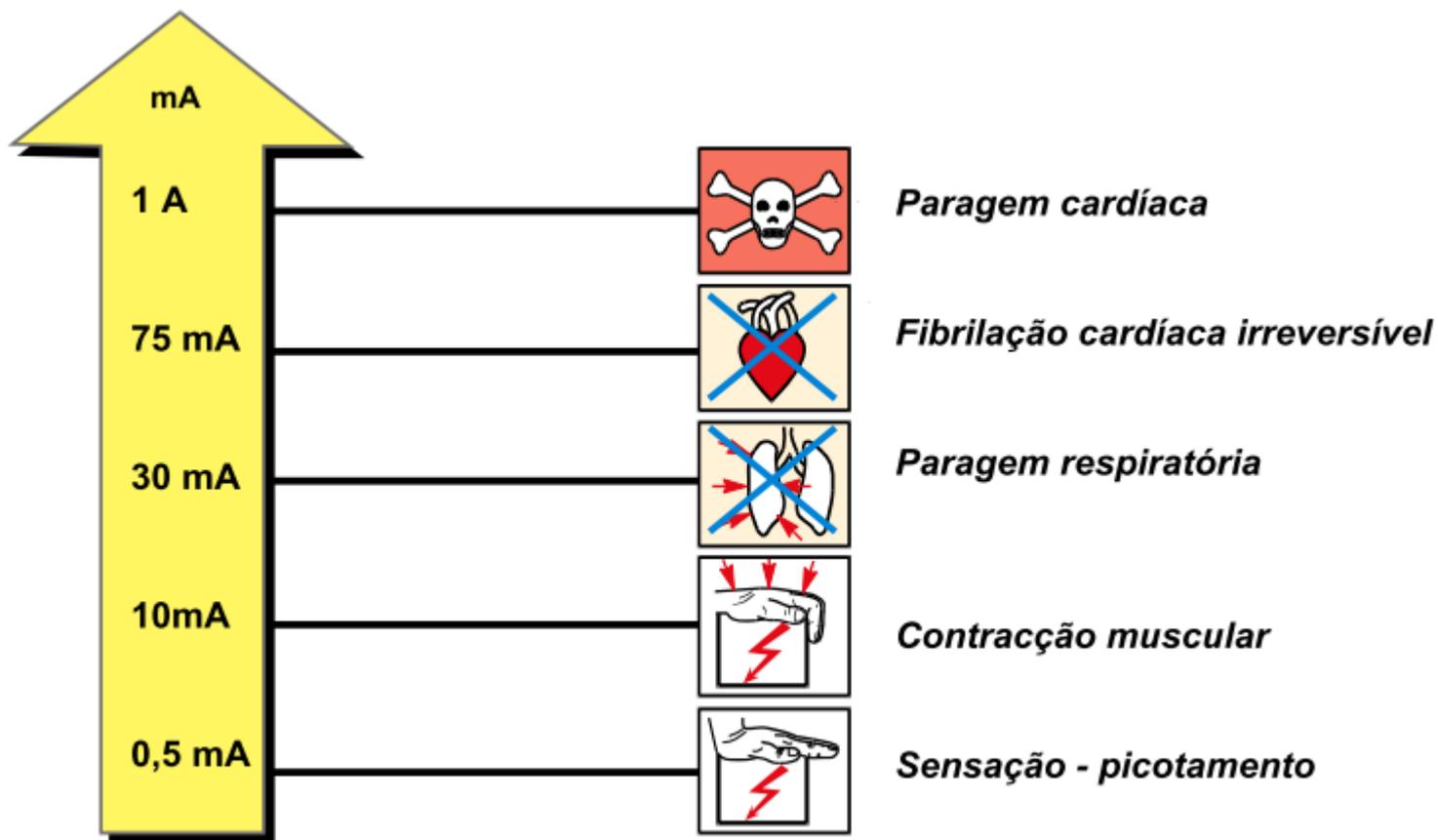


FIM

ANEXOS

Efeitos da corrente alterna (entre 15 e 100 Hz) - IEC 60479-1 – Fonte: Merlin Gerin

Valores críticos de corrente

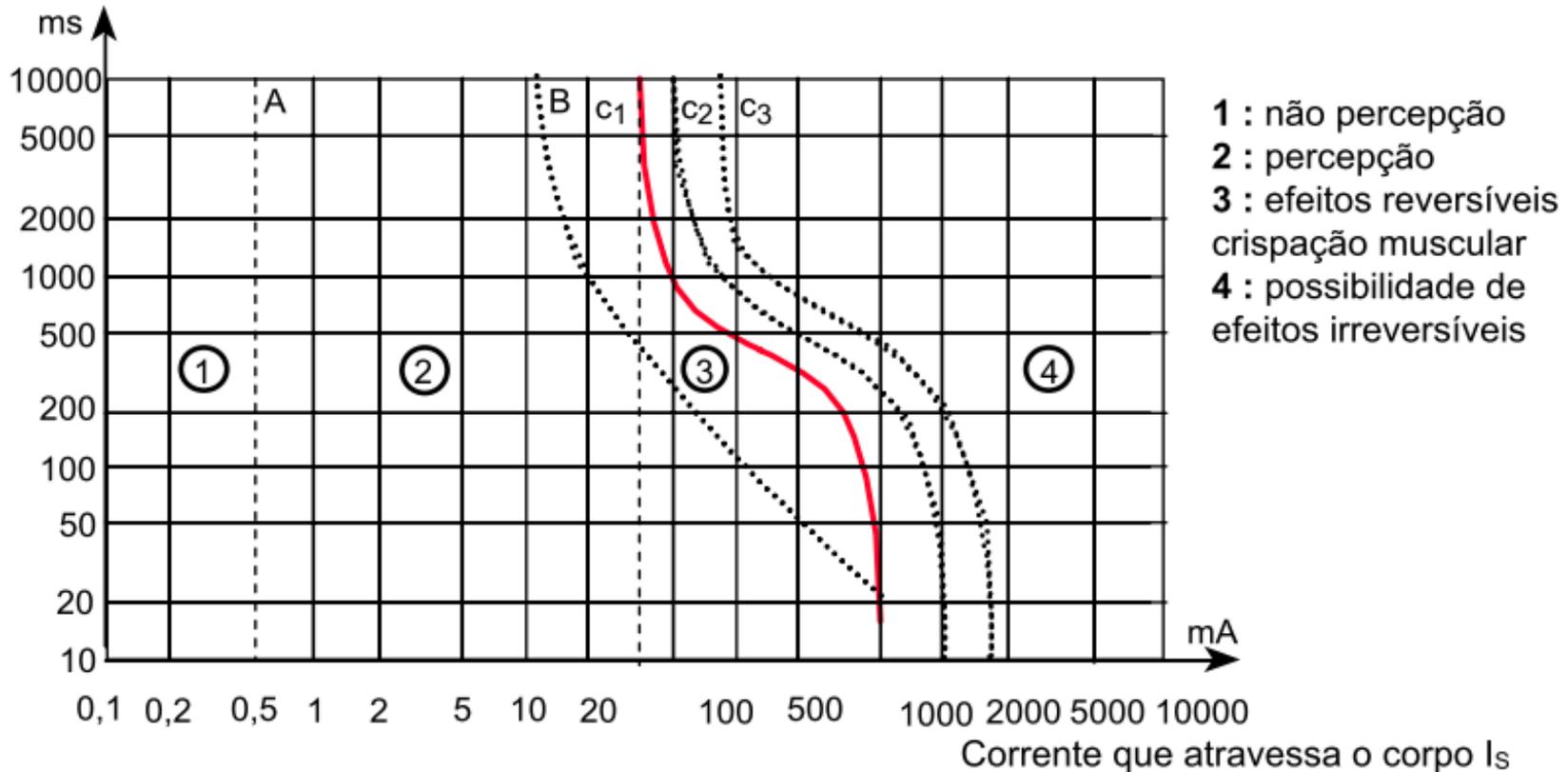


ANEXOS

Os choques eléctricos críticos.

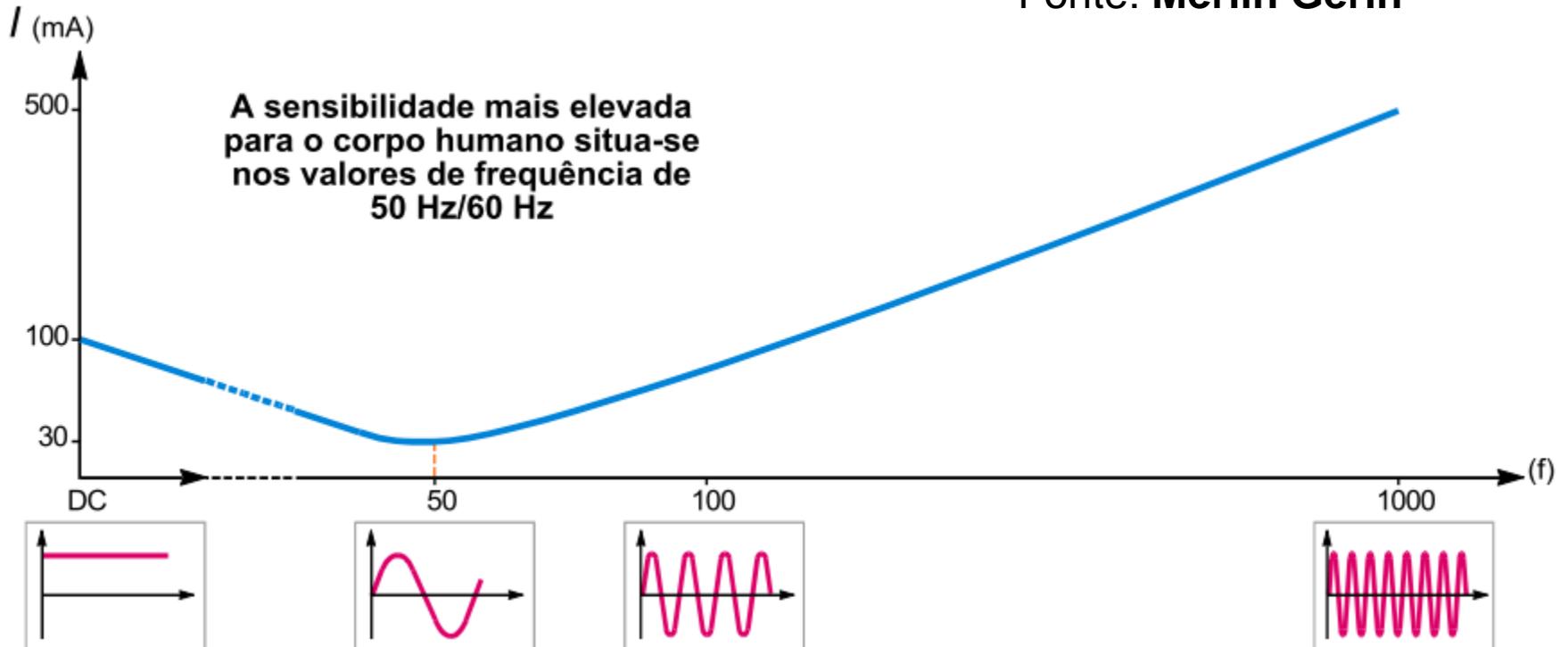
Duração da passagem da corrente (entre 15 e 100 Hz) - **IEC 60479-1** –

Curva C1 da CEI 479-1 – Fonte: **Merlin Gerin**



ANEXOS

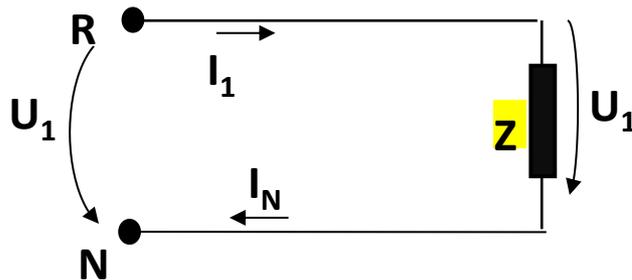
Fonte: **Merlin Gerin**



ANEXOS

Corrente de neutro face às correntes de fase supostas sempre iguais em módulo (apenas ondas fundamentais).

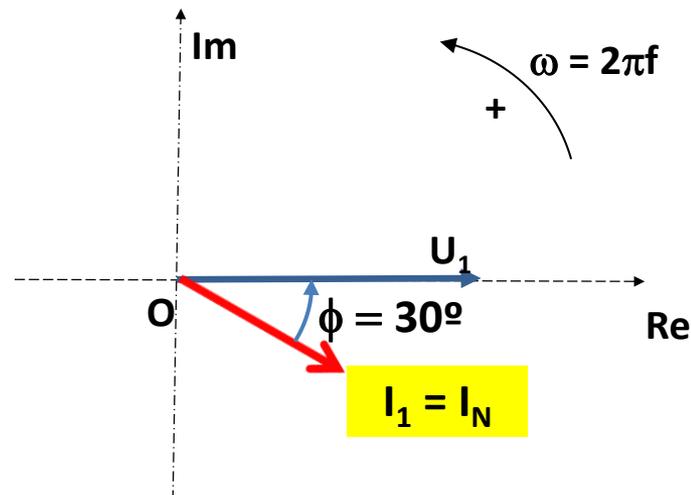
Circuito monofásico:



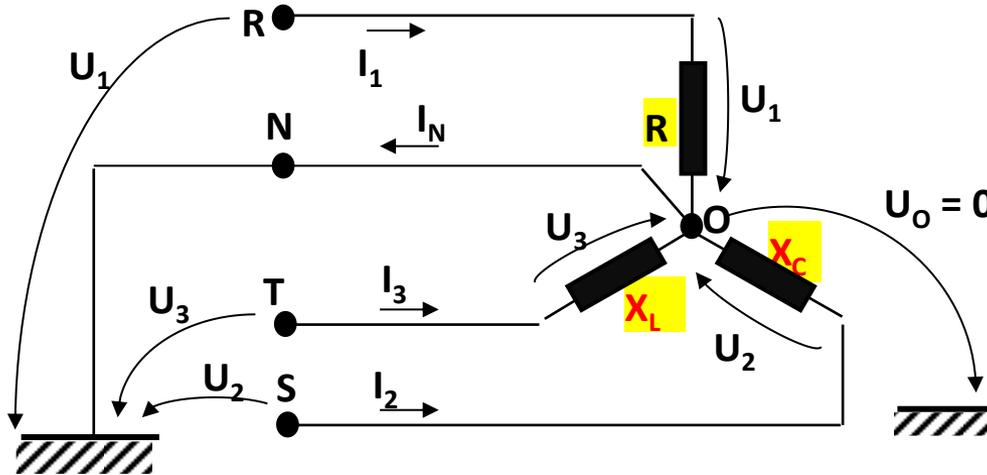
$$I_N = I_F = I_1$$

$$(S_N = S_F)$$

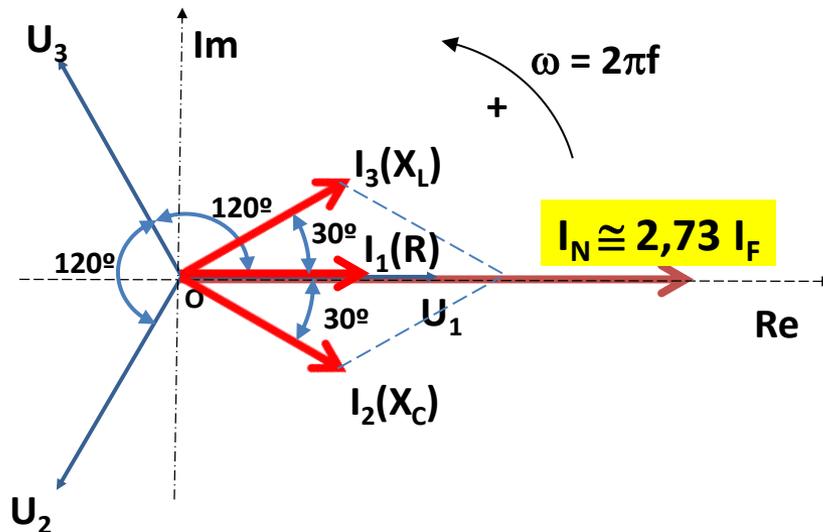
Z – indutivo



ANEXOS



Sistema trifásico desequilibrado
(apenas ondas fundamentais)



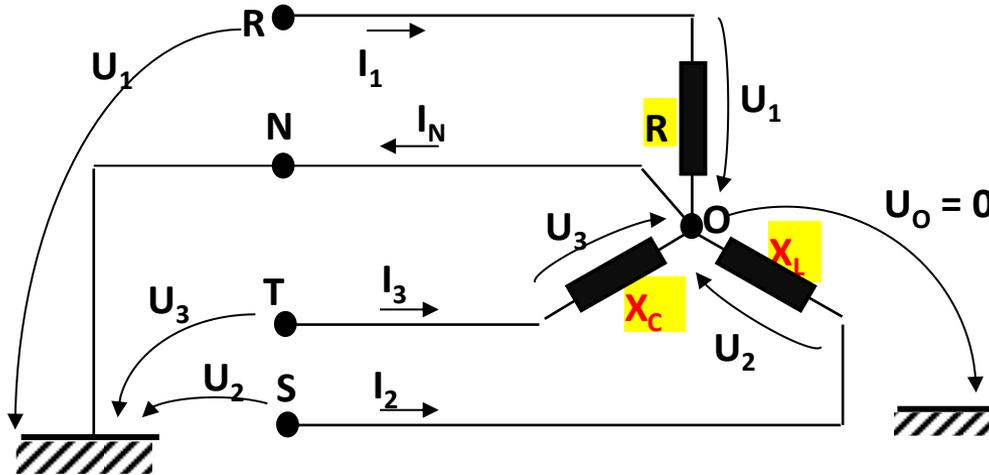
Considera-se que:

$$|U_1| = |U_2| = |U_3| = U_s$$

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = I_F$$

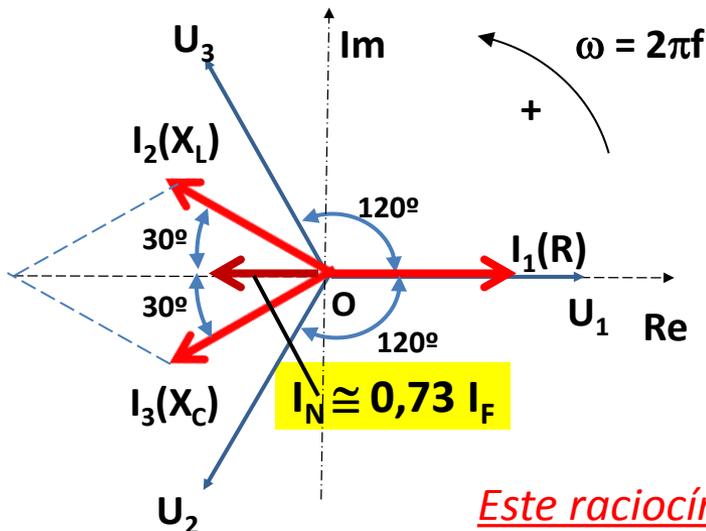
Pior situação

ANEXOS



Sistema trifásico desequilibrado (apenas ondas fundamentais)

Trocando X_L com X_C , ou trocando as fases S (L_2) e T (L_3).



•Um valor de I_N que pode ser considerado aproximado, é de:

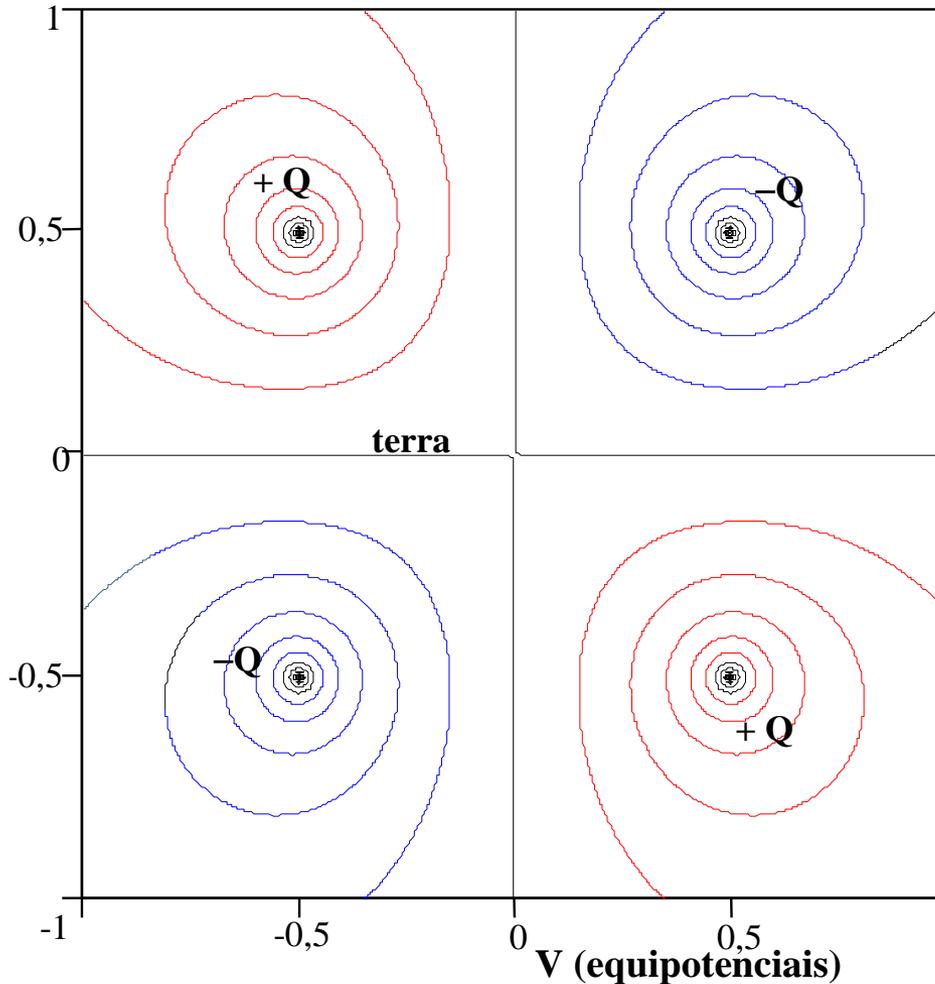
$$I_N \cong (2,73 + 0,73)I_F/2 \cong 1,75 I_F$$

Na prática pode-se considerar, em circuitos com harmónica, o valor:

$$I_N \cong 1,5 I_F \Rightarrow S_N \cong 1,5 S_F$$

Este raciocínio é idêntico para outras possíveis harmónicas.

ANEXOS



Linha bifilar (2 fios)

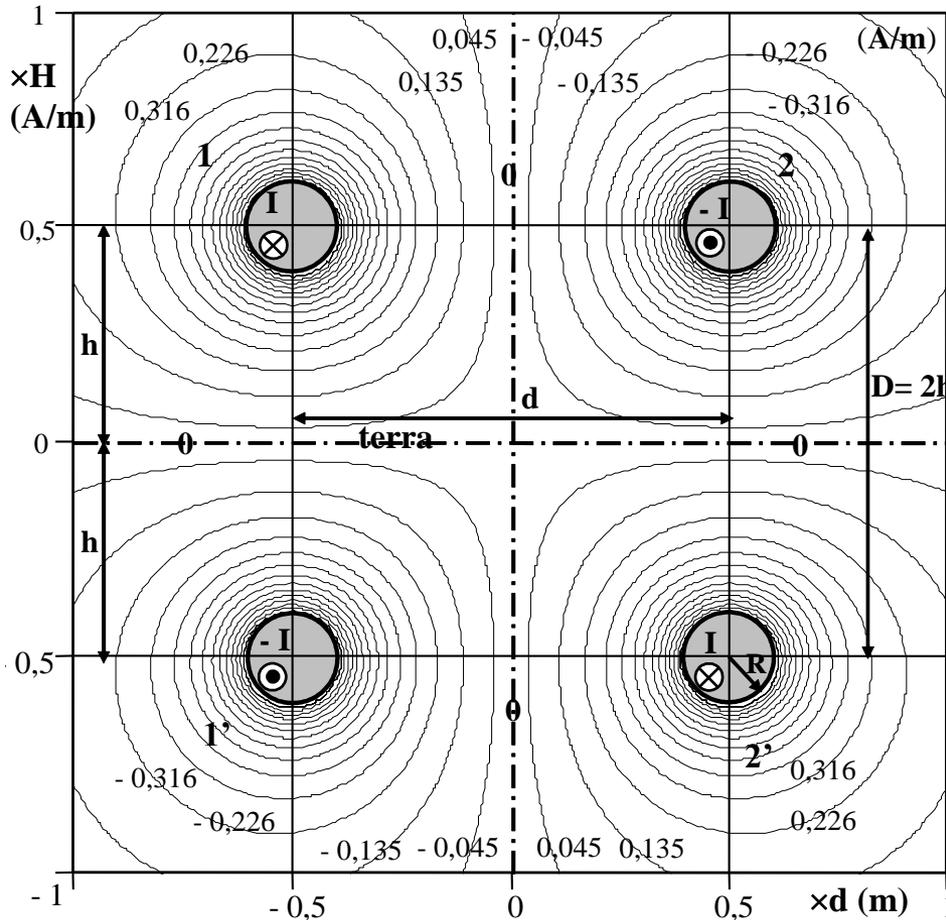
Campo eléctrico (**E**)

Linhas equipotenciais ($V = cte$) (linha bifilar - método das imagens - cargas de sinais contrários).

ANEXOS

Linha bifilar (2 fios)

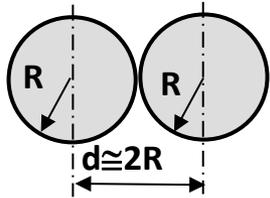
Campo magnético (B)



Linhas da intensidade do campo $H = B/\mu_0$, em A/m ($H = cte$).
 (Condutores paralelos percorridos por correntes iguais e de sentidos contrários. Método das imagens).

ANEXOS

Linha bifilar (2 fios)



BT < 1000 V (c.a.)

$$L_t = 2(L - M) \cong 0 \quad (d \cong 2R);$$

L – coeficiente de auto indução (H/m); M – coeficiente de indução mútua (H/m);

$X_{Lt} \ll R_c$ (resistência dos condutores);

Correntes de fuga pequenas (entre condutores), $i_f = dQ/dt$, $Q = CU$ (em BT).



1 < MT < 60 kV (c.a.)

$$L_t = 2(L - M) \cong 0 \quad (d > 2R);$$

$X_{Lt} \cong 4R_c$ (resistência dos condutores);

Correntes de fuga pequenas, $Q = C_{\downarrow} U^{\uparrow}$ (em MT).

AT ≥ 60 kV (c.a.)

$$L_t = 2(L - M) \cong 0 \quad (d \gg 2R);$$

$X_{Lt} \cong 4R_c$ (resistência dos condutores);

Correntes de fuga pequenas, $Q = C_{\downarrow\downarrow} U^{\uparrow\uparrow}$ (em AT).