



INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

CURSO

ENSAIOS ELÉTRICOS EM EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÕES E USINAS

UHE GOV. NEY BRAGA
COPEL – GERAÇÃO
15 – 19 de Setembro / 2003

Luis R. A. Gamboa
LACTEC / DPEL / UTAT

CURSO DE ENSAIOS EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (MÓDULO: ENSAIOS DE CAMPO)

1) Aspectos gerais

- **Características dos materiais. Condutores, quase condutores e dielétricos. Materiais Isolantes vs Dielétricos. Conceitos. Efeito da temperatura.**
- **Propriedades Elétricas: Resistividade, Permissividade, Condutividade, Constante dielétrica, Relaxação Dielétrica.**
- **Comportamento dos materiais com a frequência e a geometria do Campo Elétrico aplicado. Configurações de campo elétrico, aplicações em equipamentos.**
- **Classificação dos materiais Isolantes. Classe térmica. Temperatura do ponto mais quente.**
- **Capacitância. Correntes de Carga, Descarga, Deslocamento e Condução.**
- **Circuitos equivalentes da Isolação.**
- **Características dielétricas em CA e CC. Tangente Delta, Fator de Potência e Fator de Dissipação. Exemplo.**

2) Transformadores

- **FLUXOGRAMA DE DIAGNÓSTICO DO ESTADO GERAL DO TRANSFORMADOR
APLICABILIDADE DOS ENSAIOS DE CAMPO – CONVENCIONAIS OU ESPECIAIS – DIRETAMENTE
RELACIONADOS AOS DIVERSOS SINTOMAS E MECANISMOS DE FALHA**
- **Índice de Polarização, Relação de Absorção, Diagnóstico e cuidados na interpretação de resultados em transformadores (IEEE std 62-1995).**
- **Teor de umidade versus ensaios convencionais.**
- **Taxa de envelhecimento do papel impregnado.**
- **Isolação típica de transformador de distribuição. Distribuição de tensões em função dos materiais constituintes.**
- **Sistema papel-óleo. Equilíbrio da umidade vs temperatura. Eletrificação estática e Taxa de difusão da umidade. Cuidados de interpretação. Normas.**
- **Isolação entre espiras. Comentários.**
- **Polaridade. Conceito e métodos de ensaio.**
- **Relação de tensões – TTR**
- **Deslocamento angular. Diagrama vetorial de transformadores. Exemplos: Yy0, Yd1.**
- **Megohmímetro analógico. Circuitos Ground e Guard**
- **Medição de Resistência de Isolamento em transformador**
- **Ensaio de Fator de Potência. Circuitos Ground, Guard (frio e quente) e UST.**
- **Medição de Fator de Potência em transformador**
- **Cancelamento de interferências em medições no Campo. Método da chave inversora do Ensaio de Fator de Potência. Outros cuidados práticos para minimizar erros**
- **Medição da Resistência dos Enrolamentos. Cuidados com chaveamentos, indução, correção de valores. Decréscimo de R vs ensaios CA como lexc (Doble), TTR. Transição de tapes do comutador.**
- **Aterramento do núcleo. Falha da conexão/capacitâncias. Aterramento Múltiplo / T°.**

PROBLEMAS DE DESLOCAMENTO DE BOBINAS EM TRANSFORMADORES

- Esforços radiais entre enrolamentos. Forças axiais. Esforços entre espiras. Exemplos de deformações.
- Impedância de Curto-circuito. Conceito e Medição por fase, no campo.
- Corrente de Excitação. Medição, Interpretação de Resultados.
- Capacitância entre enrolamentos e entre BT e massa / núcleo. Análise de resultados. Cuidados na interpretação.
- Resposta a impulsos de Tensão.

ENVELHECIMENTO TÉRMICO DO PAPEL ISOLANTE.

- Evolução do conceito de fim-de-vida.
- Métodos de diagnóstico pontuais e globais. Resistência à Tração, Grau de Polimerização (GP), Furfural (2_{fal}), RVM.
- Instrumento de Ensaio de Tensão de Retorno (RVM).
- Processos de Polarização. Circuito Equivalente. Resultados típicos de ensaios. Efeitos da distribuição da umidade e da degradação do óleo isolante.
- Comparação entre RVM e outros ensaios dielétricos e com o GP
- Índice de Polarização vs Umidade do Papel, para diferentes temperaturas.
- Potência do transformador / Potência térmica / Valor de placa.
- Sobrecarga vs envelhecimento. Fatores limitadores.

3) Buchas

- Características construtivas
- Medição de Capacitâncias C1 e C2 e FP em buchas condensivas. Interpretação de resultados.
- Ensaio de Colar quente.
- Emprego de Colares Guard em buchas com superfície irregular ou contaminada.
- Sobrecargas admissíveis

4) Compatibilidade Eletromagnética em SEs.

- Cuidados na execução de ensaios
- Indução Eletrostática
- Indução Eletromagnética. Exemplo prático e cálculo.
- Cuidados com a instrumentação.
- Métodos de cancelamento de interferências na medição.

5) Geradores

- Materiais do Sistema de isolamento de máquinas. Degradação térmica.
- Controle do Estresse de Tensão.
- Descargas parciais em geradores.
- Polaridade das Descargas Parciais em função do tipo de defeito no Gerador.

- Efeito da Temperatura.
- Circuito de Ensaio e formas de onda típicas.
- Testes de detecção e mecanismos de falhas para diversos tipos de isolamento.
- Localização de curtos-circuitos entre espiras de bobinas polares de rotores, motores, etc.
- Ensaio de resposta a impulso. Ressonâncias série e paralelo. Circuito equivalente da isolamento. Exemplos de diagnóstico. Cuidados.
- Perdas Parasitas e efeito do número de condutores da barra. Exemplo.
- Tensão aplicada CC em geradores – “HY-POT”
- Detalhes do método, cuidados, discussão sobre aplicabilidade e limitações
- Levantamento de características em geradores
 - Ensaio de Saturação em Vazio
 - Levantamento Reta de Curto-circuito
 - Obtenção de parâmetros característicos a partir destes ensaios
 - Curva de Capacidade. Sobreexcitação → Transformadores.

6) Sistemas de Aterramento

- Conceito de Resistência de Aterramento. Parâmetros Concentrados e Distribuídos. Exemplo.
- Comportamento de Malhas em baixa frequência.
- Comportamento de Malhas durante descargas atmosféricas
- Comportamento de Malhas em função da geometria dos eletrodos.
- Configurações típicas e aplicações de Malhas para Sistemas de Geração, Distribuição e Telecomunicações. Aplicação de Malhas Perimetrais e Peninsulares em SEs.
- Medidor de Resistência de Terra “Megger de Terra”. Características e Operação
- Medição da Resistência de Aterramento.
- Áreas de Resistência Efetiva. Conceito.
- Método da Queda de Potencial. Método simplificado dos 62 %
- Aspectos de segurança para a execução do ensaio
- Limitações dos métodos convencionais.
- Método de Injeção de Altas Correntes. Aplicações, cuidados, limitações. Exemplo prático: SE Cascavel 525 kV / LT CEL- US SCX.
- Medição da Resistência de Pé de Torre de LTs.
- Medição da Resistividade do Solo. Método de Wenner. Outros métodos.
- Novos instrumentos: O Alicata Terrômetro. Características, principais aplicações, limitações, fontes de erro e possibilidades para malhas de SEs de pequenas dimensões.
- Comparação com o método de Queda de Potencial. Exemplo prático.

7) Reator Trifásico de Aterramento

- Impedância de Seqüência Zero. Conceito básico
- Medição de Z_0 no Campo e Cálculo.

8) TC's

- Ensaio de Saturação em TCs
- Conceitos básicos, roteiro de cálculo e interpretação dos resultados
- Normas aplicáveis e cuidados de execução.
- TC's de Bucha. Relação de Transformação. Cancelamento de interferências indutivas durante o ensaio em SE's energizadas.

10) Pára-raios

- Introdução. Evolução construtiva, materiais e principais mecanismos de avaria.
- Ensaio de Isolamento no campo
- Ensaio de Laboratório
 - Tensão de Referência
 - Corrente de Fuga
 - Tensão Residual
- Aplicação de Medidores de corrente de fuga, de pico e harmônicas em pára-raios de Óxido de Zinco, no campo.

11) Ensaio em Cabos e Muflas

- Tipos de isolamento sólida em cabos. Classificação
- Ensaio de Aceitação e Recebimento
- Corrente de fuga vs tensão
- Corrente de Fuga vs Tempo
- Interpretação de Resultados
- Esquema do ensaiador HI-POT.

12) Capacitores

- Medição da Capacitância. Determinação da Potência Reativa.
- Critérios de aceitação
- Isolamento total. Isolamento entre buchas

13) Disjuntores

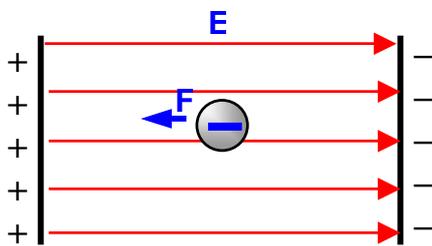
- Resistência de Contatos
- Isolamento CA, TLI em Disjuntores GVO.
- Medição de Tempos de Operação. Circuito de ensaio
- Tempos de: Abertura, Fechamento, Discordância de Pólos, Religamento, Curto-Circuito, deslocamento e velocidade dos contatos móveis.

EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

Conceito de Campo Elétrico:

Força sobre uma carga elétrica => E



$$F \propto E \cdot q$$

ALGUMAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ELÉTRICOS

Condutividade = σ [S/m] ==> esta propriedade está associada com a **Corrente de Condução** e a **Resistividade** ($\rho = 1/\sigma$)

Permissividade = $\epsilon = K \cdot \epsilon_0$ (com $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ [F/m]) ==> associada com a **Corrente de Deslocamento** (capacitância, carga/descarga, polariz., CA, FP)

Onde **K** é a **Constante Dielétrica** (ou **Permissividade Relativa** ϵ_r)

Quanto à resposta no tempo

O comportamento do material é definido pela relação $\sigma / \omega \epsilon$ [adimensional]

Onde ω = **Freqüência angular** = $2 \cdot \pi \cdot f$ (**excitação periódica**)

CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ELÉTRICOS

Se $\sigma \gg \omega\varepsilon$ (pelo menos 100 vezes maior) o material é **Condutor**

Se $\omega\varepsilon \cong \sigma$ então o material é **Quase Condutor**

Se $\sigma \ll \omega\varepsilon$ (pelo menos 100 vezes menor) o material é **Dielétrico**

Exemplo: Solo Rural com Resistividade (ρ) = 100 [$\Omega \cdot m$]

$$\sigma = 1 / \rho = 1 / 100 = 0,01 \text{ [S/m];}$$

$$\varepsilon_r (K) = 14 \Rightarrow 14 \times \varepsilon_0 = 14 \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

para $f = 1 \text{ kHz}$

$$\sigma / \omega\varepsilon = 0,01 / (2\pi \times 1000 \times 14 \times 8,85 \times 10^{-12}) \cong 13000 \Rightarrow \text{Condutor}$$

$$\text{para } 10 \text{ MHz} \Rightarrow \sigma / \omega\varepsilon = 1,3 \Rightarrow \text{Quase condutor}$$

$$\text{para } 30 \text{ GHz} \Rightarrow \sigma / \omega\varepsilon = 0,00043 \Rightarrow \text{Dielétrico}$$

Água Doce: Até 1 kHz --> Condutora Acima de 10 MHz --> Dielétrica

Água Salgada: Até 10 MHz --> Condutora Acima de 10 GHz --> Dielétrica

ISOLANTES e DIELÉTRICOS

- a) A característica Isolante está relacionada com a habilidade de limitar o fluxo da Corrente. Está relacionada com a Resistividade do Material a as características do campo elétrico.
- b) Um material dielétrico deve também ser um meio isolante, mas suas propriedades são descritas por sua constante dielétrica, rigidez dielétrica, absorção dielétrica e fator de potência.
- c) Portanto, como um dielétrico deve possuir algumas propriedades de um isolante, e vice-versa, ambos termos costumam ser usados indistintamente.
- d) A propriedade isolante está mais associada à função que o material deve atender para uma dada situação.
- e) Assim, um dielétrico com diferentes espessuras, ou usado em diferentes temperaturas, frequências ou intensidade de campo elétrico, poderá ser ou não um isolante adequado.

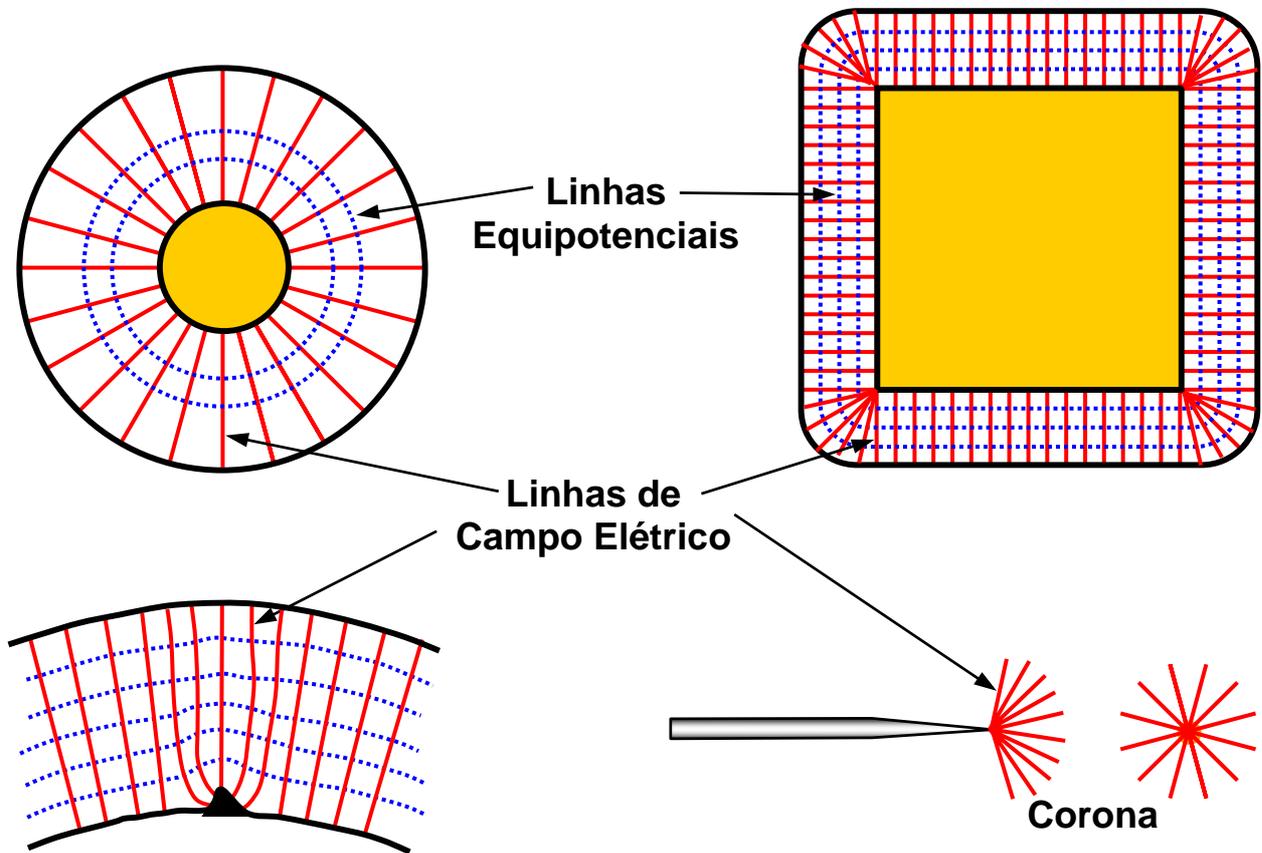
CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ISOLANTES

CLASSE TÉRMICA	T° DO PONTO MAIS QUENTE (° C) *	MATERIAIS OU COMBINAÇÃO DE MATERIAIS
O	90	Algodão, Seda e Papel não impregnados
A	105	Algodão, Seda e Papel adequadamente impregnados, envolvidos ou imersos em dielétrico líquido (Óleo)
B	130	Mica, Fibra de vidro, Asbesto, etc., com substâncias aglutinadas adequadas para operação com 130 °C
F	155	Mica, Fibra de Vidro, Asbesto, etc., com substâncias aglutinadas adequadas para operação com 155 °C
H	180	Elastômero de Silicone, Mica, Fibra de vidro, Asbesto, etc., com substâncias aglutinadas adequadas tais como resinas e outros materiais com capacidade de operação em 180 °C
—	220	Materiais em que a experiência ou os testes de aceitação mostrem que são adequados para operar a 220 °C
C	Acima de 220	Isolação que consiste inteiramente de mica, porcelana, vidro, quartzo ou materiais orgânicos similares capazes de operar com temperaturas acima de 220 °C

* Obs.: A **temperatura do ponto mais quente** é o valor com que os materiais de cada classe de temperatura podem operar continuamente sem apresentar degradação indevida.

Algumas configurações de Campo Elétrico

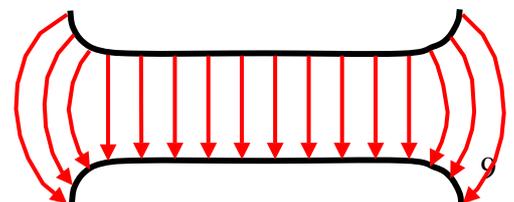
Campo Elétrico: Intensidade e Geometria



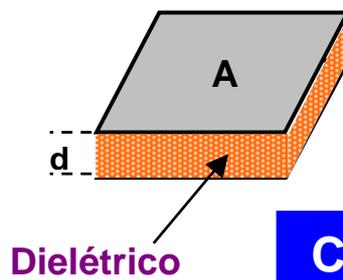
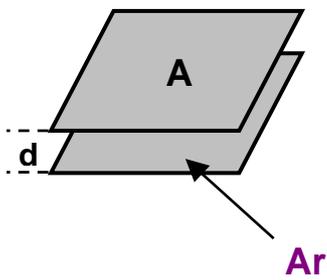
O Campo Elétrico numa região é proporcional ao número de linhas / cm^2



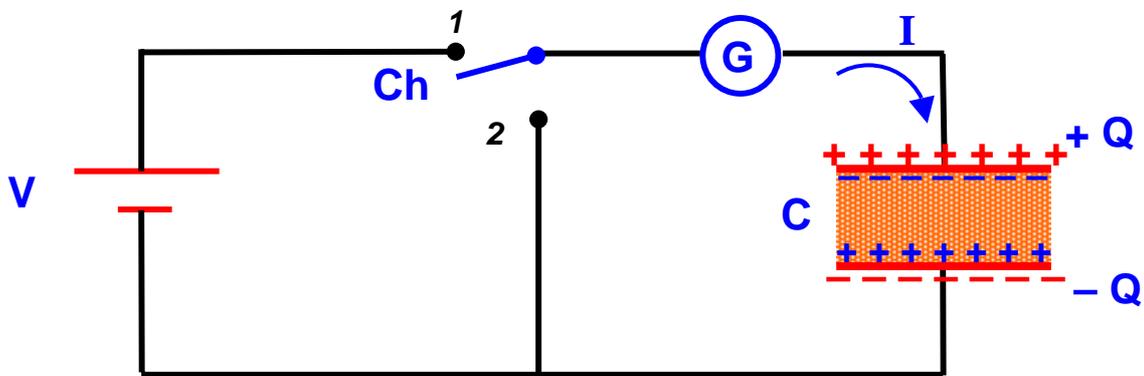
As linhas que representam o Campo Elétrico são perpendiculares aos eletrodos da fonte. Não há componente tangencial à superfície dos eletrodos em condições estáticas.



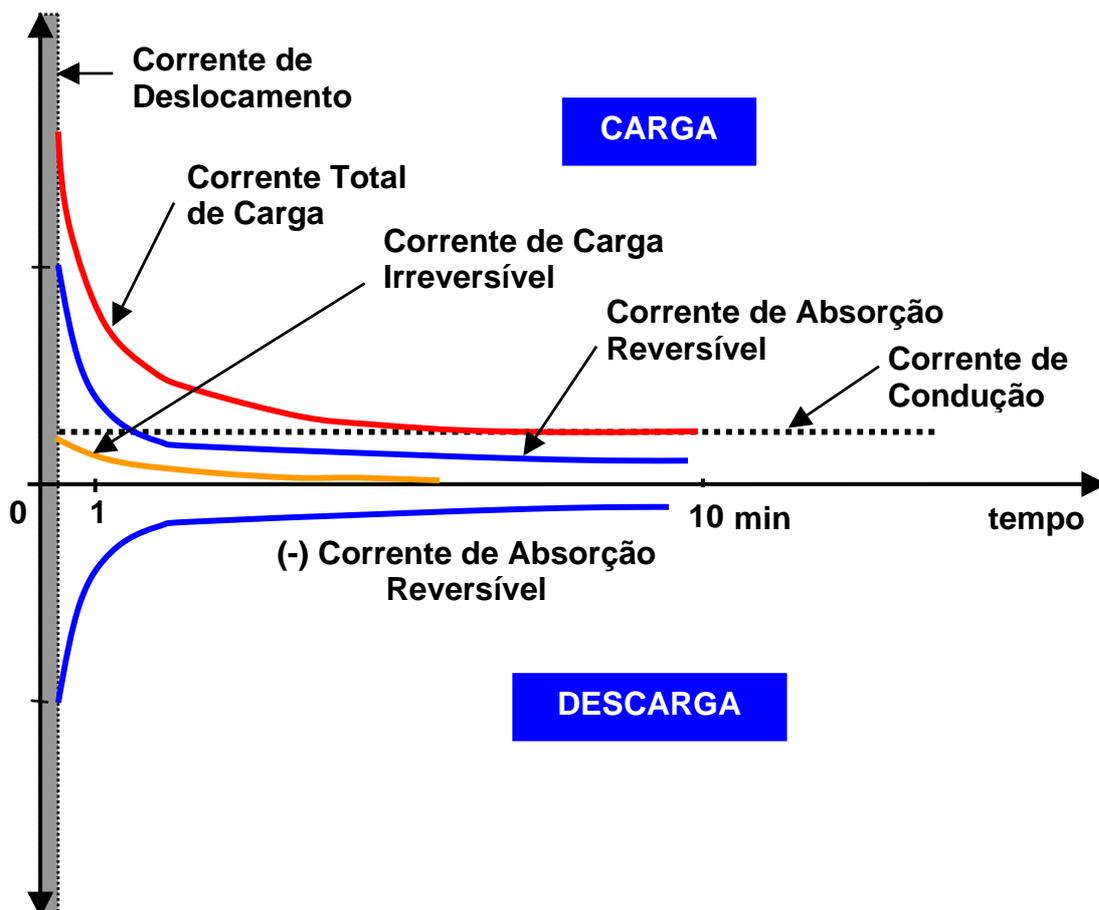
DIELÉTRICOS – CONCEITOS BÁSICOS



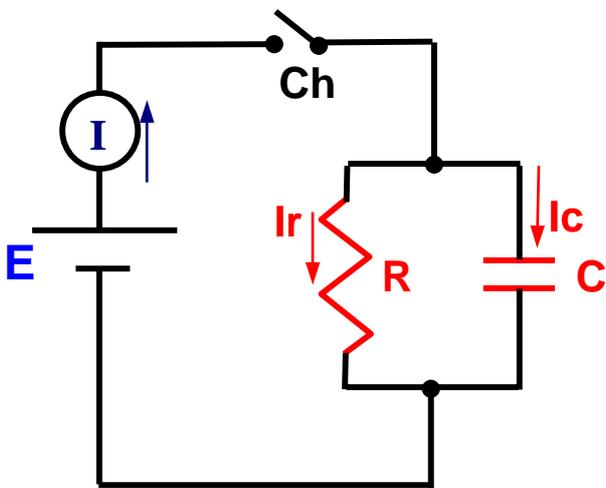
$$C = A K \epsilon_0 / d$$



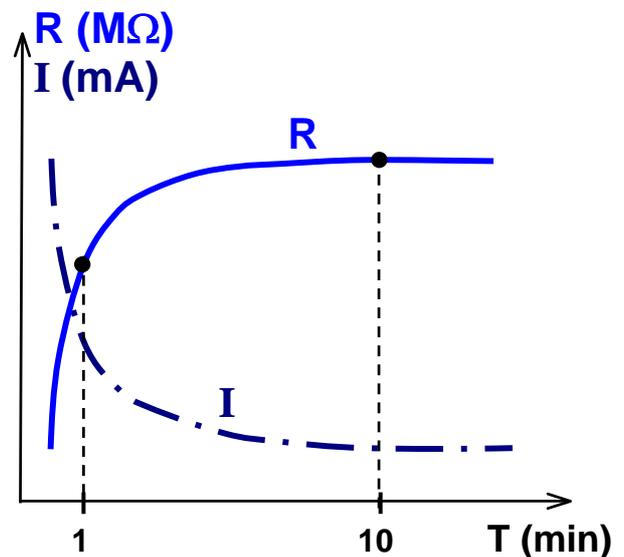
$$C = Q / V = I \cdot t / V$$



MEDIDAS DIELÉTRICAS EM DC (RI, IP, RA)



Circuito de ensaio



A Resistência de Isolamento (isolação?) é variável no tempo. Costuma estabilizar antes de 10 minutos em isolações mais comuns, como papel-óleo

A Resistência de Isolamento, RI, depende da temperatura da isolação. No caso de transformadores, considera-se que seu valor cai para a metade a cada 10° de aumento na temperatura. Os valores costumam ser referidos para 75°C.

Relação de Absorção, $RA = R_{1min} / R_{15seg}$

Índice de Polarização, $IP = R_{10min} / R_{1min}$

A análise de resultados é comparativa, ao longo da vida do equipamento, e dos equipamentos da mesma família.

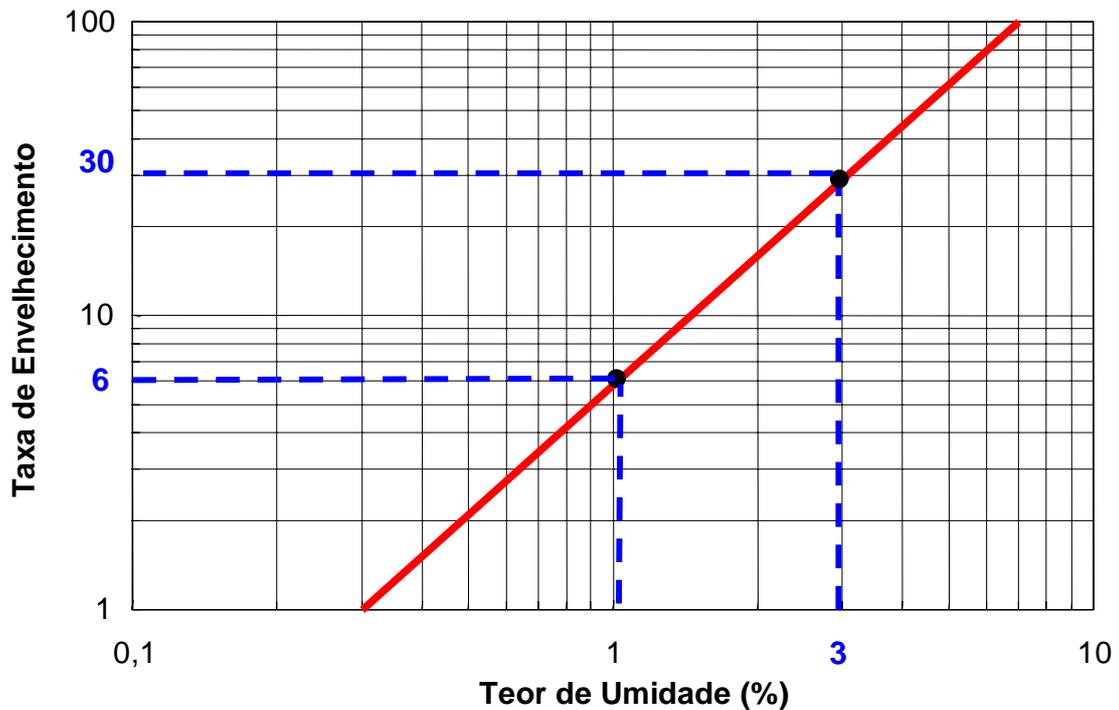
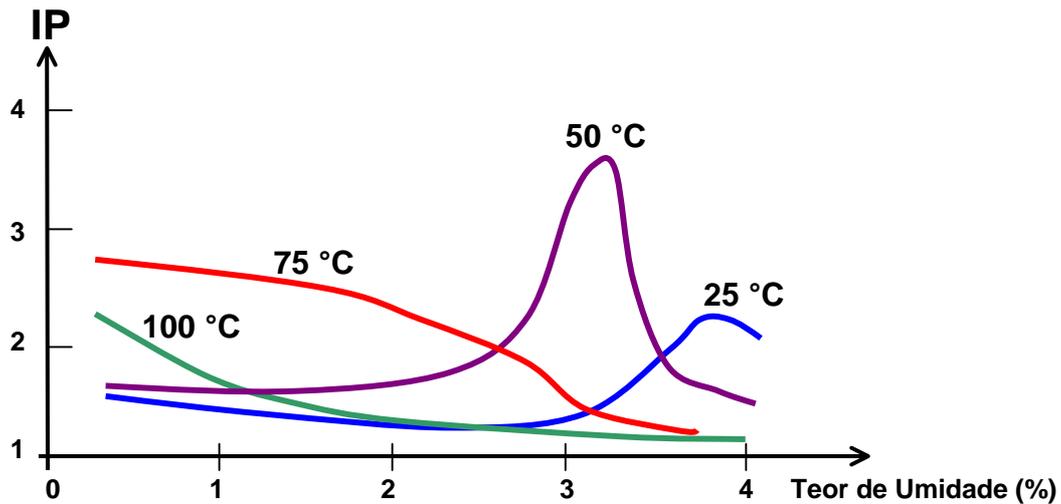
RA (R_{1min} / R_{15s})	IP (R_{10min} / R_{1min})	Condição da Isolação
< 1	< 1	Pobre
1 – 1,4	1 - 2	Questionável
1,4 – 1,6	2 - 4	Aceitável
> 1,6	> 4	Bom

Tabela orientativa para diagnóstico da Isolação de Transformadores

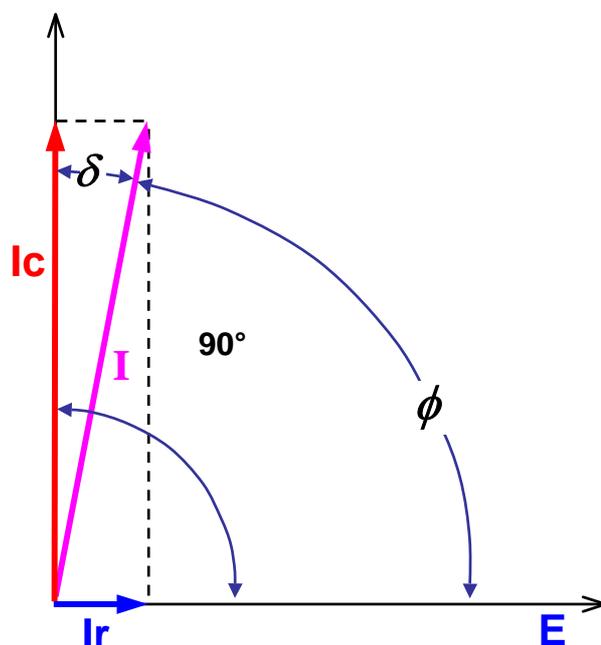
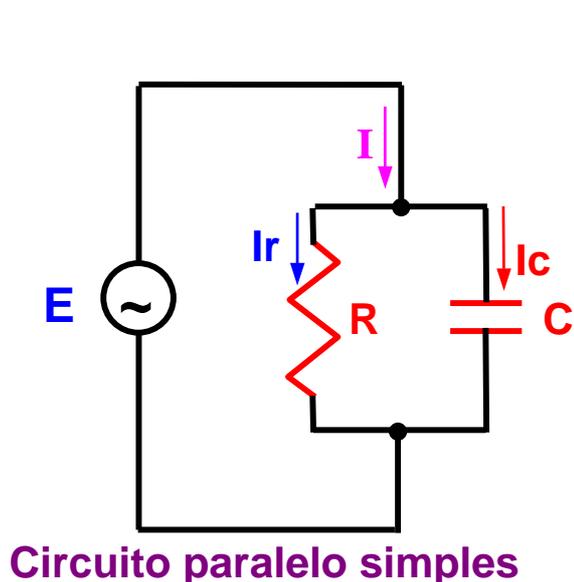
Alguns cuidados na interpretação de resultados

Para transformadores pequenos, o IP é próximo de 1 (IEEE std 62-1995)

Estudos comparativos entre RI, IP, FP e outros têm sido realizados recentemente. O teor de umidade da isolação também hoje está sendo considerado.



CARACTERÍSTICAS DIELÉTRICAS EM CA



F. D. - Fator de Dissipação = I_r / I_c

F. P. - Fator de Potência = $\cos \phi = I_r / I$

Exemplo:

$$\delta = 10^\circ \implies \phi = 90 - 10 = 80^\circ \quad \left\{ \begin{array}{l} \tan 10^\circ = 0,1763 \\ \cos 80^\circ = 0,1736 \end{array} \right.$$

Num caso mais prático de isolamento, para $\cos \phi = 4,00\%$ a $\tan \delta = 4,003 \%$

Então, para ângulos pequenos entre I_c e I : **F. P. ($\cos \phi$) $\cong \tan \delta$**

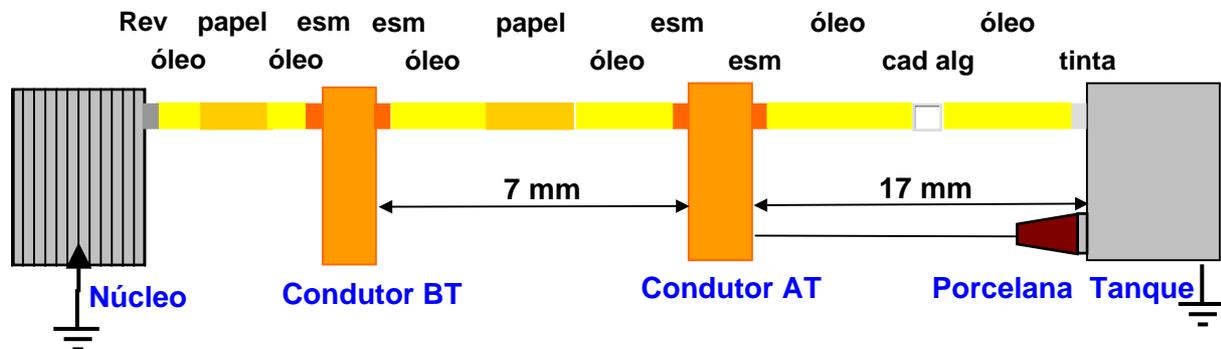
O Fator de Potência varia com:

- ♦ a temperatura (valores são referidos, normalmente a 20 °C)
- ♦ a umidade (nem sempre de forma sensível ou conhecida)
- ♦ a frequência (método $\tan \delta$ vs frequência)

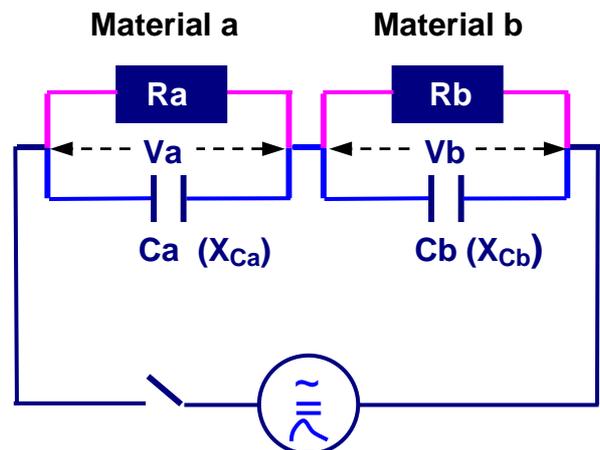
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO

(ISOLAÇÃO TÍPICA)

DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO APLICADA EM DIELÉTRICOS EM SÉRIE



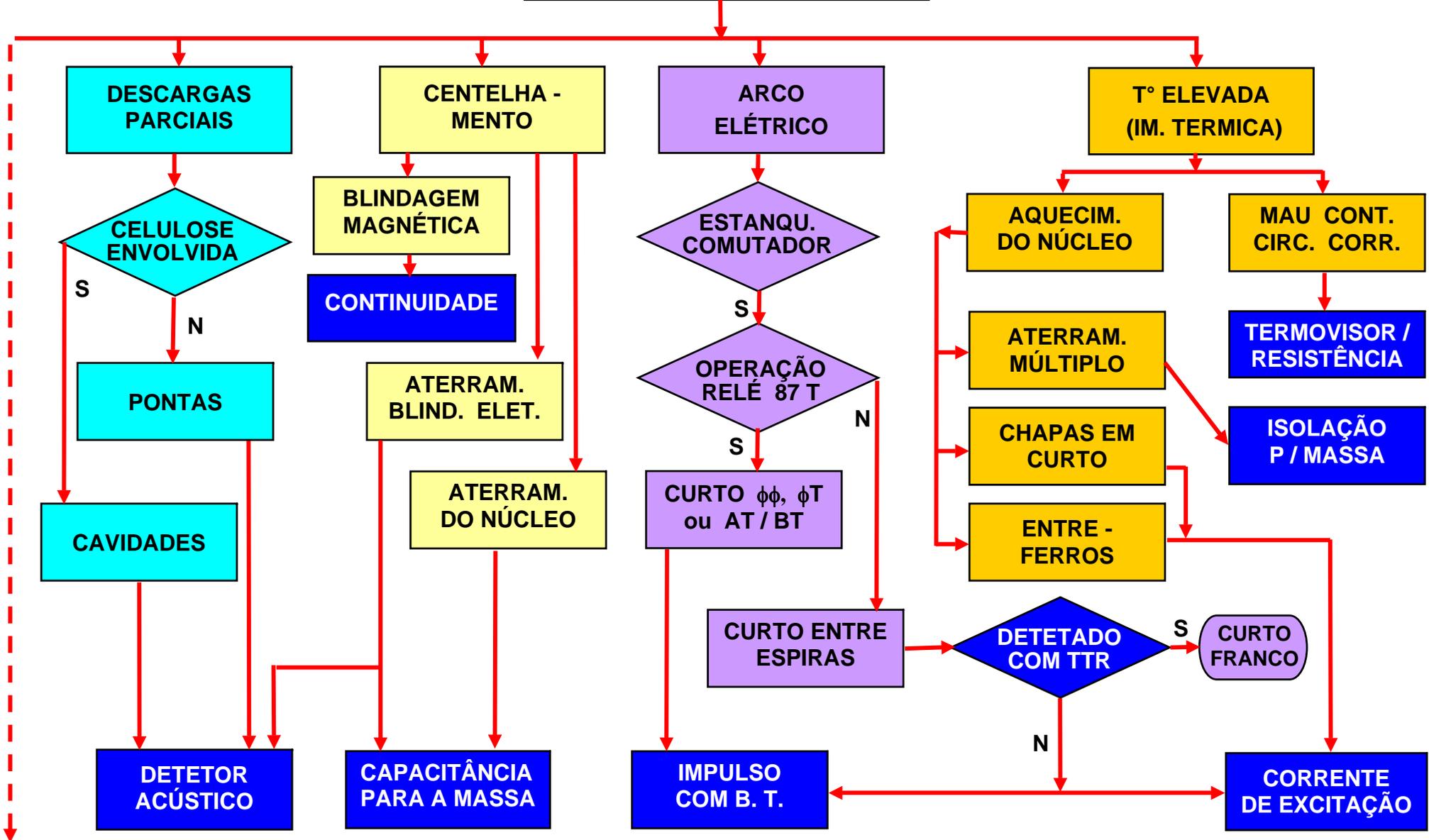
Esmalte $\cong 0,080$ mm
 Cilindro de Papel AT-BT $\cong 3,5$ mm
 Cilindro de Papel Núcleo-BT $\cong 2$ mm
 Cadarço $\cong 0,3$ mm
 Condutor AT $\cong 1$ mm
 AT - BT $\cong 10$ mm
 Óleo AT-BT $\cong 6$ mm
 BT e núcleo $\cong 2 - 13$ mm
 Tinta $\cong 10^{17}$ $\Omega \cdot \text{cm}$ (espessura $\cong 80$ μm)
 Papel (parafinado) $\cong 10^{18}$ $\Omega \cdot \text{cm}$
 Óleo isolante $\cong 10^{12}$ a 10^{15} $\Omega \cdot \text{cm}$
 Revestimento chapas: ≥ 100 Ω / cm^2 / lâmina
 Resistividade chapas : 50 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ (6 μm /face)



- NOS ENSAIOS COM DC, PRATICAMENTE TODA A TENSÃO FICA NO PAPEL IMPREGNADO COM ÓLEO. A TENSÃO SE DIVIDE EM FUNÇÃO DAS ESPESSURAS E RESISTIVIDADES DOS MATERIAIS. A INFLUÊNCIA DO ESMALTE USADO NA ISOLAÇÃO ENTRE ESPIRAS, PORTANTO, É DESPREZÍVEL, NESTES ENSAIOS.**
- NOS ENSAIOS EM CA, A TENSÃO FICA DISTRIBUÍDA EM FUNÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS (PERMISSIVIDADES E ESPESSURAS) DOS MATERIAIS, ESPECIALMENTE EM ALTAS FREQUÊNCIAS.**
- EQUILÍBRIO DE UMIDADE DO SISTEMA ÓLEO-PAPEL VS T°**
- ELETRIFICAÇÃO ESTÁTICA. TAXA DE DIFUSÃO. ESPESSURAS...**
- CURTO-CIRCUITO DO ENROLAMENTO SOB TESTE E ISOLAÇÃO ENTRE ESPIRAS. (ENSAIOS DE TENSÃO INDUZIDA, IMPULSO...)**

FLUXOGRAMA 1

GASCROMATOGRAFIA e ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS NO ÓLEO ISOLANTE



FLUXOGRAMA 2

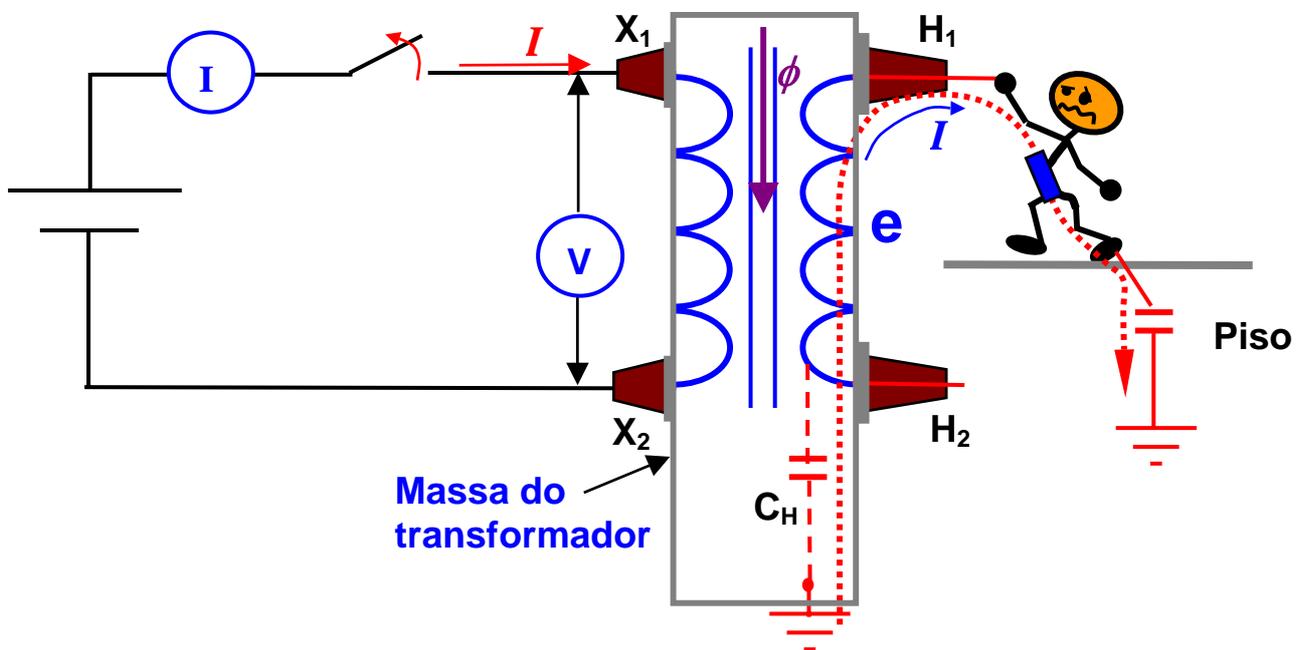


CUIDADOS NA EXECUÇÃO DE ENSAIOS – CEM EM SEs

Indução Eletromagnética em SEs ($e = d\phi/dt$)

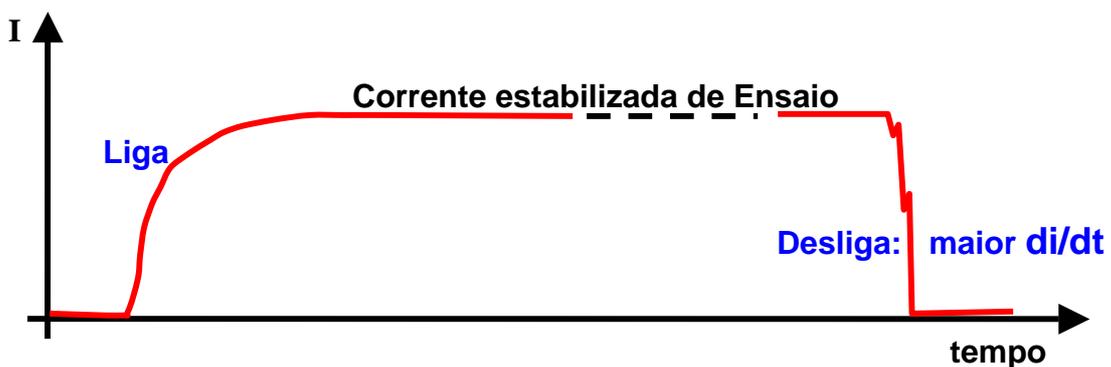
a) Chaveamento de circuito indutivo. Medição da Resistência Ôhmica de Enrolamentos

$$e = d\phi/dt \times N$$

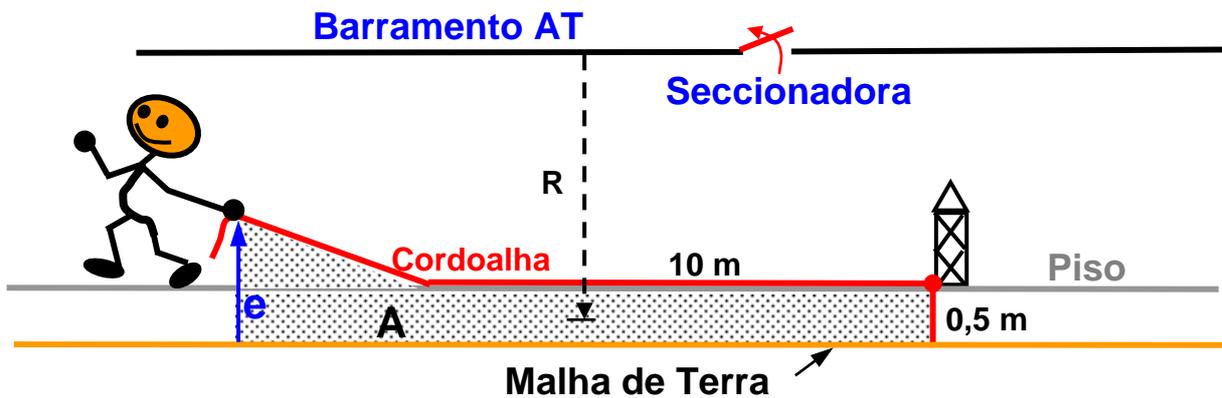


Cuidados adicionais com a instrumentação

Desligar o voltímetro (ou galvanômetro, no caso de empregar ponte) antes de chavear a fonte de corrente.



Ligação longa de cordoalha de aterramento no instrumento de ensaio



Área do Loop cordoalha – conexão – malha: $\sim 6 \text{ m}^2$

$R = 7$ metros; Surto de manobra: $I_{\text{pico}} = 1000 \text{ A}$; 10 MHz

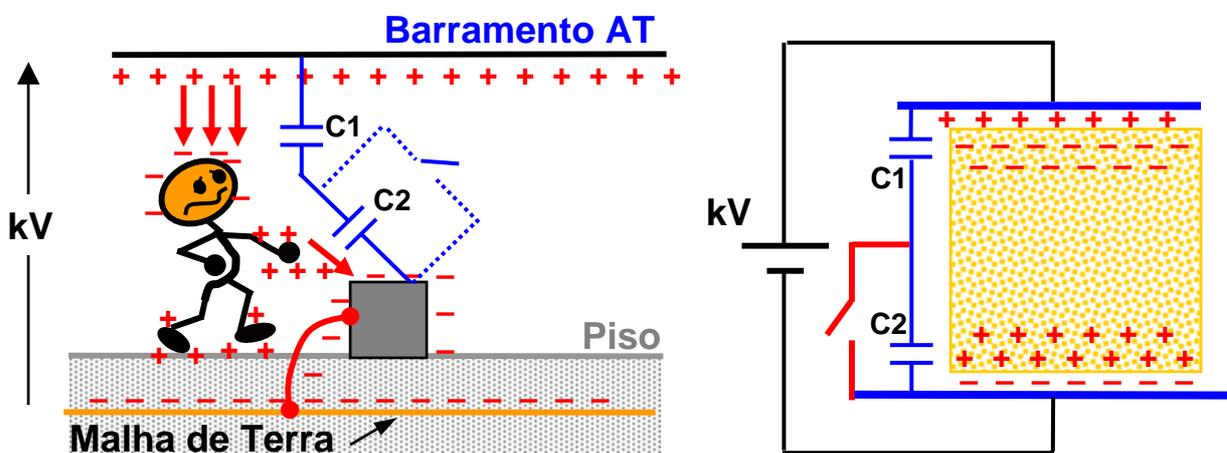
$T = 0,1 \mu\text{s} \Rightarrow$ Rampa $0,1 / 4 = 0,025 \mu\text{s} \Rightarrow di/dt = 40 \times 10^9 \text{ A/s}$

$e = d\phi/dt = (dB/dt) \times A = (dH/dt) \times \mu_0 \times A = (di/dt) \times \mu_0 \times A / (2\pi \times R)$

$e = 40 \times 10^9 \times 4 \pi \times 10^{-7} \times 6 / (2\pi \times 7) \text{ [V]} = 40 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-7} \times 6 / 7 \text{ [V]}$

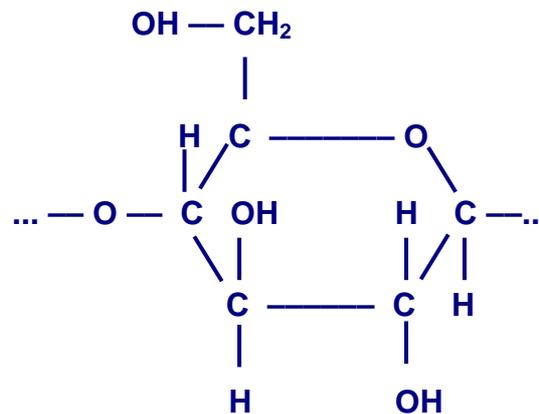
$$e_{\text{pico}} \cong 6,9 \text{ kV}$$

c) Indução Eletrostática (Descarga por Acoplamento Capacitivo)



Envelhecimento Térmico do Papel Isolante

Material: celulose, um composto orgânico polimérico, cujas moléculas consistem em longas cadeias de anéis de glicose (monômeros). Resistência mecânica é proporcional ao comprimento das cadeias.



MOLÉCULA DA GLICOSE

Grau de Polimerização (GP): Número médio de anéis de glicose na molécula. Tipicamente varia entre 1000 e 1400 para um papel novo.

Devido aos processos de secagem em fábrica, o GP da isolação de um transformador é menor que em papel novo e não é raro especificar um valor mínimo de 800.

GP na faixa de 100 a 250 serve como critério de fim-de-vida.

Mecanismos de envelhecimento: *hidrólise*, *oxidação* e *pirólise*
(água) (oxigênio) (calor)

CONSEQÜÊNCIAS DESTES 3 MECANISMOS:



Envelhecimento Térmico do Óleo Isolante

Durante a fase inicial de oxidação dos óleos isolantes são formados compostos polares não-ácidos, tais como álcoois, aldeídos, cetonas, etc. À medida que o processo avança, formam-se **ácidos e borra** : ==> **FIM-DE-VIDA DO ÓLEO ISOLANTE**.

Com a borra, o transformador sofre aquecimento adicional. a) pela **obstrução** que a borra promove nos canais da circulação de óleo dos enrolamentos e nos radiadores; b) **a borra é um bom isolante térmico**.

Para garantir a qualidade do óleo isolante, é comum a adição de inibidores que retardam a velocidade do processo de oxidação, além da realização de tratamentos periódicos.

Métodos invasivos – pontuais

- ◆ **A Resistência à Tração, Grau de Polimerização – GP**
- ◆ **Alternativa (atualmente usada): Colocação de tiras de papel em transformadores de força novos. (Técnica apenas orientativa).**

Métodos não invasivos – globais

◆ **Furfural (2_{Fal})**

O 2_{Fal} é o mais representativo de uma família de furfuraldeídos que resultam especificamente da degradação do papel. Representa o comportamento global, a partir da amostra de uma pequena quantidade de óleo do transformador.

Há estudos que correlacionam o GP com o 2_{Fal} .

Sua análise inicialmente era feita em função de sua concentração no óleo, com a relação $mg_{2_{Fal}} / l_{ÓLEO}$ [ppm]. Mais recentemente, a relação considerada mais significativa é a concentração de 2_{Fal} com relação à massa de papel do transformador, ou seja, $mg_{2_{Fal}} / kg_{PAPEL}$ [ppm].

Atualmente, o 2_{Fal} é incluído nos diagnósticos de fim-de-vida de transformadores de potência das principais concessionárias.

Não se aplica diretamente aos casos em que o óleo do transformador tenha sido filtrado ou substituído.

- ◆ **Tensão de Retorno – RVM (sigla de Recovery Voltage Meter)**

ENSAIO DE TENSÃO DE RETORNO (Espectro de Polarização)

Processos de Polarização – aspectos gerais

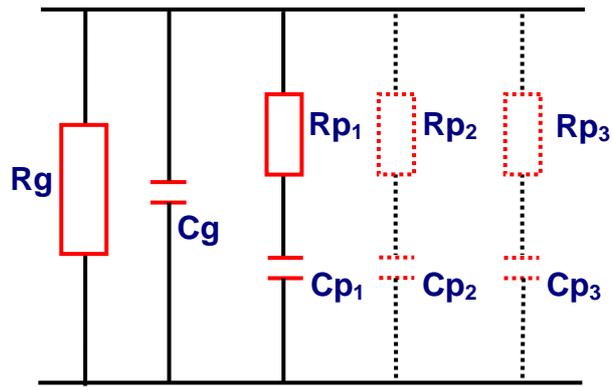
Alguns processos de polarização dependem somente da orientação de cargas no campo elétrico aplicado (processos elásticos, sem perdas, extremamente rápidos, da ordem de 10^{-14} s).

Outros, como é o caso da polarização interfacial (quando mais de um material isolante está na presença do campo externo) são mais lentos porque sua resposta envolve o deslocamento de cargas até a região de fronteira dos materiais envolvidos. No caso, papel e óleo isolante. O tempo em que o processo se dá depende da permissividade e resistividade dos materiais que formam este “sanduíche dielétrico”. Este é um processo que apresenta perdas.

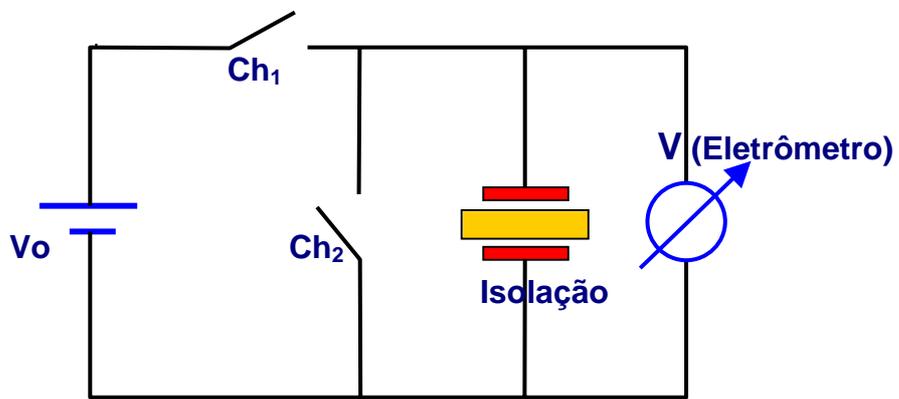
Com a umidade, a capacitância de polarização aumenta várias vezes, porém a resistência diminui centenas de vezes de modo que o tempo de relaxação ($\tau = R_p C_p$) é reduzido sensivelmente, acelerando a resposta deste processo. Em termos práticos, um aumento de 1% no teor de umidade do papel pode acelerar a resposta em mais de 10 vezes.

O tempo de resposta depende também da temperatura da isolação, que acelera a mobilidade das cargas elétricas e, portanto, os processos de polarização nos materiais isolantes. Desta forma, os valores deste ensaio são referidos à temperatura de 20 °C.

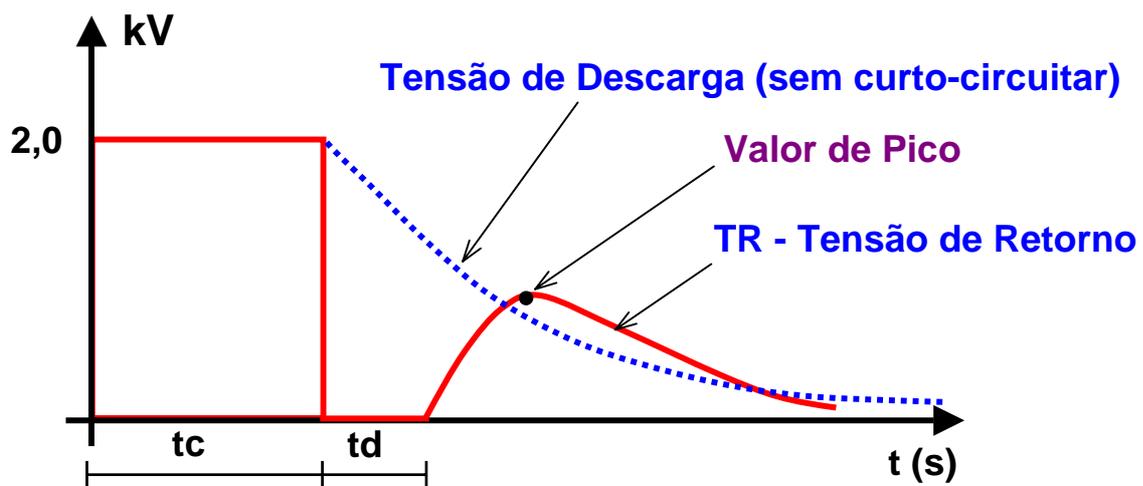
Para uma determinada frequência de excitação e temperatura do material, ocorrerá ressonância. Nos processos com perdas, esta frequência representa um valor de pico para as perdas.



CIRCUITO EQUIVALENTE DA ISOLAÇÃO

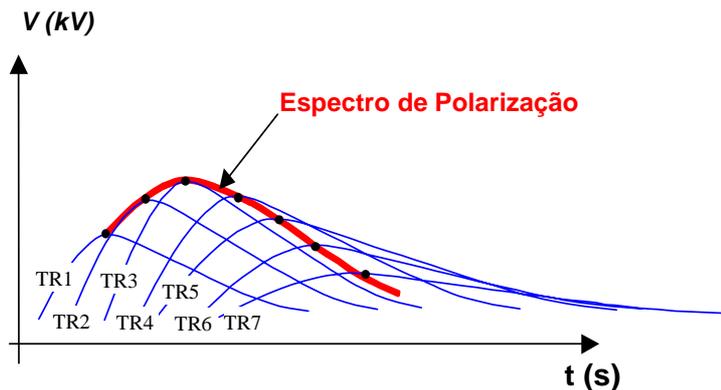


CIRCUITO DE ENSAIO



DESENVOLVIMENTO DA TENSÃO DE RETORNO

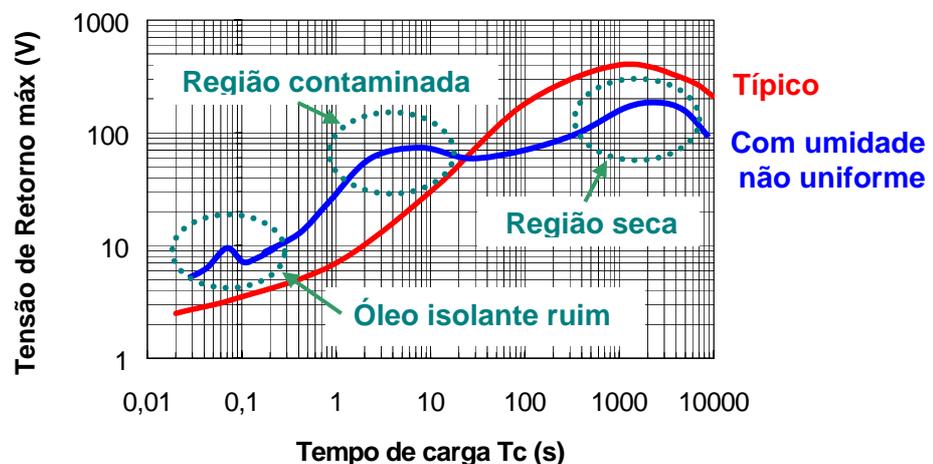
Repetindo este procedimento para vários tempos de carga e mantendo-se uma relação $t_c/t_d=2$, obtém-se uma família de curvas de tensão de retorno. A envoltória dos picos é chamada de Espectro de Polarização. O pico desta envoltória representa uma resposta global dominante para a isolação e também um determinado teor de umidade.



ESPECTRO DE POLARIZAÇÃO E TENSÕES DE RETORNO

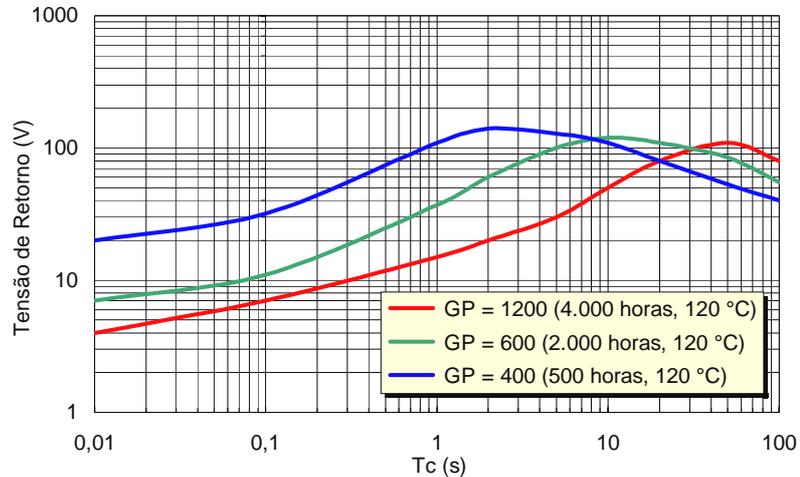
Quando a superfície isolante é exposta à umidade ambiente aparece um segundo pico. O método permite avaliar a qualidade dos processos de manutenção e recuperação de transformadores, onde a isolação fica exposta ao ambiente por tempo prolongado.

Um pico extra na região mais rápida é indicativo óleo isolante ruim.



ESPECTRO DE POLARIZAÇÃO TÍPICO DE UM TRANSFORMADOR

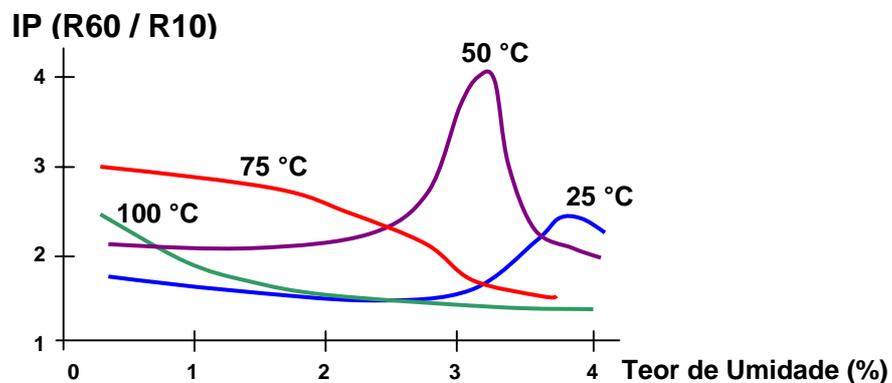
Tensão de Retorno vs Grau de Polimerização



ENVELHECIMENTO ACELERADO DE PAPEL KRAFT A 120°C (TENSÃO DE RETORNO A 60°C)

RVM vs OUTROS ENSAIOS DIELÉTRICOS

Os ensaios de RI, IP, $\text{tg } \delta$ (60 Hz) e $\text{tg } \delta$ (0,1 mHz ~ 1 kHz) são pouco sensíveis para teores de umidade inferiores a 1%, cuja resposta dominante é da ordem de centenas de segundos (sistema papel-óleo). Em 60 Hz, não há tempo suficiente para observar estes processos.

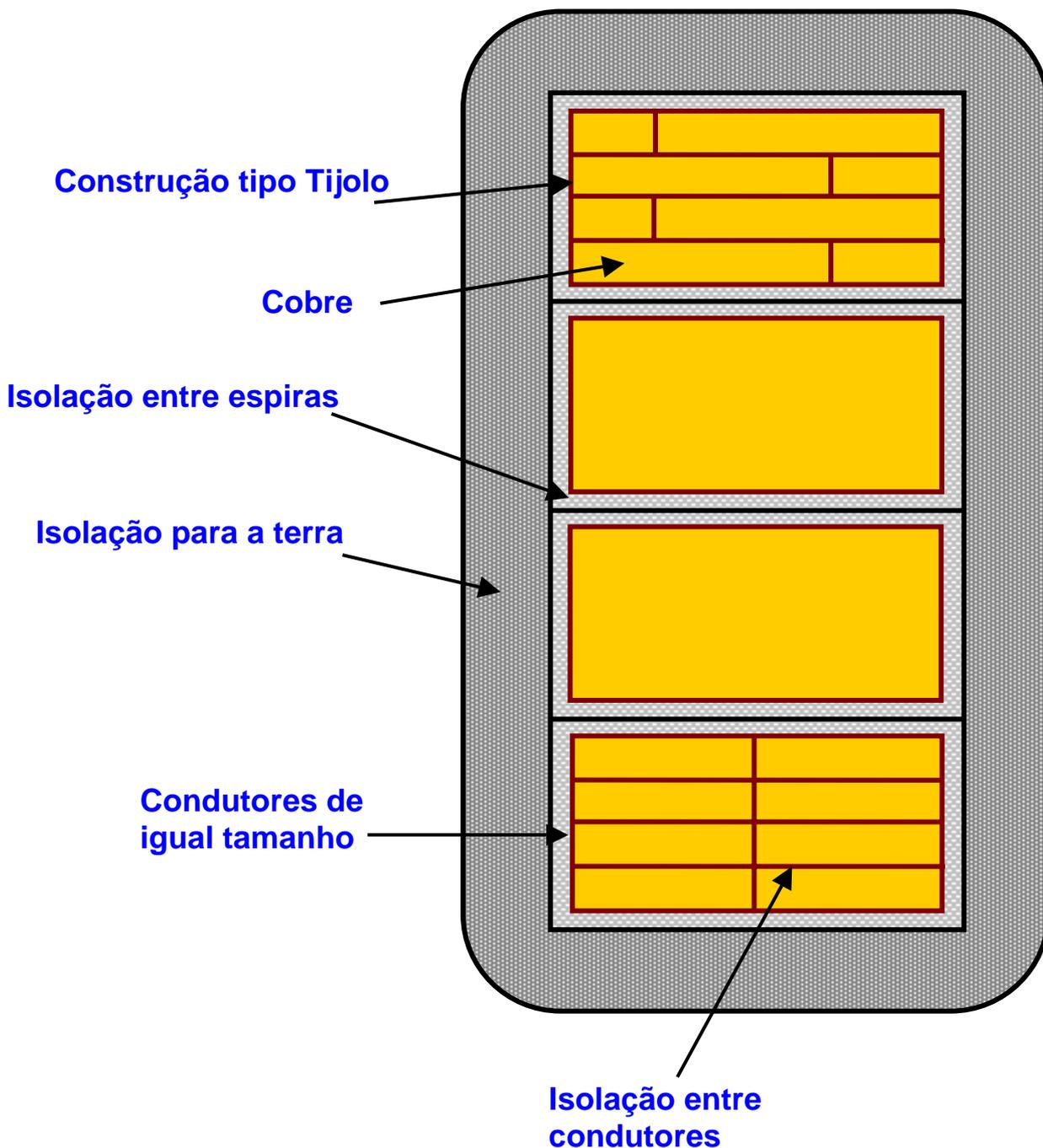


IP vs Teor de Umidade do Papel, para várias temperaturas

GERADOR

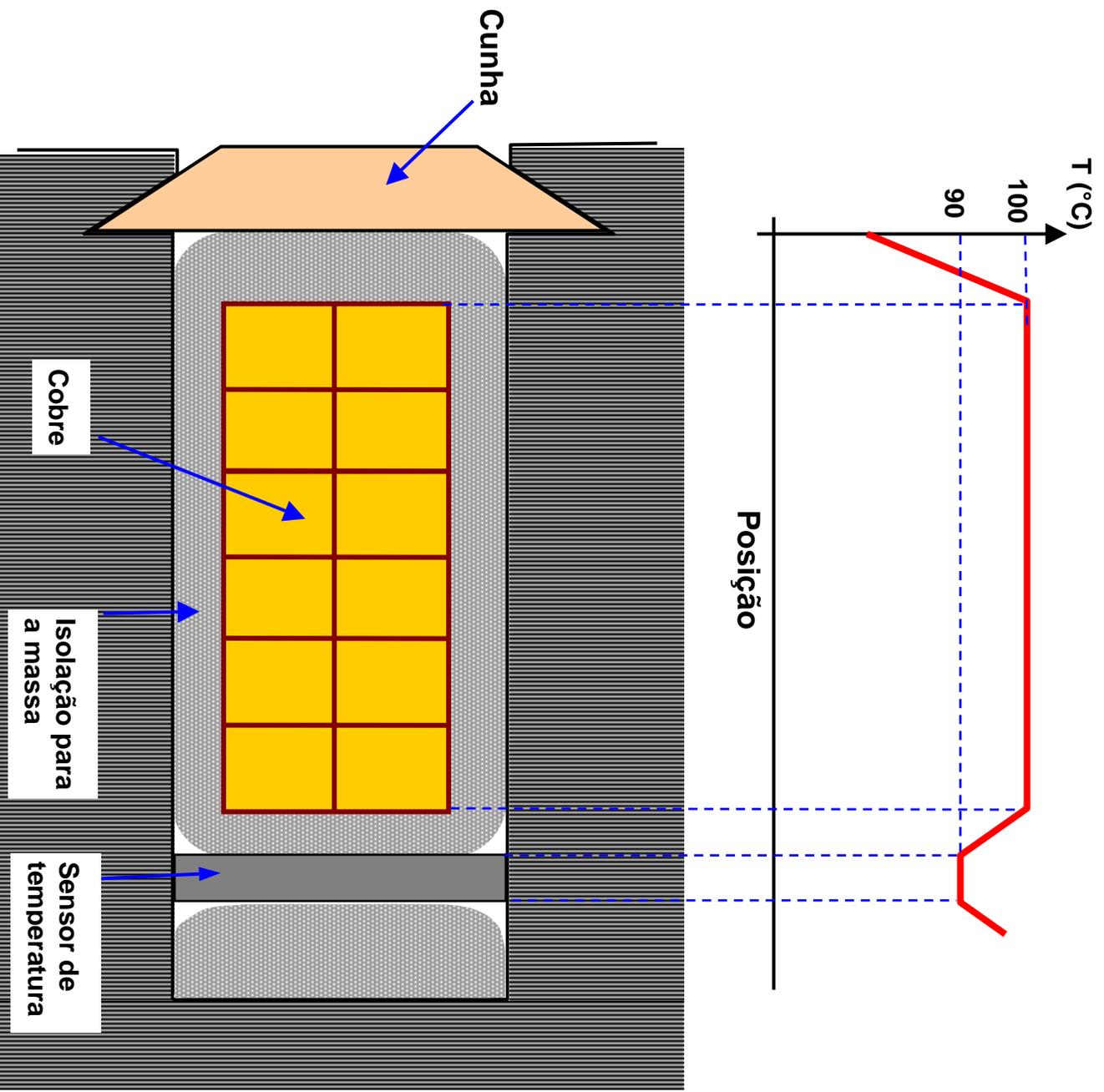
COMPONENTES DO SISTEMA DE ISOLAÇÃO

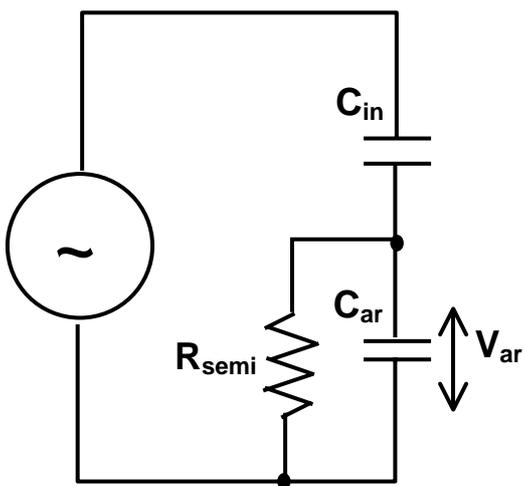
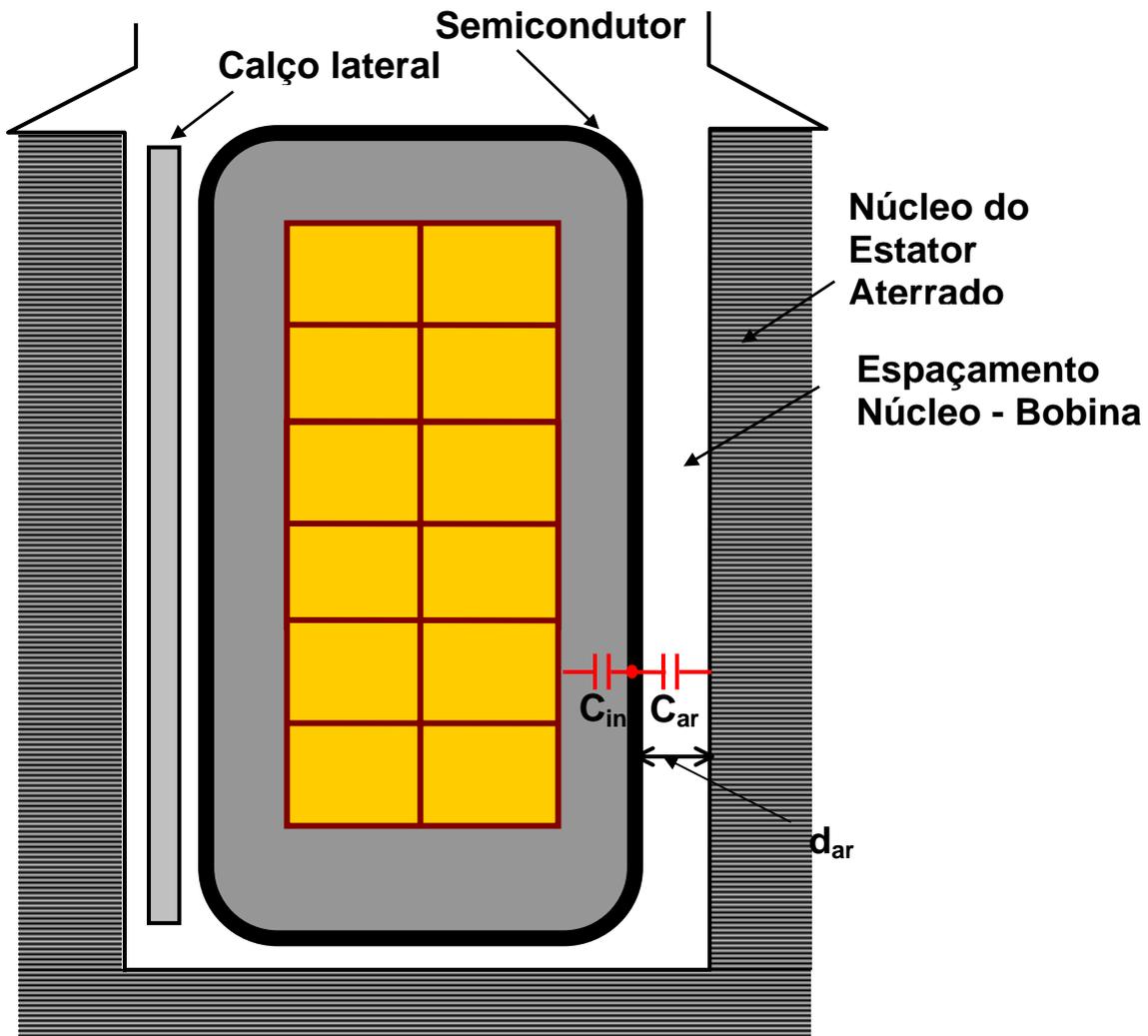
- ISOLAÇÃO ENTRE CONDUTORES
- ISOLAÇÃO ENTRE ESPIRAS
- ISOLAÇÃO PARA A TERRA
- CAMADA SEMICONDUTIVA (GRAFITE)
- CAMADA CARBETO DE SILICIO



DEGRADAÇÃO TÉRMICA

- Perda de Rigidez mecânica por aquecimento prolongado
- Afrouxamento da isolamento entre camadas, vibração de condutores, falhas por descargas parciais que levam facilmente a falhas na isolamento para a massa.
- Sobreaquecimento devido a sobrecarga, falha na refrigeração, correntes de *inrush*, desbalanceamento de tensões, problemas de dimensionamento.

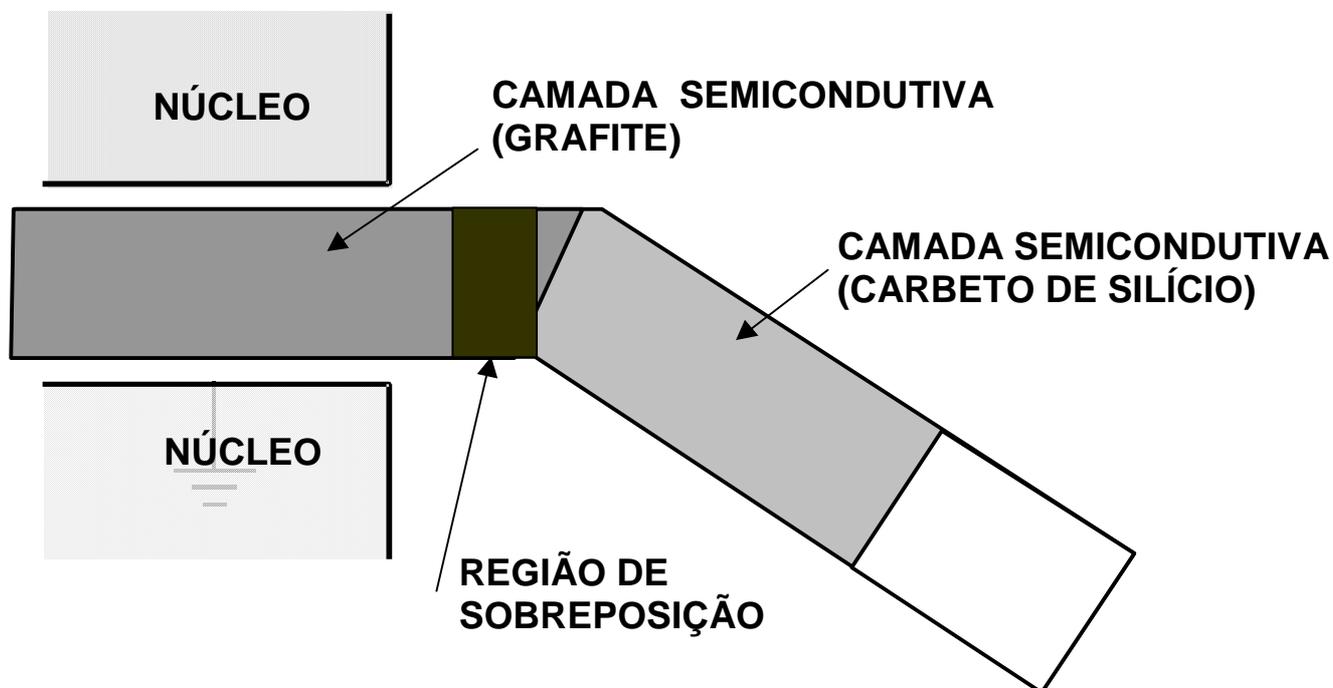




Quando $E_{ar} = \frac{V_{ar}}{d_{ar}} > 3 \text{ kV/mm}$

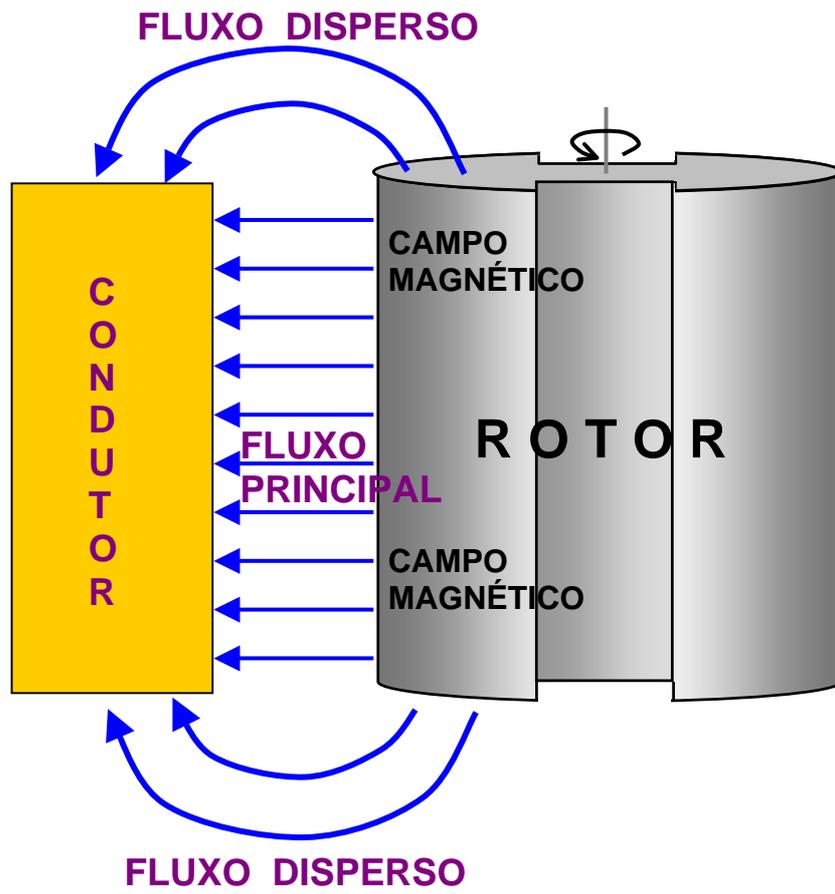
\implies Ocorrem Descargas Parciais

CONTROLE DO ESTRESSE DE TENSÃO

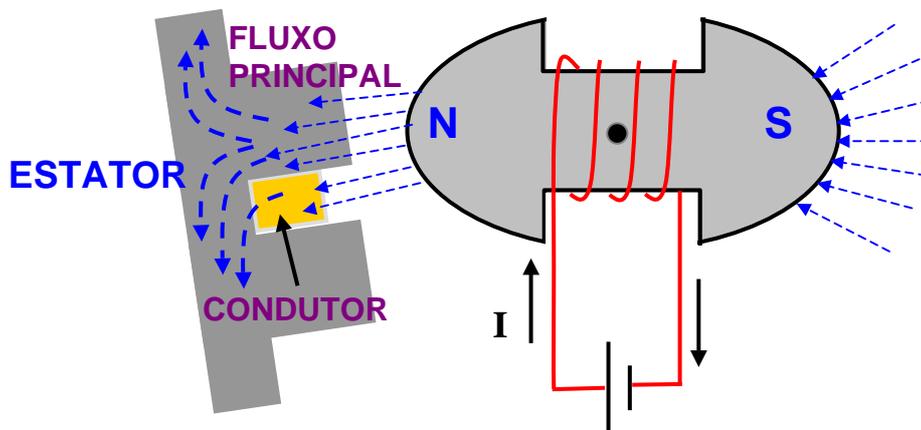


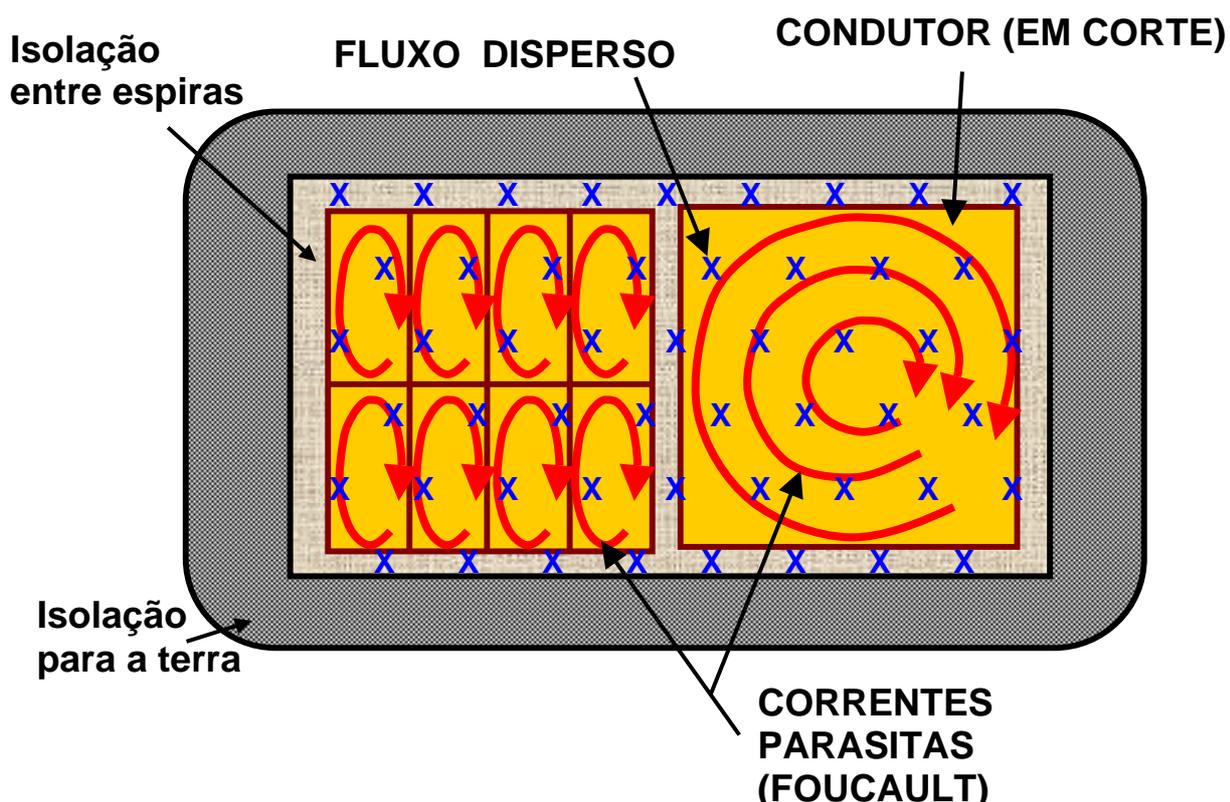
**OBJETIVO: EVITAR DESCARGAS PARCIAIS NA SUPERFÍCIE (CORONA)
PARA MÁQUINAS A PARTIR DE 6 kV**

**CAMADAS SEMICONDUTORAS PODEM SER APLICADAS NA FORMA DE
TINTAS OU FITAS, TANTO NA RANHURA QUANTO NA SAÍDA DA BARRA.**



CAMPO MAGNÉTICO





PERDAS PARASITAS – P_p

$$P_p = V^2 / R$$

V – Tensão Induzida no condutor (valor eficaz), proporcional à área cortada pelo fluxo longitudinal ao condutor

R – Resistência equivalente do condutor

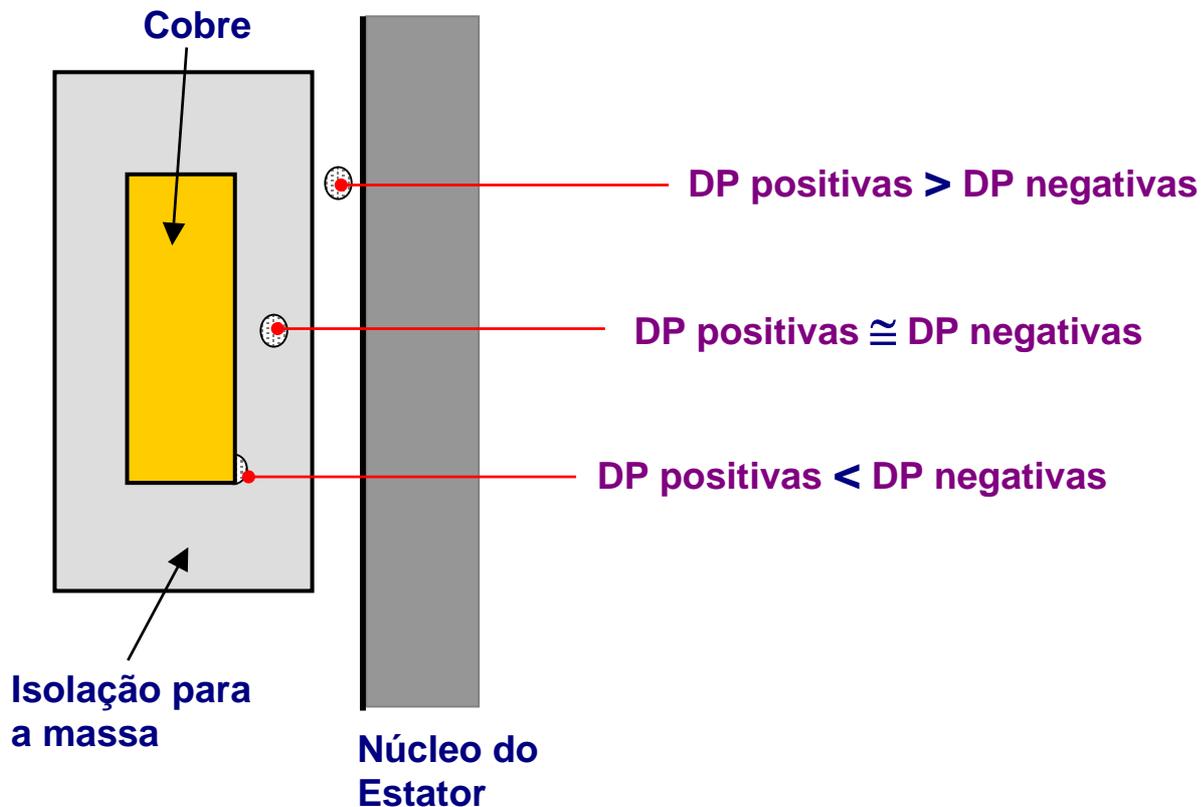
Exemplo simplificado. Dividindo o condutor em 9 partes iguais e considerando a corrente concentrada no perímetro destas.

Em cada segmento, V torna-se $V / 9$ e R torna-se $R / 3$ (usando simplificada o perímetro como caminho da corrente)

$$P_p = 9 \times [(V/9)^2 / (R/3)] = 27 / 81 [V^2/R]$$

$$P_p = \frac{V^2}{R} / 3$$

EFEITO DA LOCALIZAÇÃO DAS DPs NA POLARIDADE



EFEITO DA TEMPERATURA

- VARIAÇÕES SUTIS PARA FAIXAS DE ± 5 °C
- VARIAÇÕES DRÁSTICAS PARA FAIXAS DE ± 20 °C
- ENSAIOS FEITOS PARA A MESMA CARGA E DIFERENTES TEMPERATURAS, PELO MENOS ± 20 °C PODEM SERVIR PARA IDENTIFICAR O MECANISMO DA FALHA

EFEITO INVERSO (-) DAS DPs COM A t°

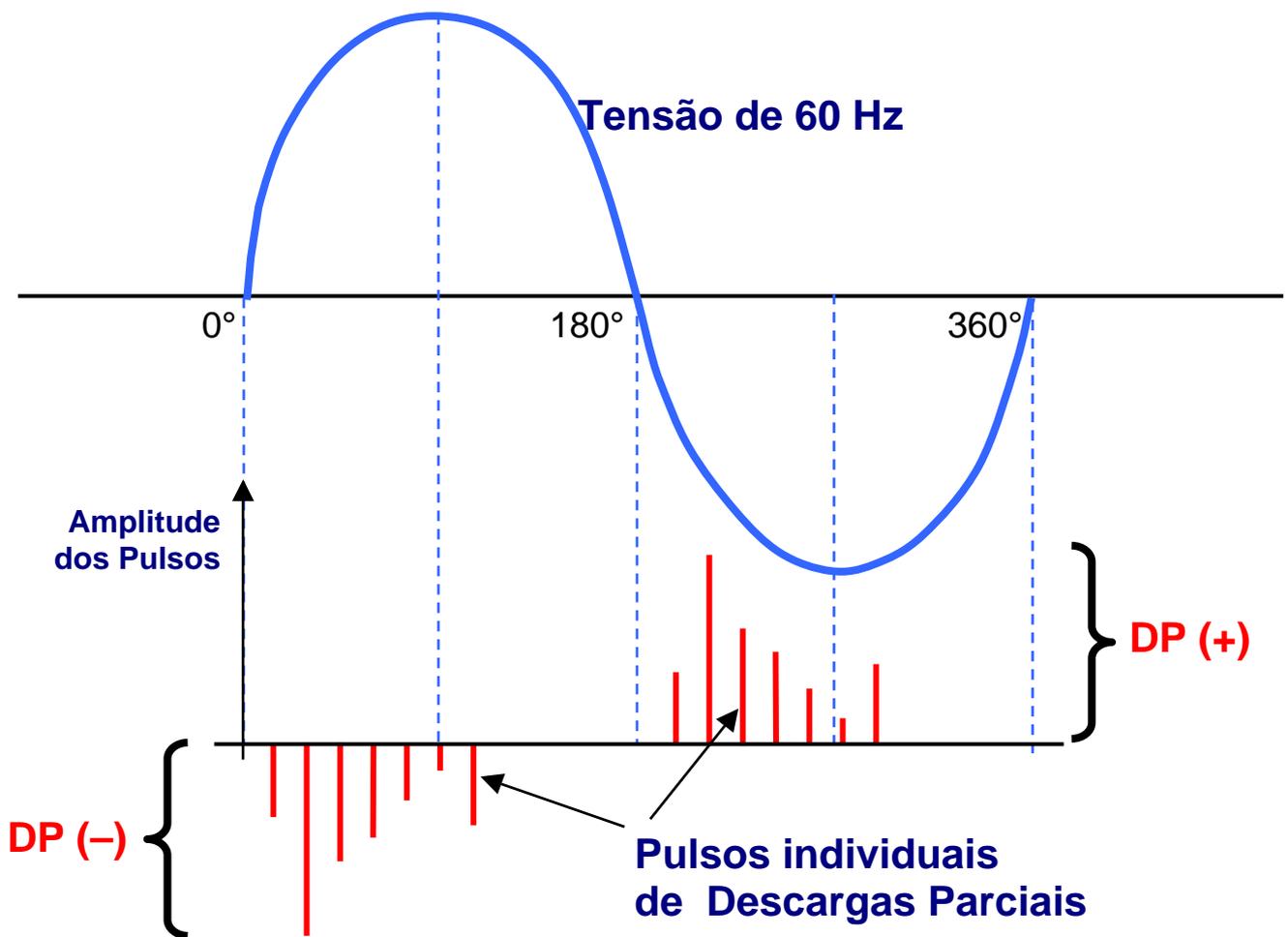
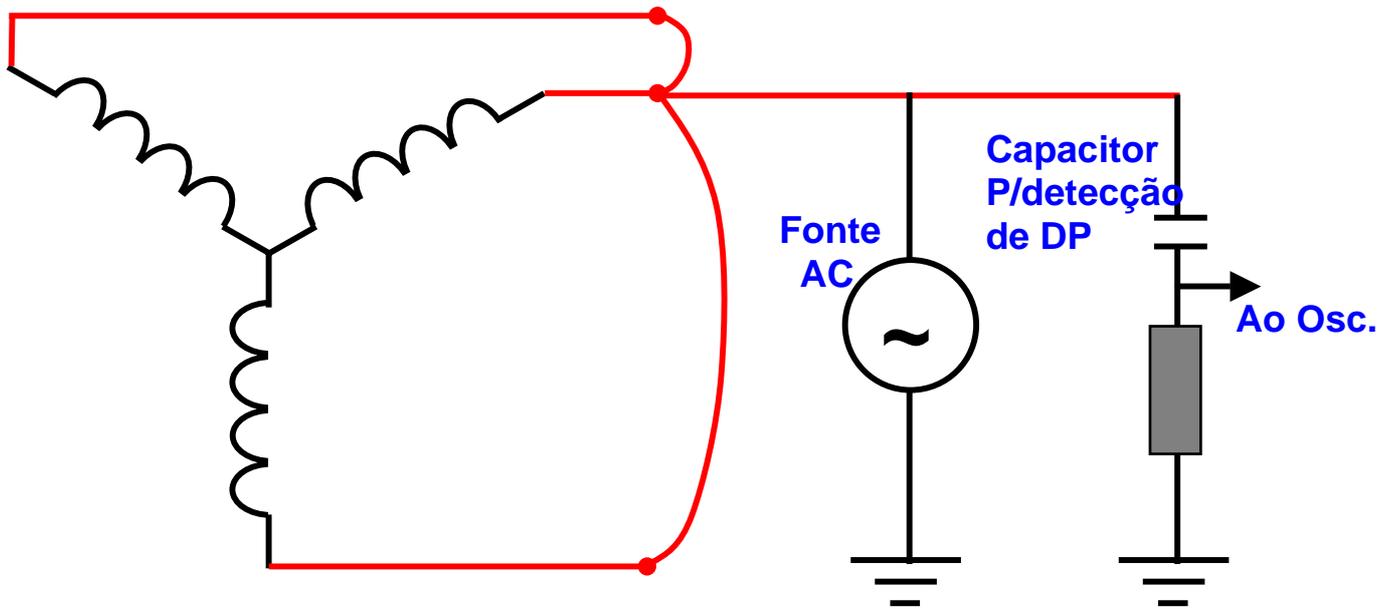
(QUANDO AS DPs DIMINUEM COM O AUMENTO DA TEMPERATURA)

- **O TAMANHO DOS ESPAÇOS VARIA INVERSAMENTE COM A TEMPERATURA. COBRE E ISOLAÇÃO AUMENTAM DE TAMANHO, DIMINUÍDO OS ESPAÇOS ENTRE A ISOLAÇÃO E O NÚCLEO, E, PORTANTO, AS DPs**
- **ESTE EFEITO É MAIS SIGNIFICATIVO PARA ISOLAÇÕES DE POLIESTER E ASFÁLTICAS, MAS TAMBÉM PODE SER OBSERVADO EM ENROLAMENTOS ISOLADOS EM EPOXI**
- **NOTAR QUE A TEMPERATURA DO COBRE OU DAS CAMADAS INTERNAS DA ISOLAÇÃO NÃO SÃO REFLETIDAS COM RAPIDEZ PELOS RTDs.**

EFEITO PROPORCIONAL (+) DAS DPs COM A t°

(QUANDO AS DPs AUMENTAM COM O AUMENTO DA TEMPERATURA)

- **INDICATIVO DA DETERIORAÇÃO DA TINTA SEMICONDUTIVA**
- **COM O AUMENTO DA TEMPERATURA, A RESISTÊNCIA DESTE MATERIAL CRESCE AUMENTANDO O NÍVEL DE DP POSITIVAS**
- **ESTE É UM MECANISMO DE FALHAS MUITO LENTO, PORÉM PODE LEVAR AO APARECIMENTO DE ZONAS DE ELEVADA PRODUÇÃO DE OZÔNIO**



MECANISMOS DE FALHA E TESTES DE DETECÇÃO

MECANISMO DA FALHA	SINTOMAS	TESTE	TIPOS DE ISOLAÇÃO
DEGRADAÇÃO TÉRMICA	DP, DESCOLORAÇÃO DA ISOLAÇÃO	DP, INSPEÇÃO VISUAL, $\tan \delta$, FP	MICA-ASFÁLTICA
CICLOS DE CARGA	DP, GIRTH CRACKING	DP, INSPAÇÃO VISUAL, $\tan \delta$, FP	MICA-ASFÁLTICA
PERDAS NO ENROLAMENTO	DP, DESCARGAS NA RANHURA, OZÔNIO, AFROUXAMENTO DE CUNHAS	DP, INSPAÇÃO VISUAL, CUNHAS BATENDO, OZÔNIO	SISTEMAS DUROS EPÓXI E POLIESTER
DESCARGAS ELÉTRICAS NA RANHURA	DP, DESCARGAS NA RANHURA, OZÔNIO,	DP, INSPEÇÃO VISUAL	MÁQUINAS REFRIGERADAS A AR
IMPREGNAÇÃO IMPRÓPRIA	DP	DP, $\tan \delta$, FP	VACUUM PRESSURE IMPREGNATION (VPI) GLOBAL, BOBINAS COM CARGA DE RESINA
CONTAMINAÇÃO NA SAÍDA DO ENROLAMENTO	DP, PÓ BRANCO, ÓLEO E GRAXA	DP, INSPEÇÃO VISUAL, RI, IP, HI-POT, FP, $\tan \delta$	ESTRESSE DE ALTA TENSÃO
ESPAÇAMENTO INADEQUADO ENTRE BOBINAS	DP, PÓ BRANCO, OZÔNIO	DP, INSPEÇÃO VISUAL	REFRIGERADA A AR
INTERFACE SEMICONDUTIVA	DP, PÓ BRANCO, OZÔNIO	DP, INSPEÇÃO VISUAL, FP, $\tan \delta$	REFRIGERADA A AR COM TINTAS DE CONTROLE DE ESTRESSE
VIBRAÇÃO EM FIM DE ENROLAMENTO	PERDA DE APERTO, PÓ BRANCO	ACELERÔMETRO, INSPEÇÃO VISUAL	MÁQUINAS DE AT, COM PROLONGAMENTOS E BRAÇOS? (LONG E ARMS)

CARACTERÍSTICAS DAS DPs E MECANISMOS DE FALHA

MECANISMO DA FALHA	PREDOMINÂNCIA DE POLARIDADE	EFEITO DA CARGA	EFEITO DA TEMPERATURA	ÂNGULO DE LOCALIZAÇÃO
DETERIORAÇÃO TÉRMICA	SEM	SEM	INVERSO	45 ° e 225 °
CICLOS DE CARGA	NEGATIVA	INVERSO	INVERSO	45 °
PERDAS NOS ENROLAMENTOS	POSITIVA	DIRETO	INVERSO	225 °
DESCARGA BARRA/NÚCLEO	POSITIVA	SEM	INVERSO	225
IMPREGNAÇÃO INADEQUADA	SEM	SEM	INVERSO	45 ° e 225 °
CONTAMINAÇÃO EM SAÍDA DO ENROLAMENTO	SEM	SEM	IMPREVISÍVEL	15°, 75°, 195° e 255°
ESPAÇAMENTO INADEQUADO ENTRE BOBINAS	SEM	SEM	IMPREVISÍVEL	15°, 75°, 195° e 255°
DETERIORAÇÃO DE INTERFACE SEMICONDUTORA	POSITIVA	SEM	DIRETO	225°

LOCALIZAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS ENTRE ESPIRAS DE BOBINAS POLARES DE ROTORES, MOTORES, TFs...

Em regime, o calor e a força centrífuga promovem curtos-circuitos entre as espiras dos pólos do rotor, provocando desbalanceamento e vibração mecânica no gerador. Quando o gerador pára para inspeção, o defeito dificilmente é localizável com os métodos usuais CC e CA.

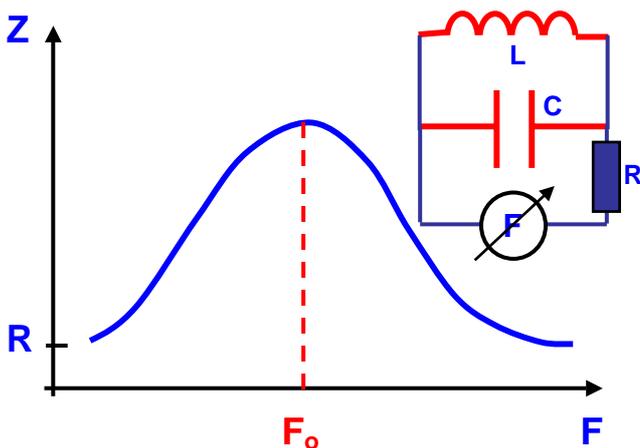
ENSAIO DE RESPOSTA A IMPULSO

Princípio: Comparação das impedâncias de surto de bobinas de mesmas características (duas a duas), usando uma onda impulsiva.

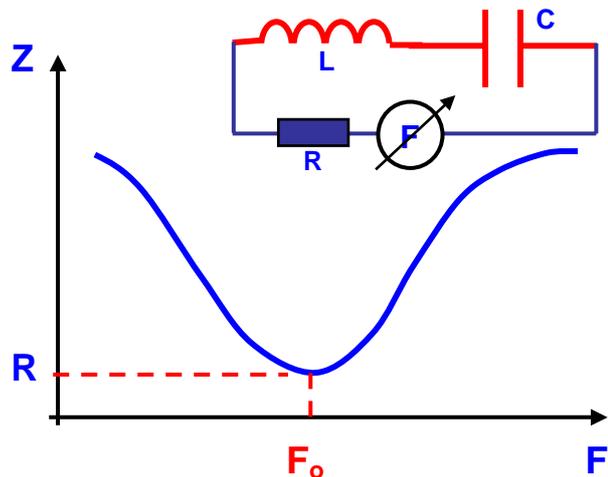
Impedâncias iguais ==> frequências de ressonância e oscilações iguais.

Descrição do Instrumento. Comparador de Resposta a Impulsos, da Baker Instrument Co. Até 12 kV_p e módulo de expansão para 24 kV

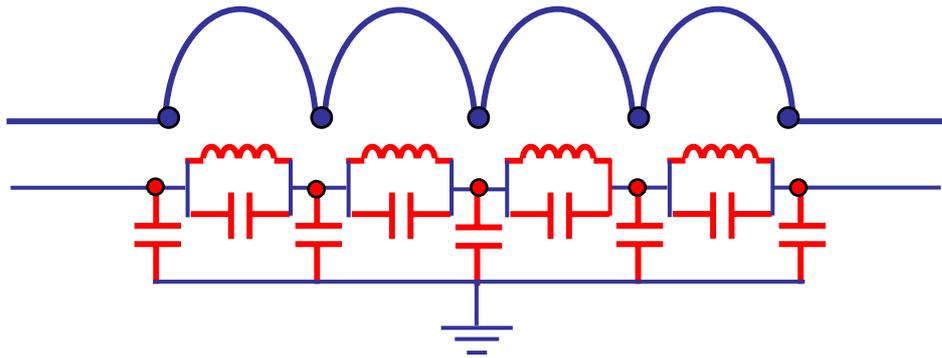
Frequência de Ressonância $F_o = 1 / (2 \pi \sqrt{LC})$



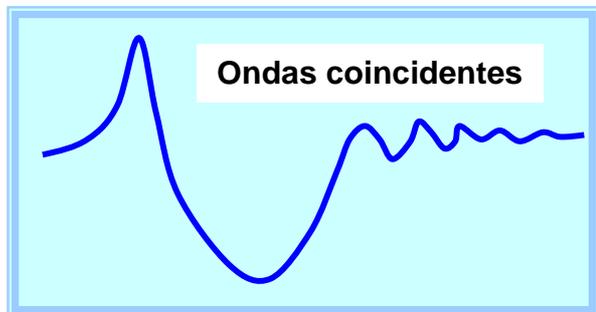
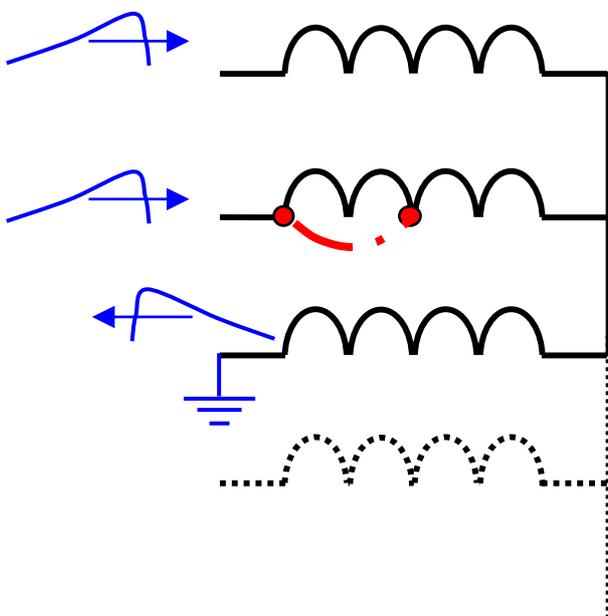
Circuito ressonante paralelo



Circuito ressonante série



Circuito equivalente da isolação para resposta a impulso (alta freqüência)



**C
U
I
D
A
D
O
S**

- Aplica-se **tensão compatível** com o NBI do enrolamento. Em bobinas rotóricas, na Copel, o valor empregado é 250 volts de pico.
- No caso de comparar **polos desmontados**, a simetria é fundamental (tomar cuidado com objetos ferrosos próximos aos polos ensaiados, como por exemplo cubículos).
- **Transformadores**: a indutância da bobina da perna central é maior que a das laterais.

TENSÃO APLICADA CC – “HY-POT” – EM GERADORES

- Tensão de prova – U_p (máxima) = $(2 \times U_{nom}) + 1$
- Acima de 26 kV o efeito corona influi fortemente: faixa inadequada
- Primeiros 10 minutos: degrau inicial $0,3 \times U_p$ (máximo de 10 kV). Nos degraus seguintes: acréscimos de 20 %
- Ajuste para 90 ~ 95 % do valor (a tensão sobe, por efeito capacitivo)
- Tempo de duração de cada degrau: Método de Schleif. Consiste em ajustar os tempos de aplicação dos degraus para conseguir uma reta
- Leitura da corrente de fuga para 1, 3 e 10 minutos
- Cálculos:

$$C = [(I_1 \times I_{10}) - I_3^2] / (I_1 + I_{10} - 2 I_3)$$

$$\text{Relação de Absorção (N)} = (I_1 - C) / (I_{10} - C)$$

N ==> Tabela de tempos de aplicação

Aterramento: usar bastão de aterramento com resistor entre 1 e 6 k Ω / kV

Norma: aterrar durante 1 hora antes de testar a fase seguinte.

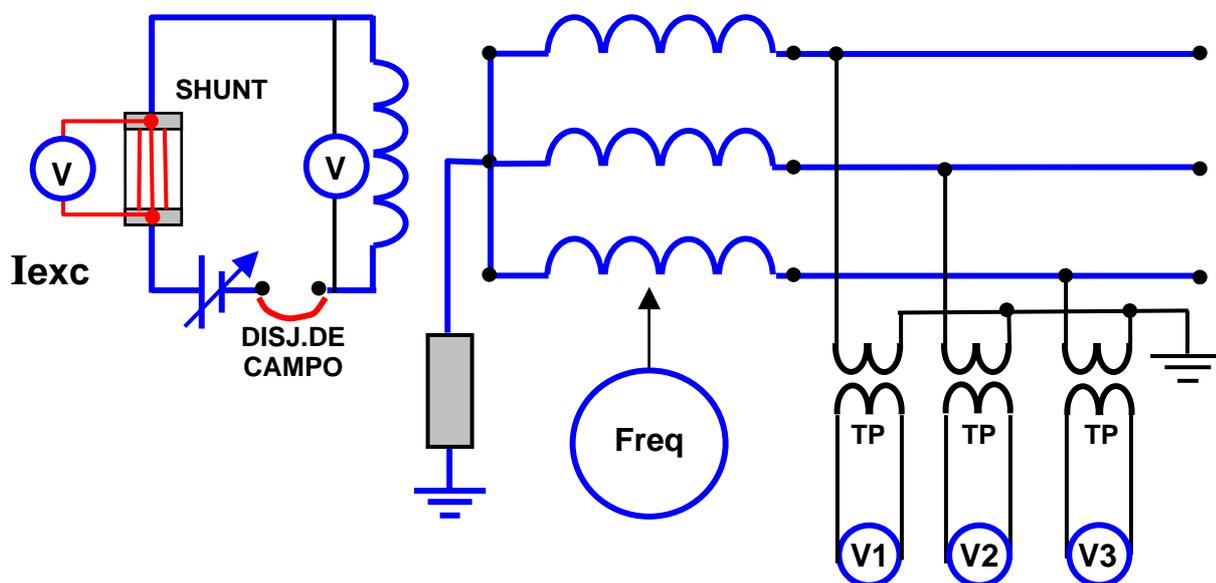
Discussão:

Segurança: Tempo para descarga total suficiente?

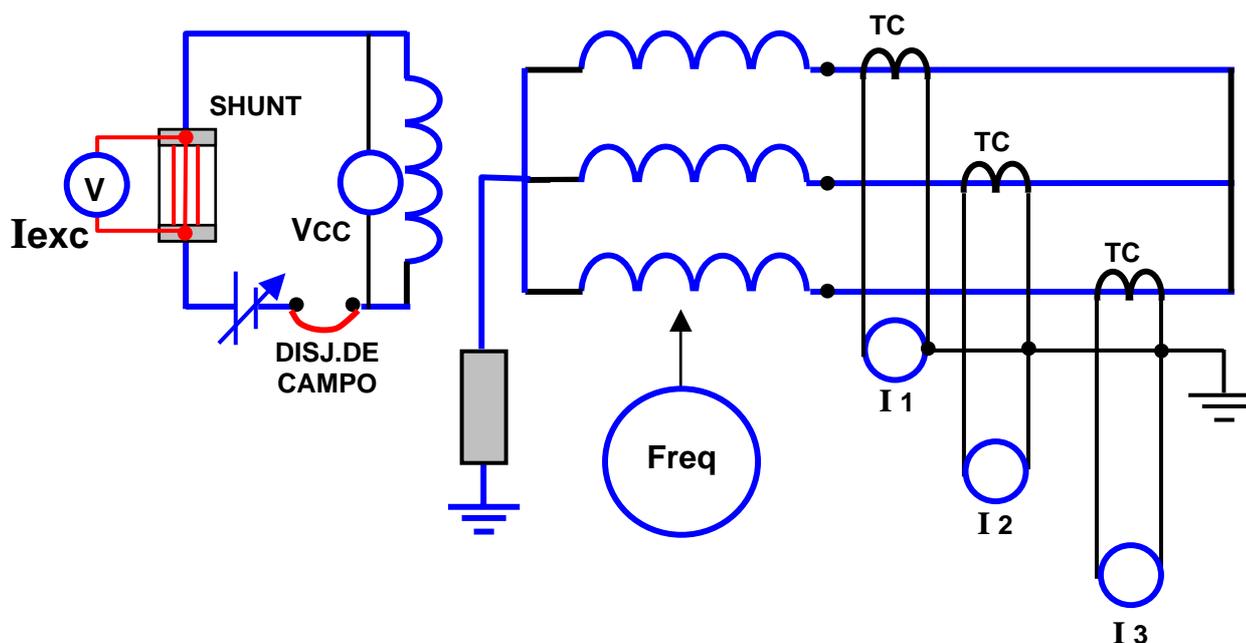
Controle da umidade e condição da superfície?

Influência da temperatura, correções, etc?

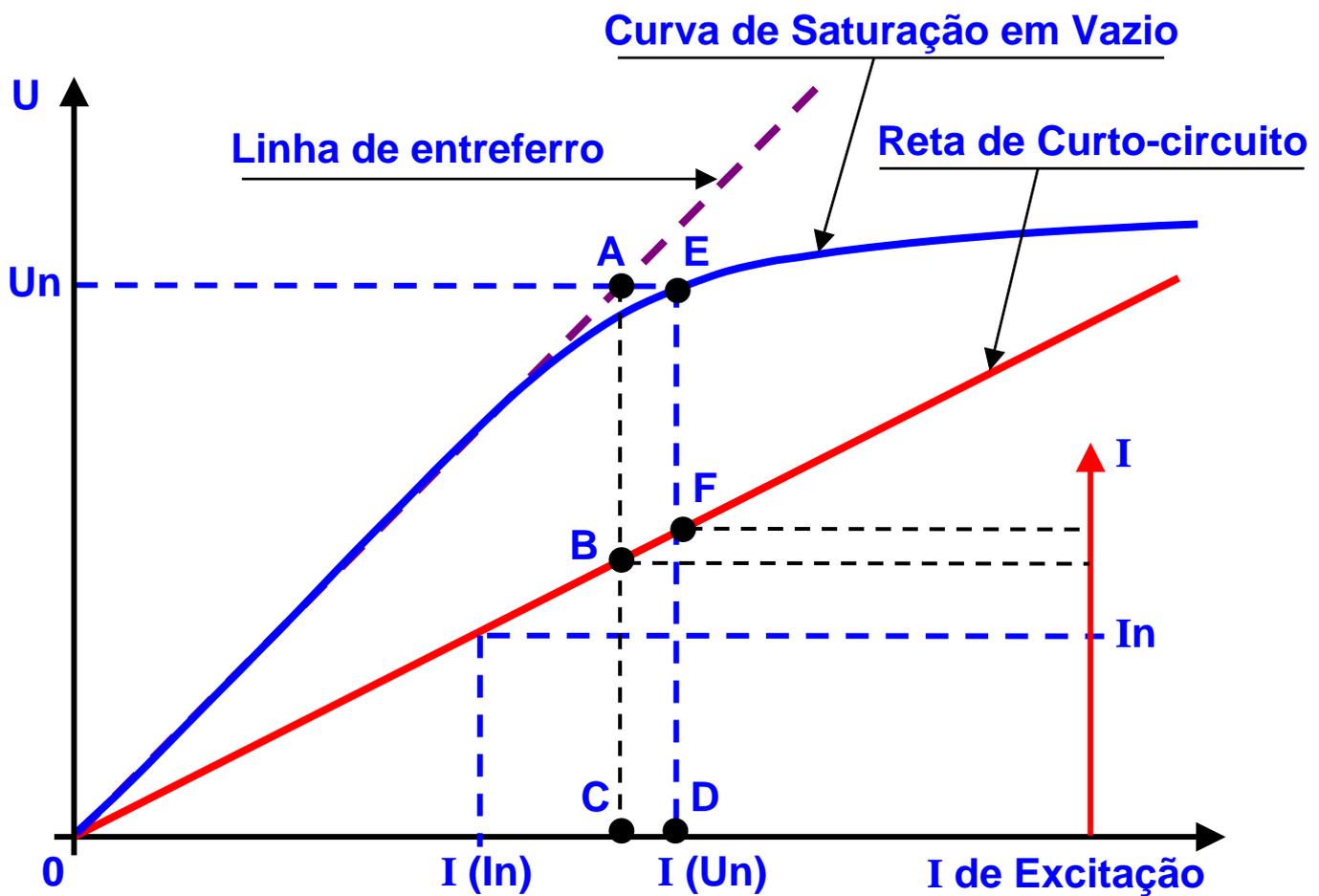
LEVANTAMENTO DE CARACTERÍSTICAS EM GERADORES



SATURAÇÃO EM VAZIO – CIRCUITO DE MEDIÇÃO



RETA DE CURTO-CIRCUITO - CIRCUITO DE MEDIÇÃO



RELAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO = $I(U_n) / I(I_n)$

⇒ **Comparação com dados do fabricante**

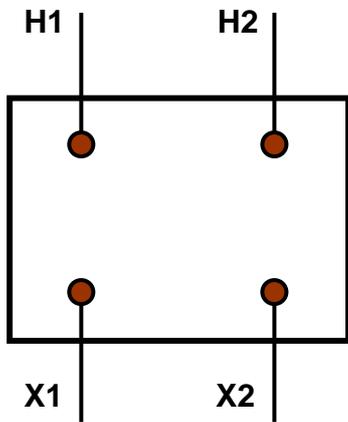
ALGUNS PARÂMETROS TIRADOS DESTES ENSAIOS

REATÂNCIA SÍNCRONA DE EIXO DIRETO

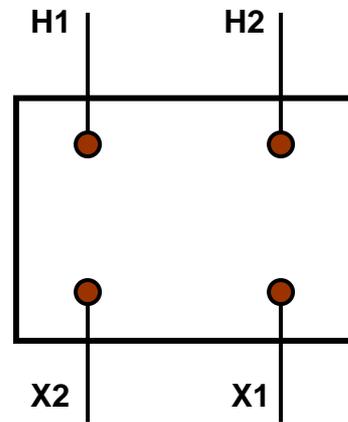
NÃO SATURADA = $\overline{AC} / \overline{BC}$

SATURADA = $\overline{ED} / \overline{FD}$

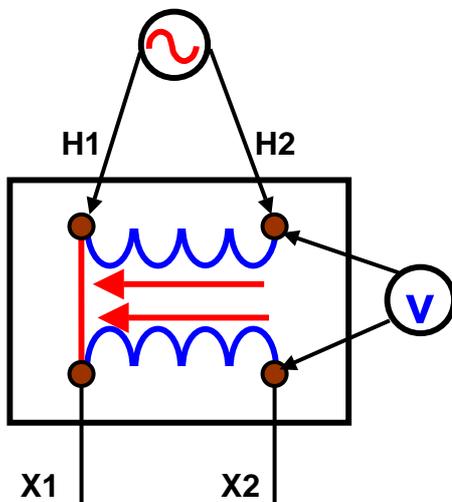
POLARIDADE – CONCEITO / MÉTODOS



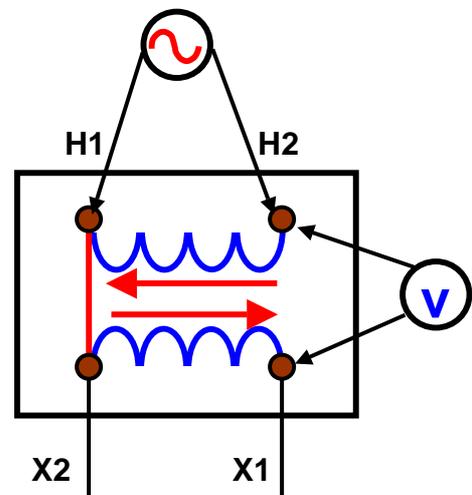
POLARIDADE SUBTRATIVA



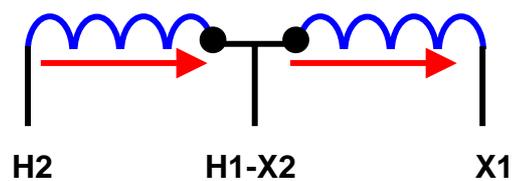
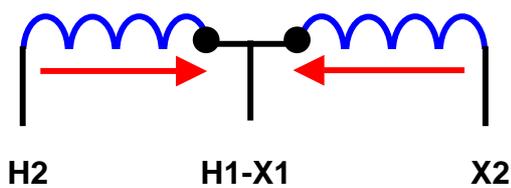
POLARIDADE ADITIVA

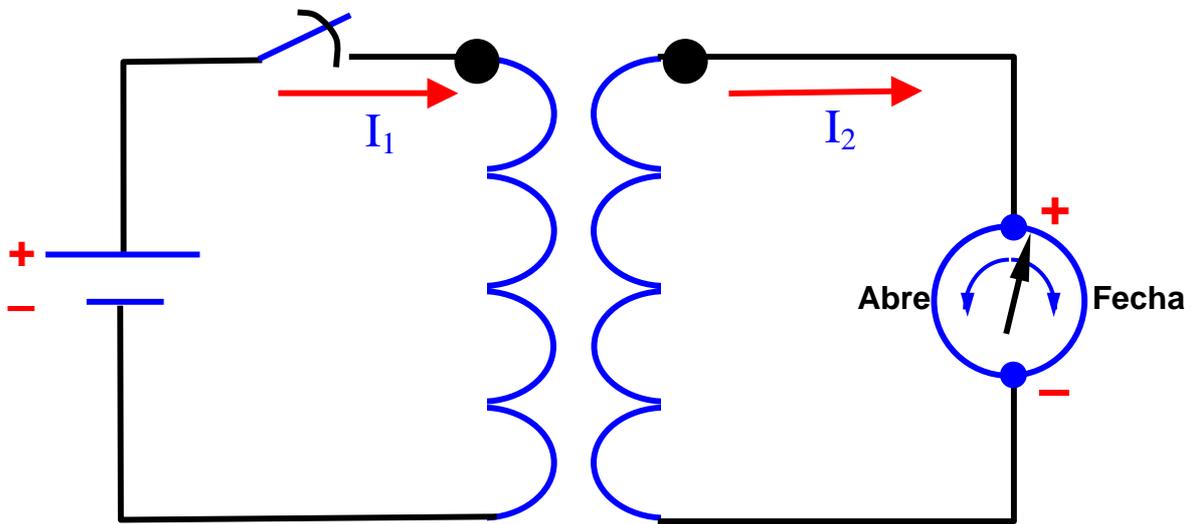


V MENOR QUE A TENSÃO DA FONTE



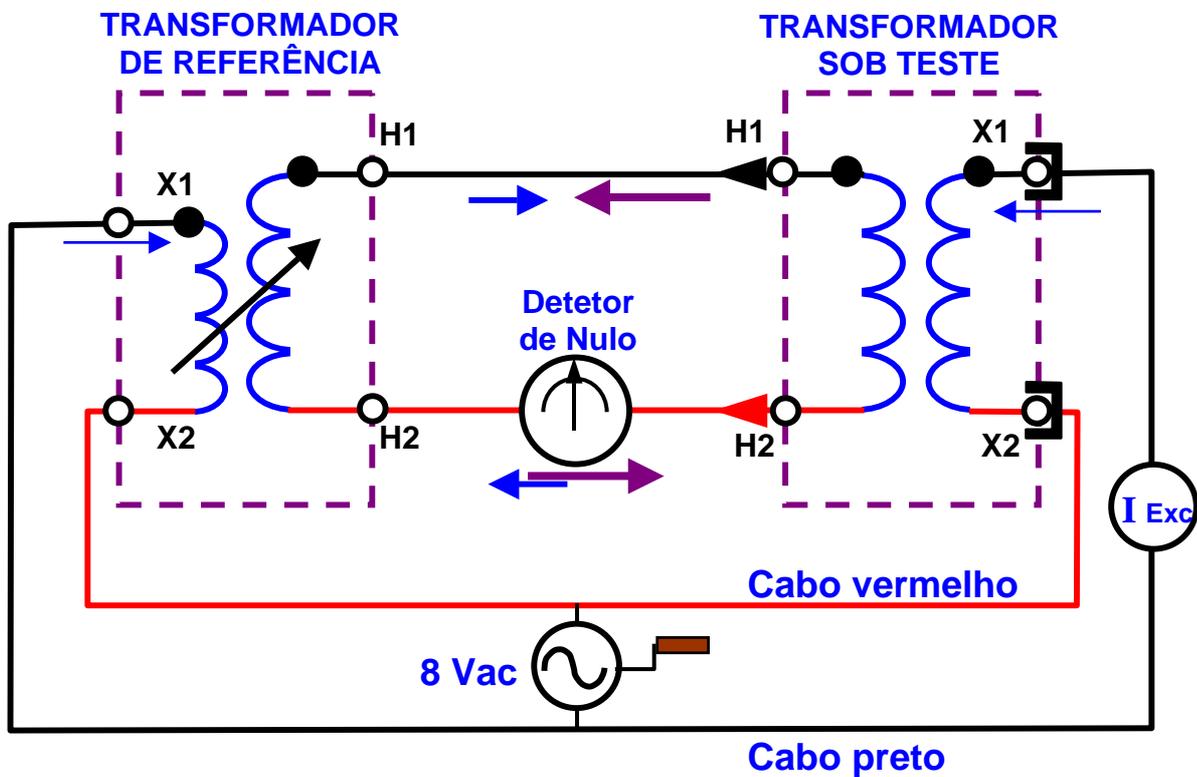
V MAIOR QUE A TENSÃO DA FONTE





MÉTODO DO GOLPE INDUTIVO

RELAÇÃO DE TENSÕES – TTR



DESLOCAMENTO ANGULAR

LIGAÇÃO Y_{y0}

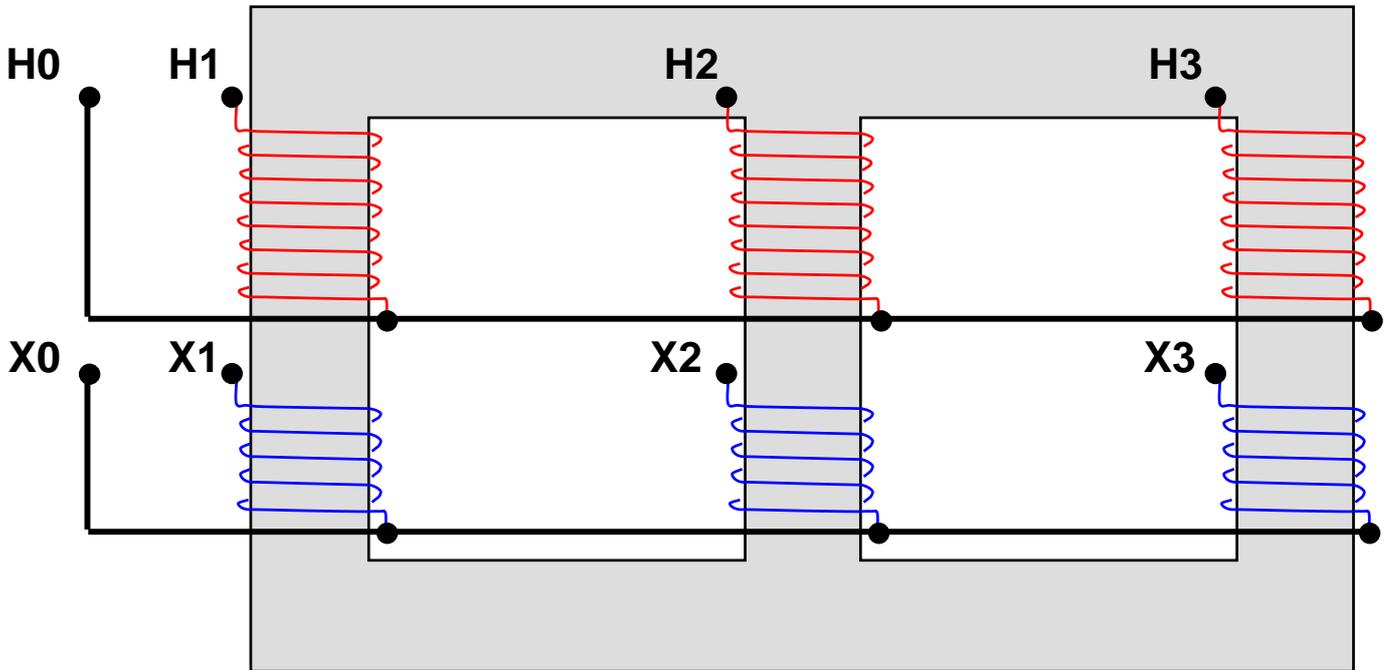
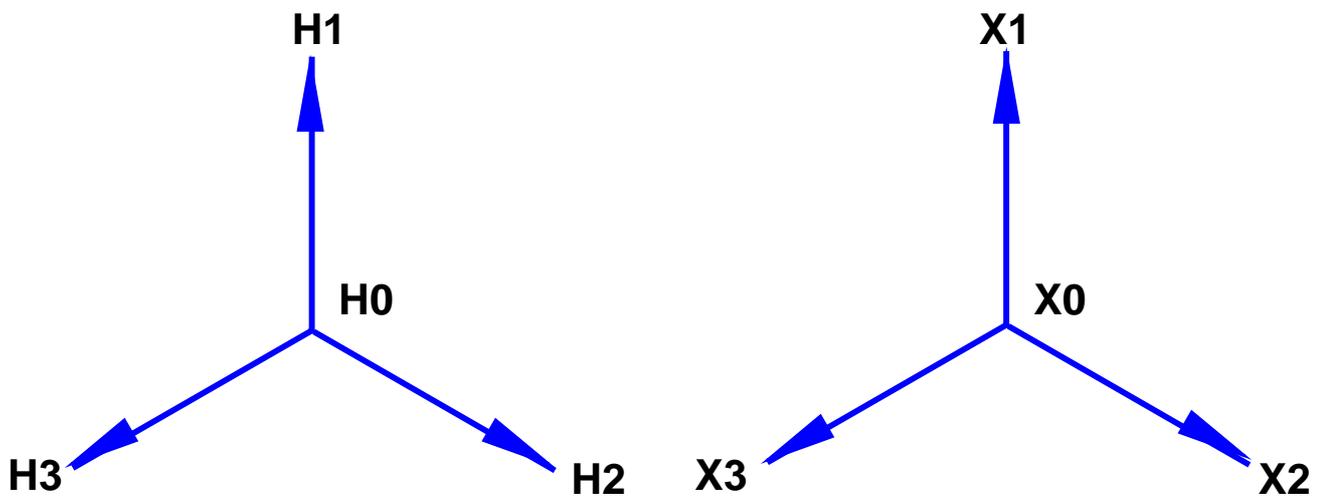


DIAGRAMA VETORIAL



LIGAÇÃO Dyn1

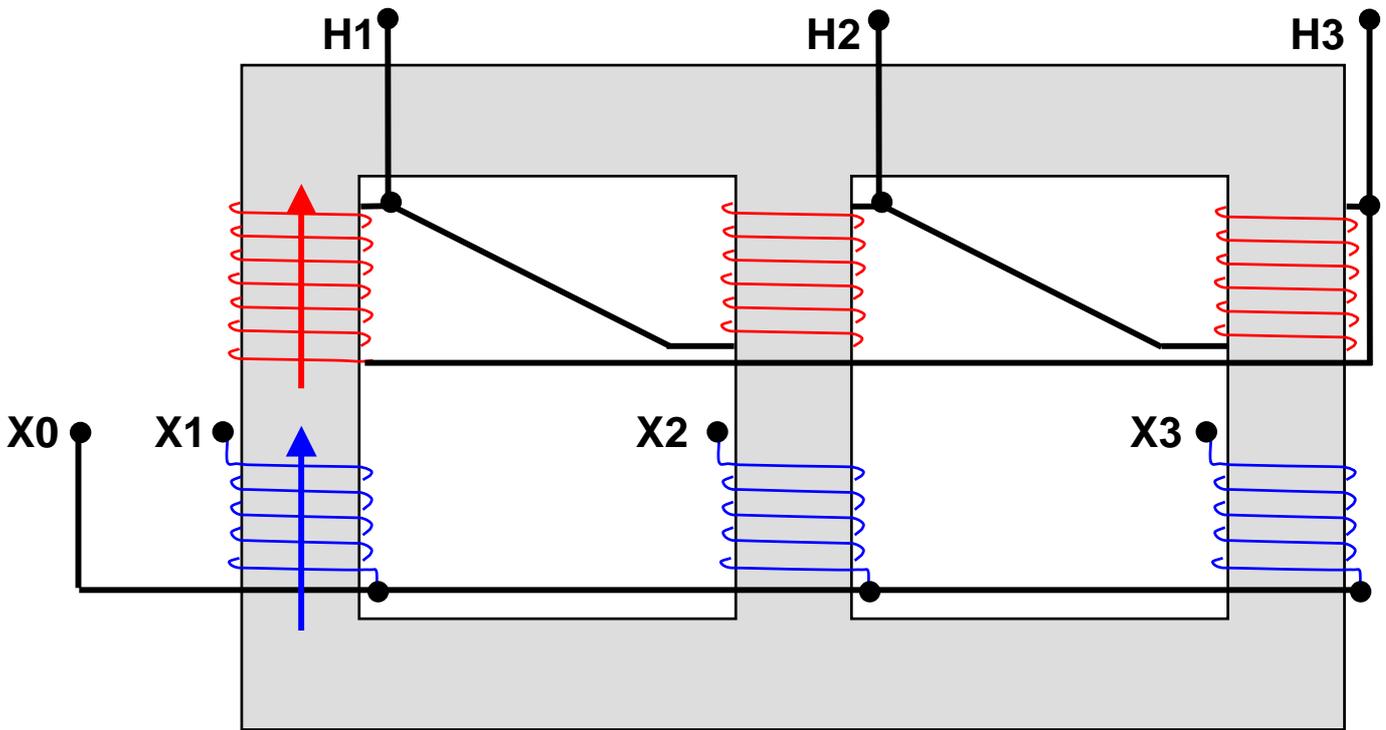
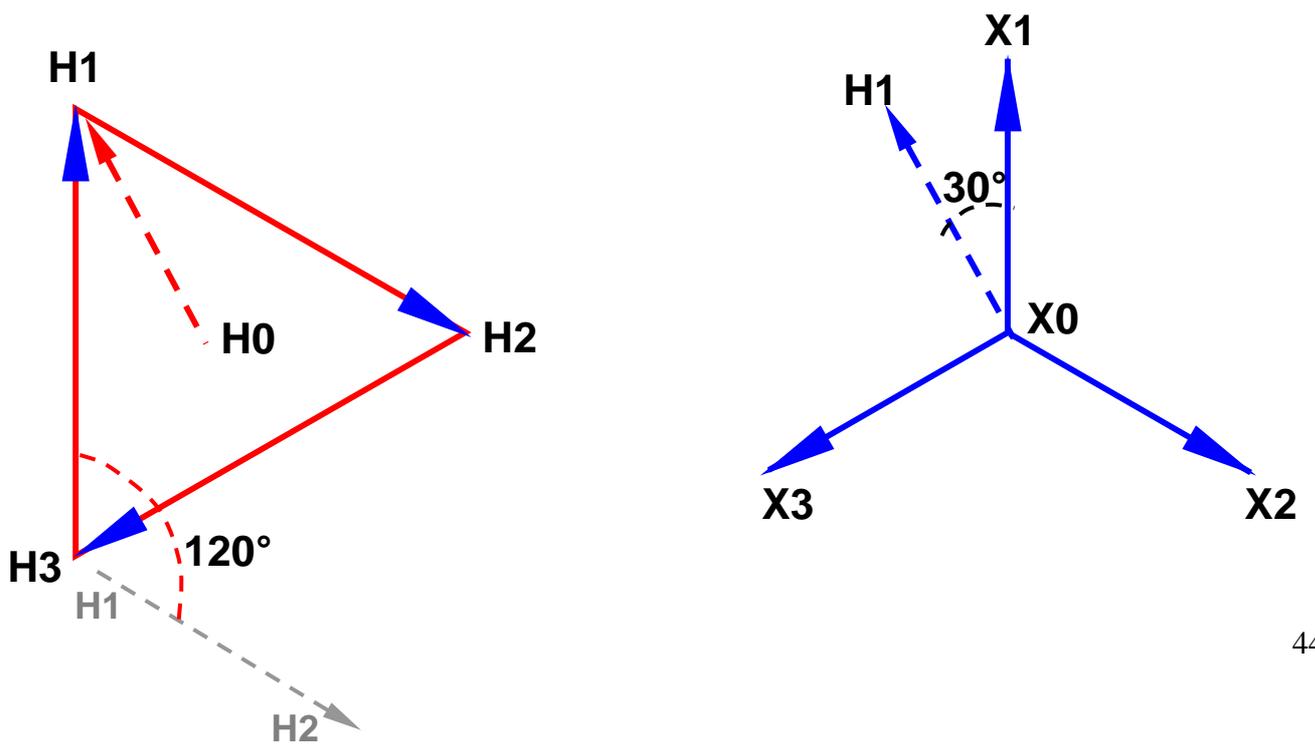


DIAGRAMA VETORIAL

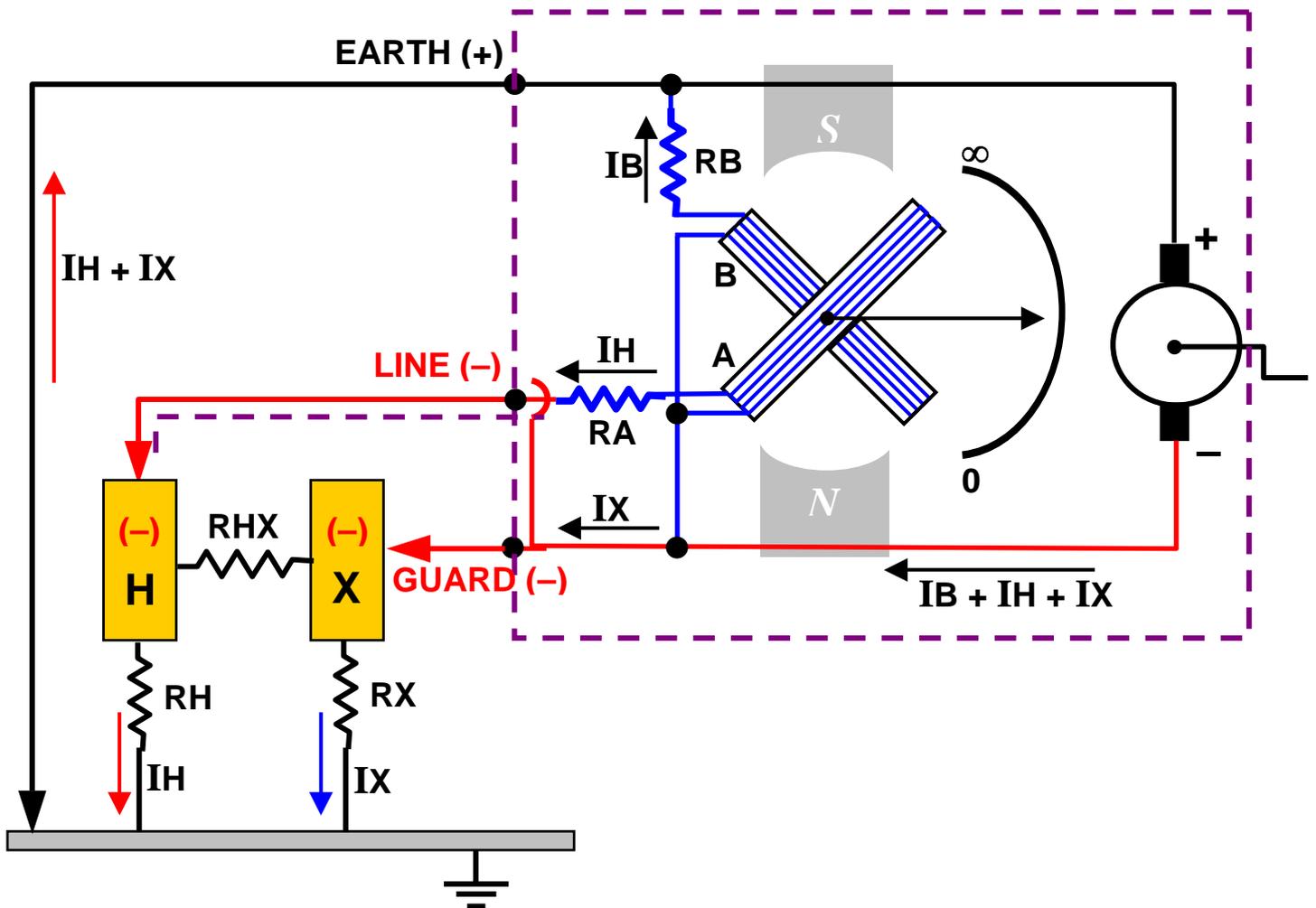


INSTRUMENTOS PARA ENSAIOS DIELÉTRICOS

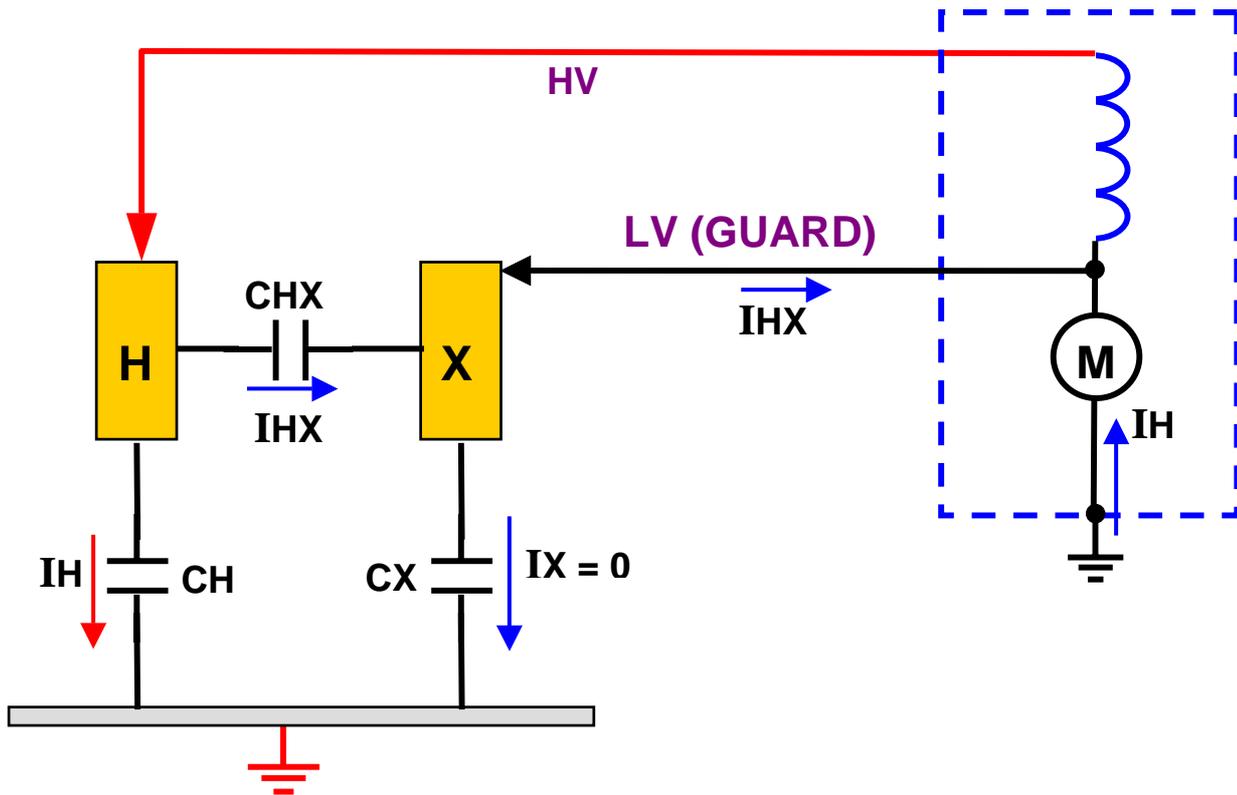
MEGAOHMÍMETRO ANALÓGICO

CIRCUITOS GROUND E GUARD

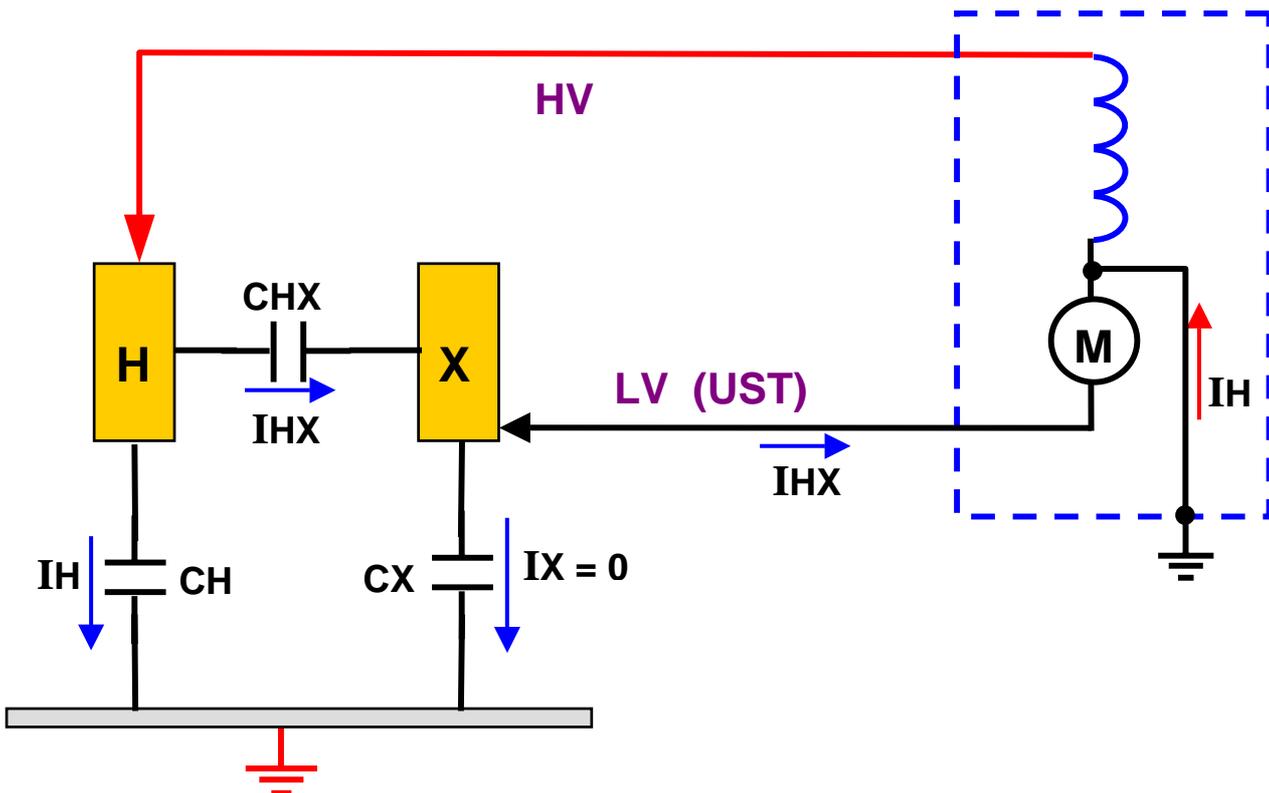
RESISTÊNCIA R_H EM TRANSFORMADORES COM DOIS ENROLAMENTOS



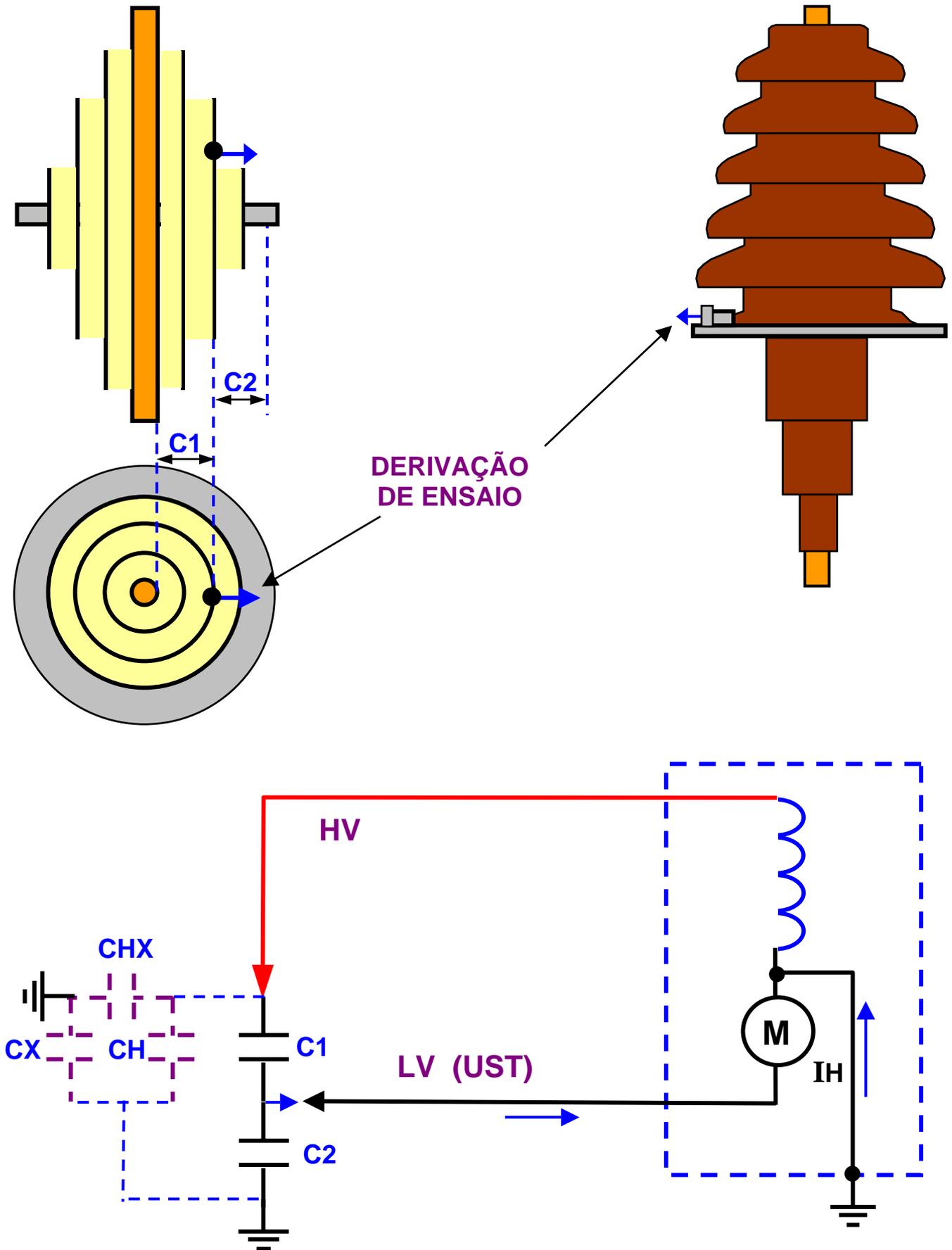
MEDIÇÃO DA ISOLAÇÃO CH (LIGAÇÃO GUARD FRIO)



MEDIÇÃO DA ISOLAÇÃO CHX (LIGAÇÃO UST)



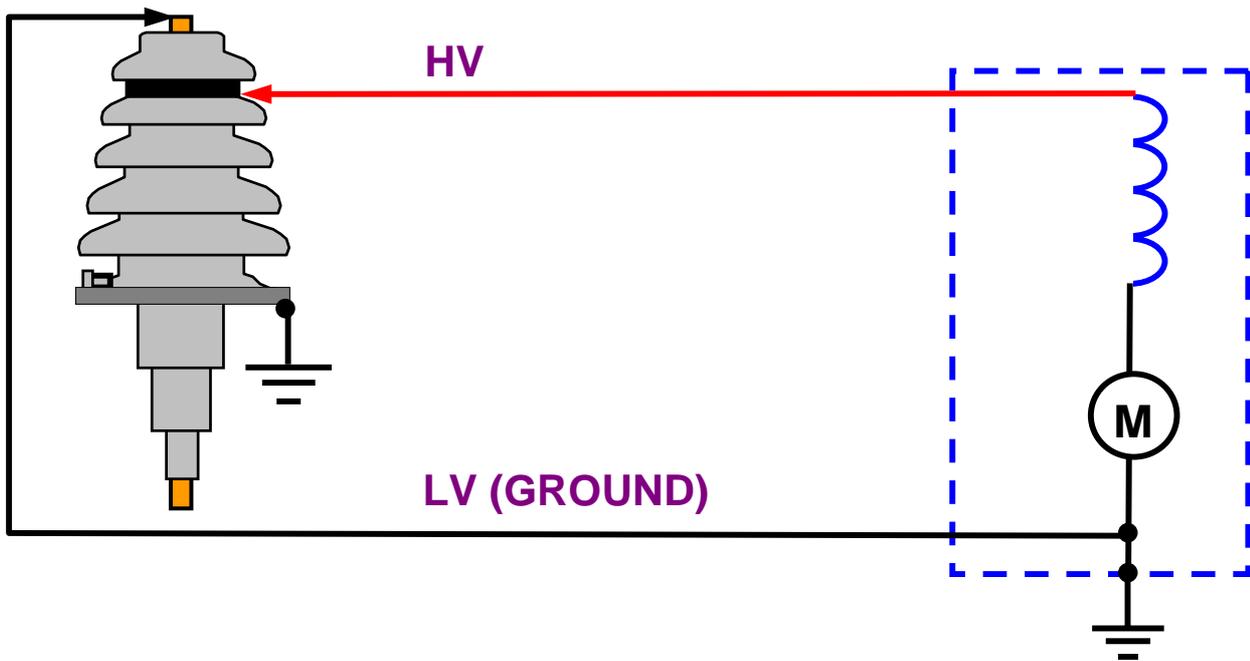
MEDIÇÃO DA CAPACITÂNCIA EM BUCHAS CONDENSIVAS



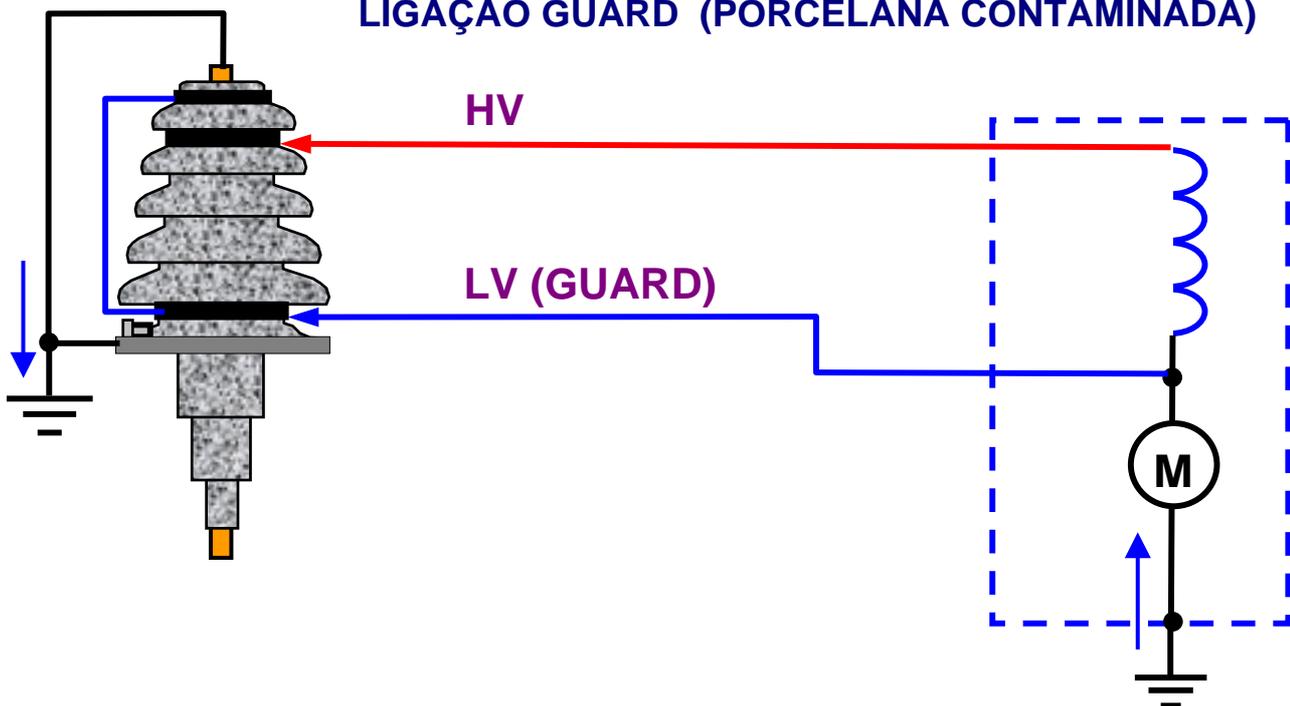
COLAR QUENTE EM BUCHAS

MATERIAL: FITA DE BORRACHA SEMICONDUCTORA

LIGAÇÃO GROUND – NORMAL

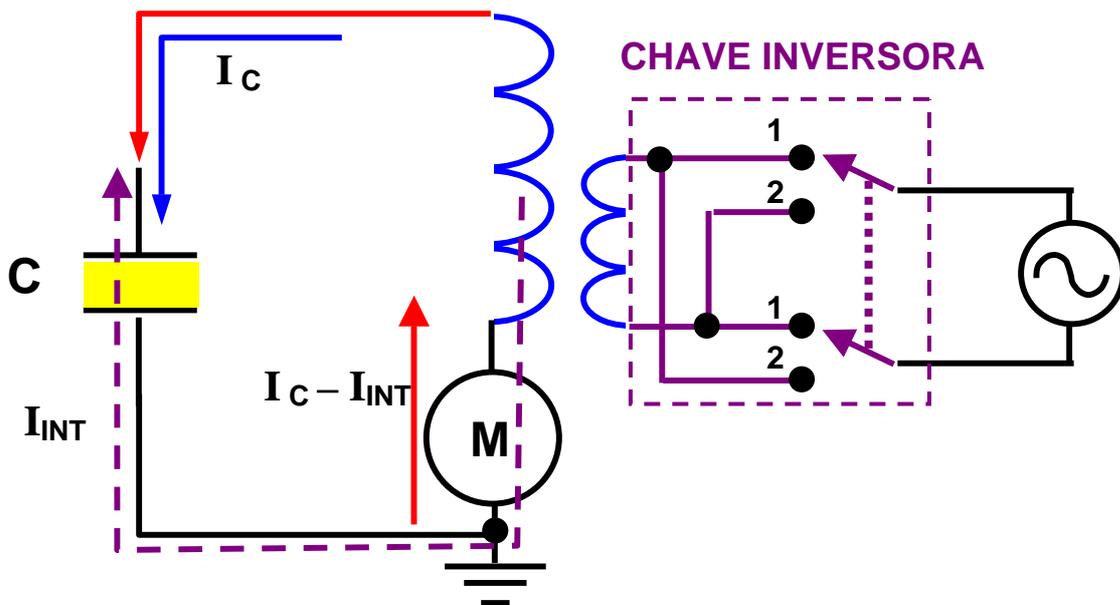


LIGAÇÃO GUARD (PORCELANA CONTAMINADA)



INTERFERÊNCIA ELETROSTÁTICA EM MEDIÇÕES DE CAMPO MÉTODOS DE CANCELAMENTO

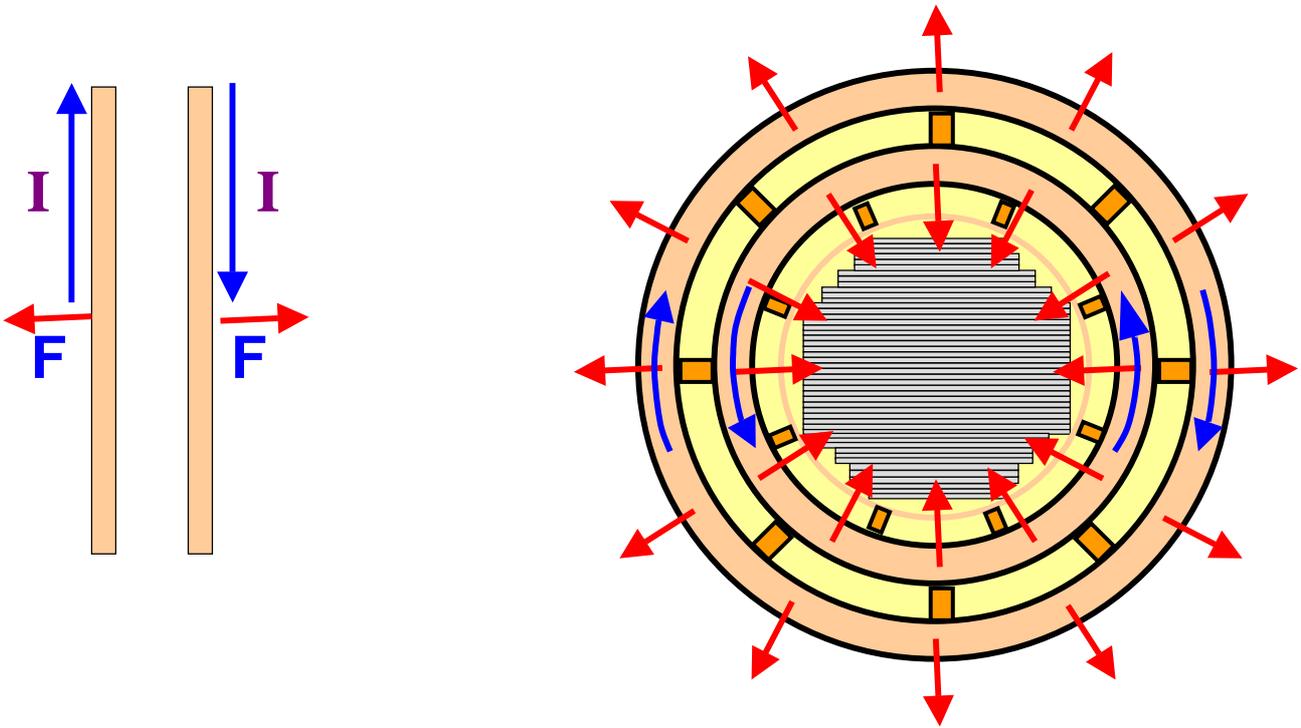
CHAVE INVERSORA DO ENSAIADOR DE FATOR DE POTÊNCIA



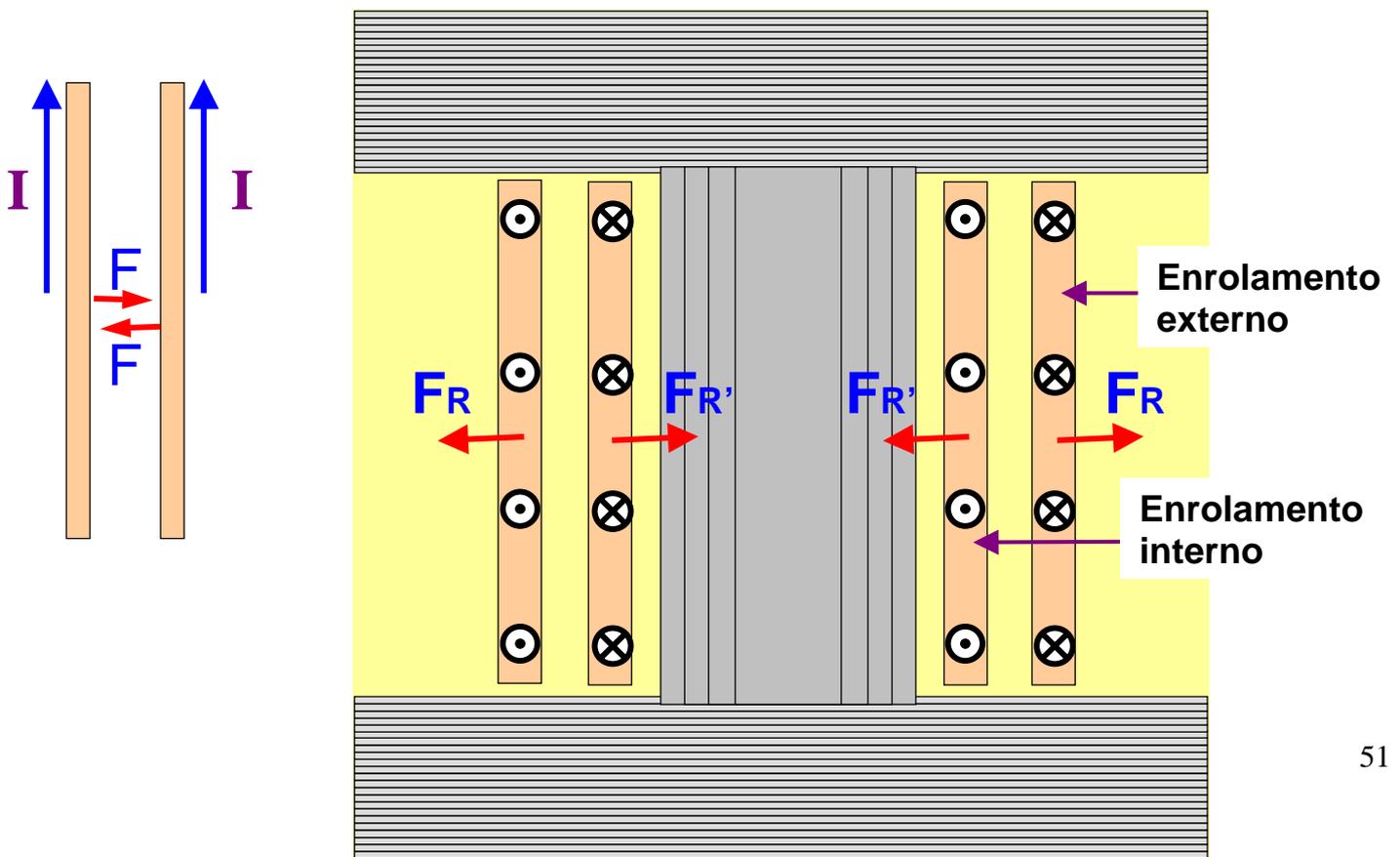
OBSERVAÇÕES:

- ◆ QUANDO O VALOR DA CORRENTE DE INTERFERÊNCIA É SUPERIOR AO VALOR A SER MEDIDO, A INVERSÃO DA CHAVE NÃO PROVOCA MUDANÇA NA POLARIDADE DA CORRENTE TOTAL VISTA PELO MEDIDOR, $I_C - I_{INT}$
- ◆ NESTE CASO, A VERIFICAÇÃO DAS POLARIDADES COM A CHAVE NAS POSIÇÕES 1 e 2 MOSTRARÁ SENTIDOS OPOSTOS (PORQUE MUDA A POLARIDADE DA FONTE SEM MUDAR A POLARIDADE DA CORRENTE). O RESULTADO CORRETO SERÁ DADO PELA METADE DA DIFERENÇA DAS LEITURAS.

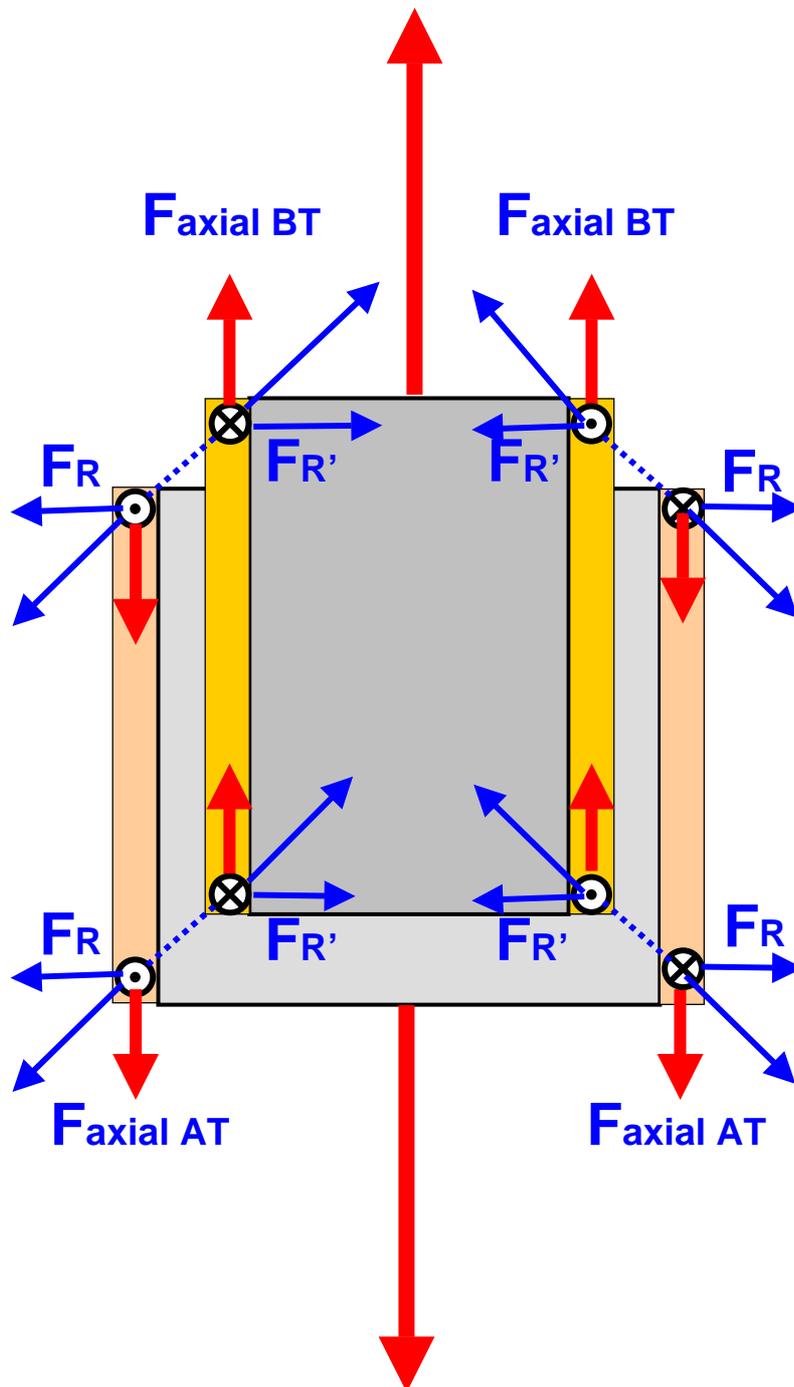
PROBLEMAS DE DESLOCAMENTO DE BOBINAS EM TFs



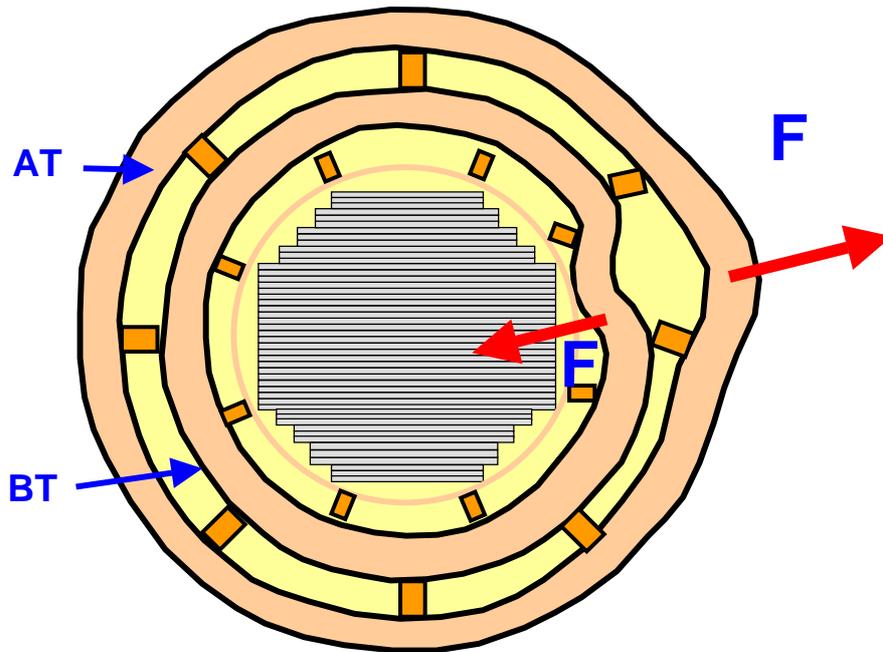
ESFORÇOS RADIAIS: ENTRE ENROLAMENTOS



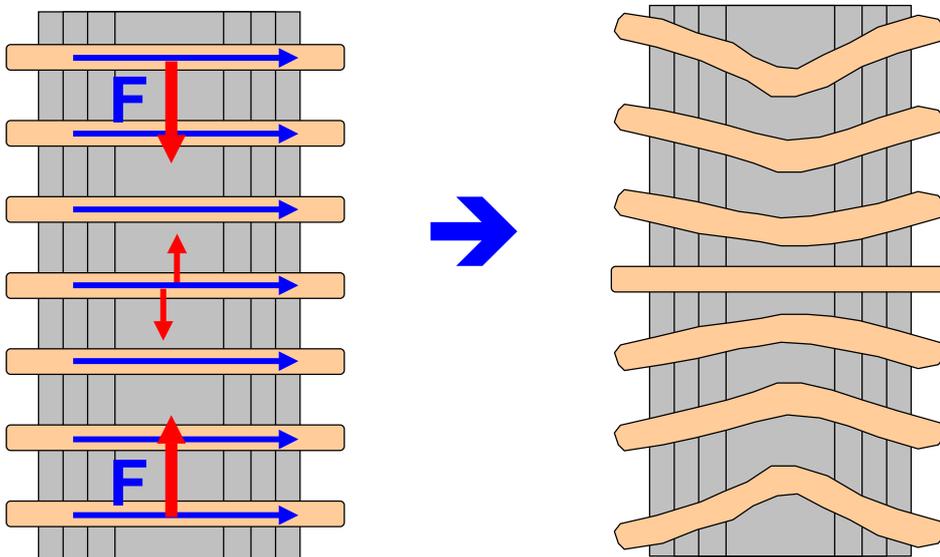
FORÇAS AXIAIS POR ASSIMETRIAS AT / BT



$$F \propto I^2$$

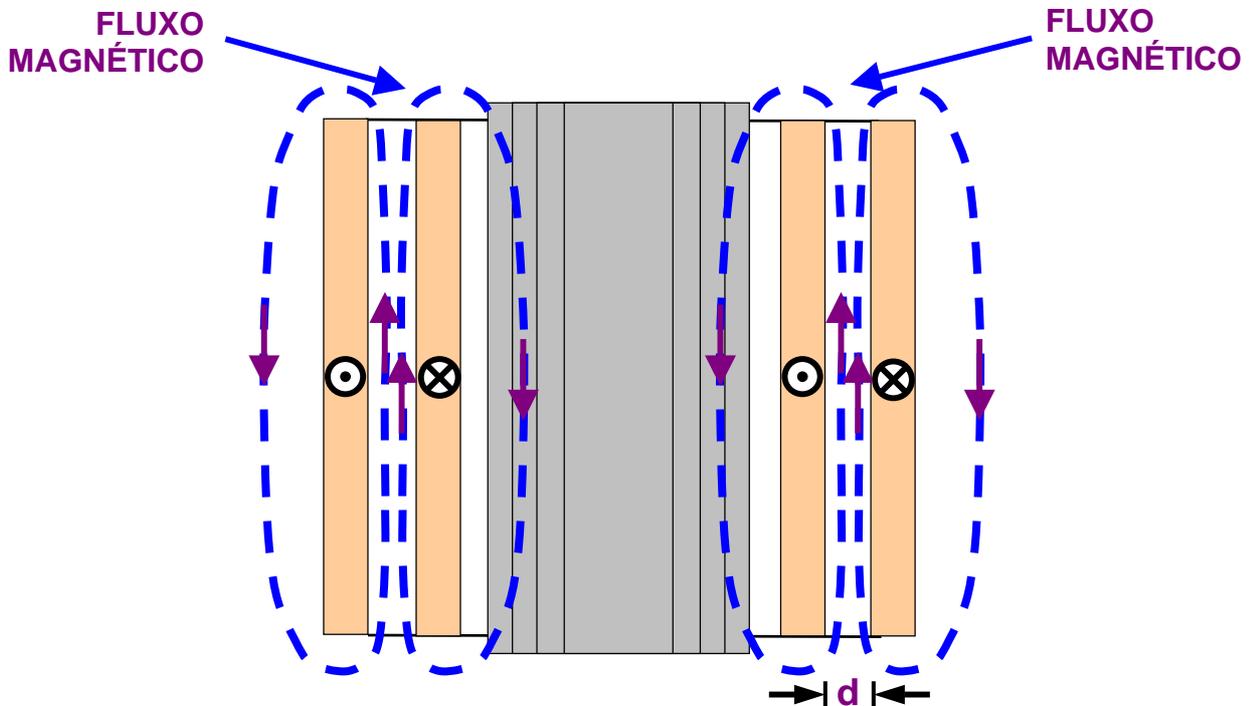


ESFORÇOS AXIAIS ENTRE ESPIRAS DO MESMO ENROLAMENTO



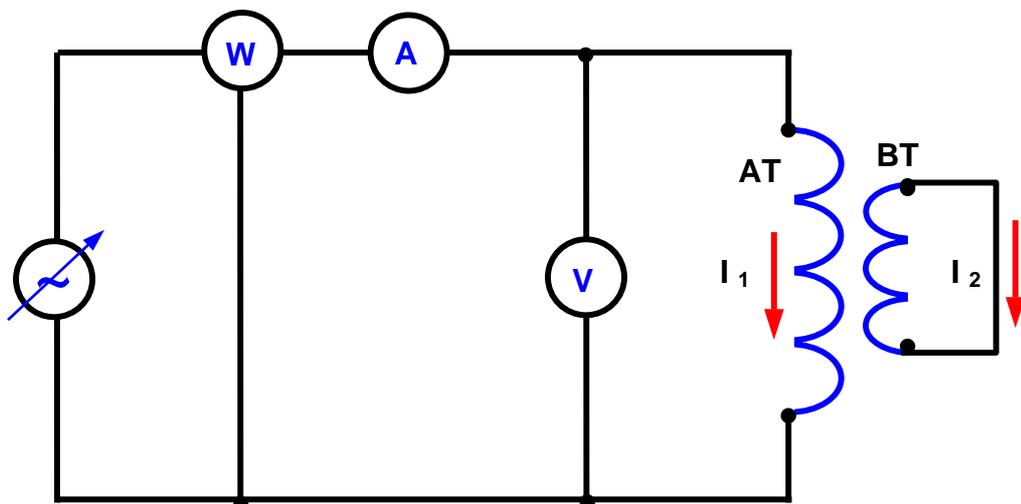
DETECÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM BOBINADOS

- MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO. CONCEITO.

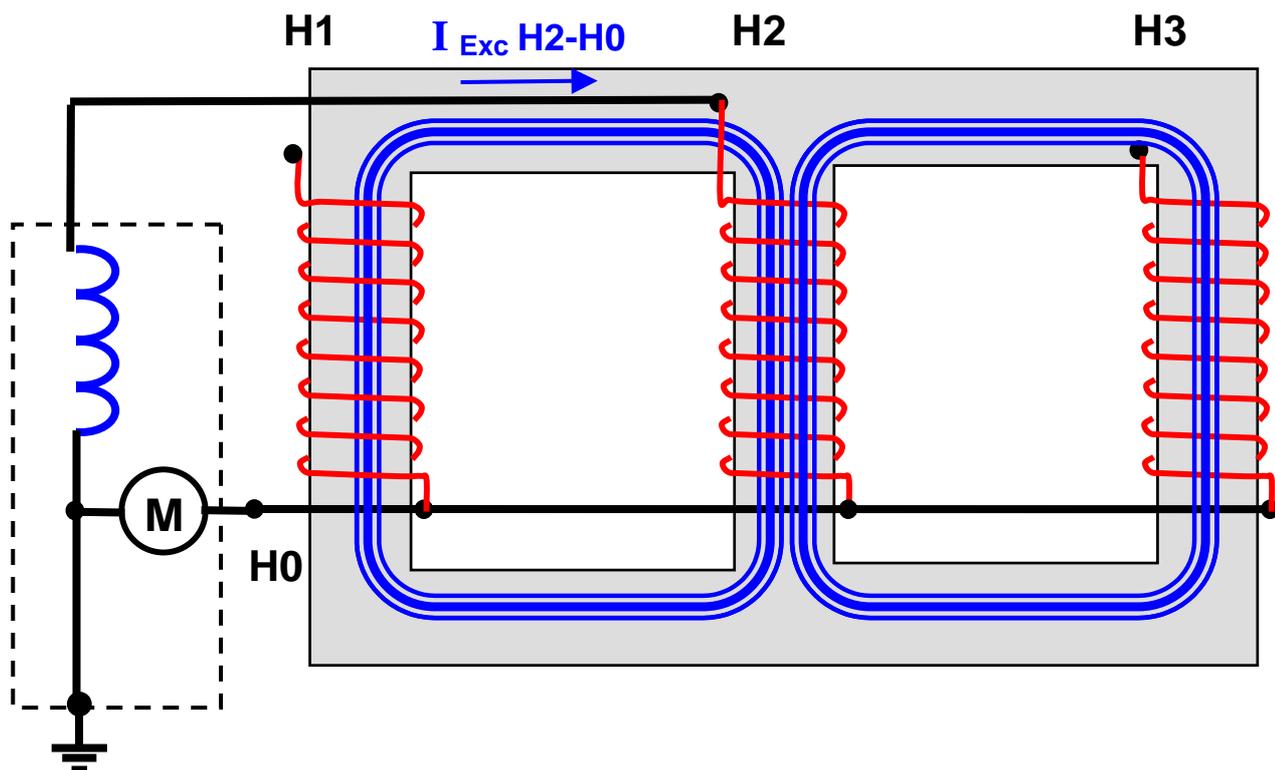
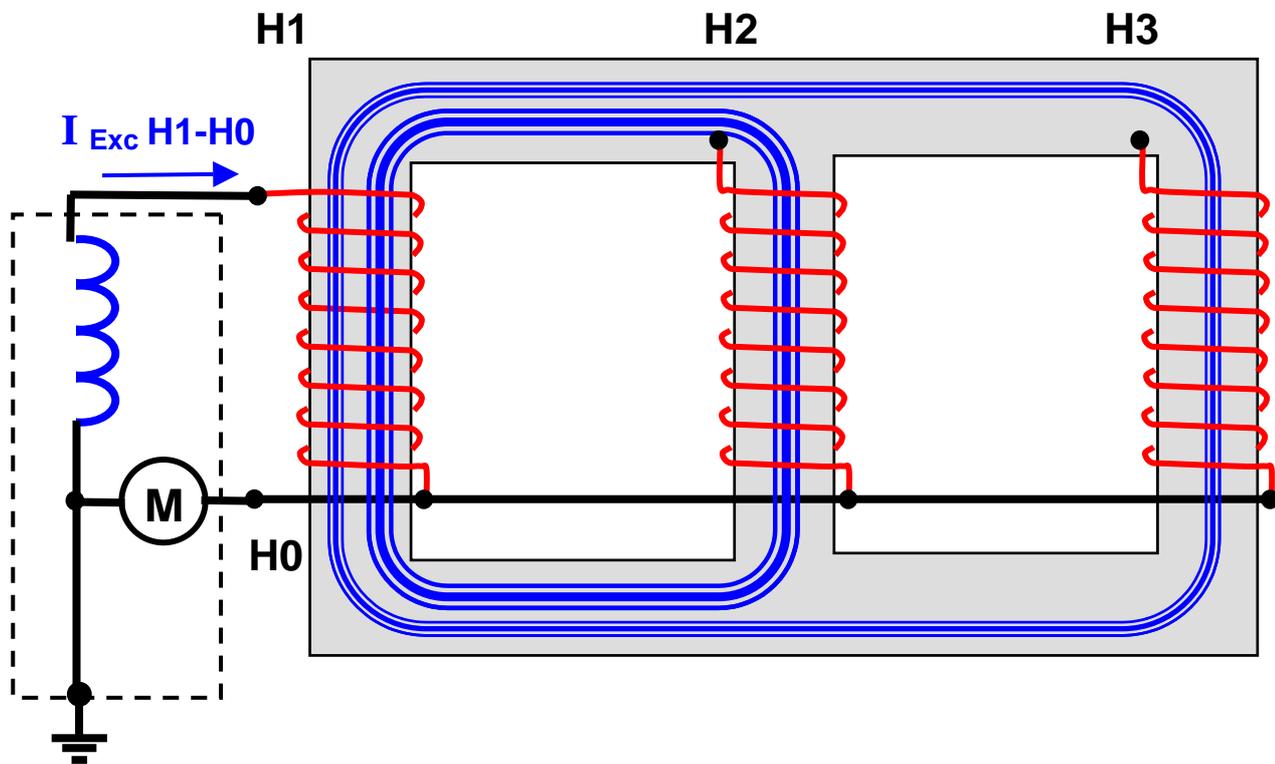


- A IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO É PROPORCIONAL À DISTÂNCIA ENTRE OS ENROLAMENTOS.
- MAIORES TENSÕES → MAIOR NBI → MAIOR Z % (DADO DE PLACA)
- SEU VALOR PODE SER CALCULADO A PARTIR DA Z %
- MEDIÇÃO POR FASE → VANTAGENS PARA FINS DE DIAGNÓSTICO

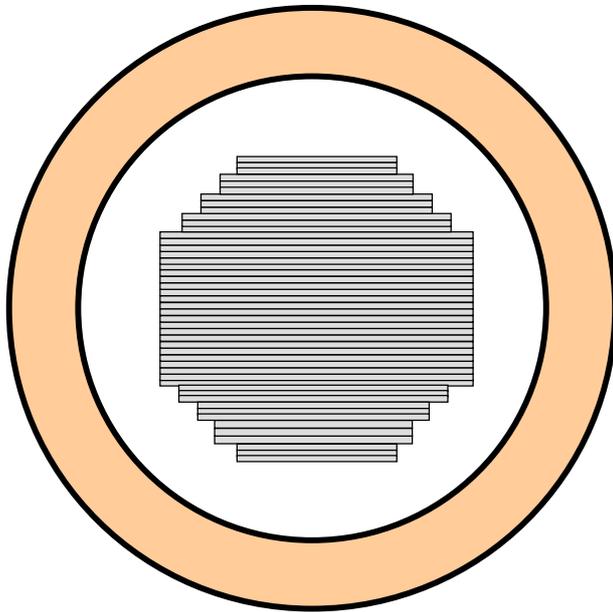
$$Z \Omega = [Z\% \times kV] / [100 \times MVA]$$



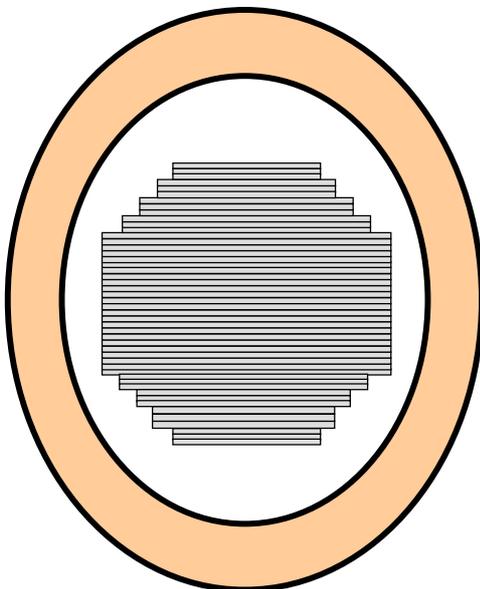
- MEDIÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO



LEI: O CIRCUITO MAGNÉTICO TENDE A CONFIGURAR-SE DE MODO A ESTABELECEER SEU FLUXO MÁXIMO.

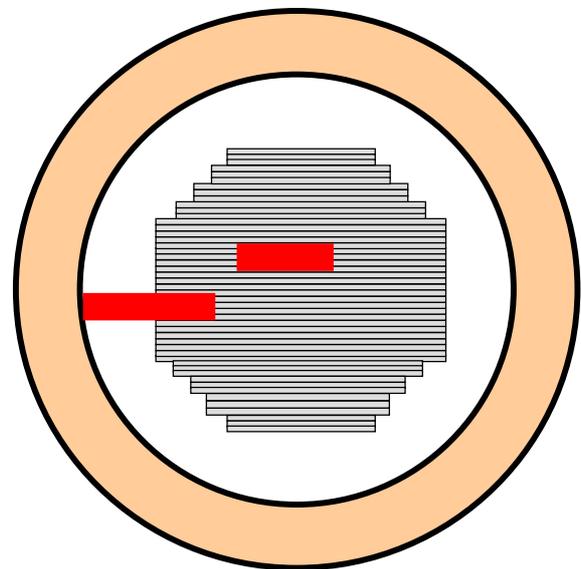


I_{EXC} NORMAL



**ENROLAMENTO
DEFORMADO**

$I_{EXC} > I_{EXC}$ NORMAL



**NÚCLEO COM LÂMINAS
EM CURTO-CIRCUITO**

$I_{EXC} > I_{EXC}$ NORMAL

- **CAPACITÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E ENTRE ENROLAMENTO DE BT E MASSA**

(PARA DEFORMAÇÕES DEVIDAS A CURTO-CIRCUITO EXTERNO)

a) CHX: DIMINUI

b) CX: AUMENTA

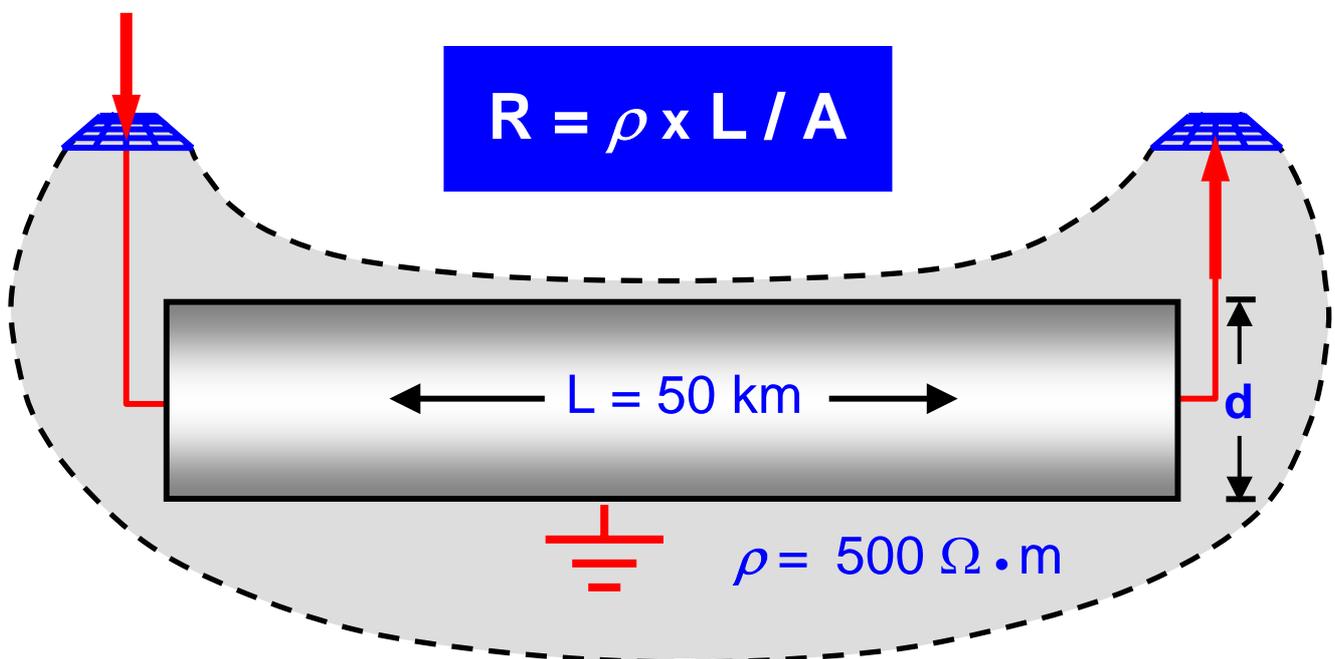
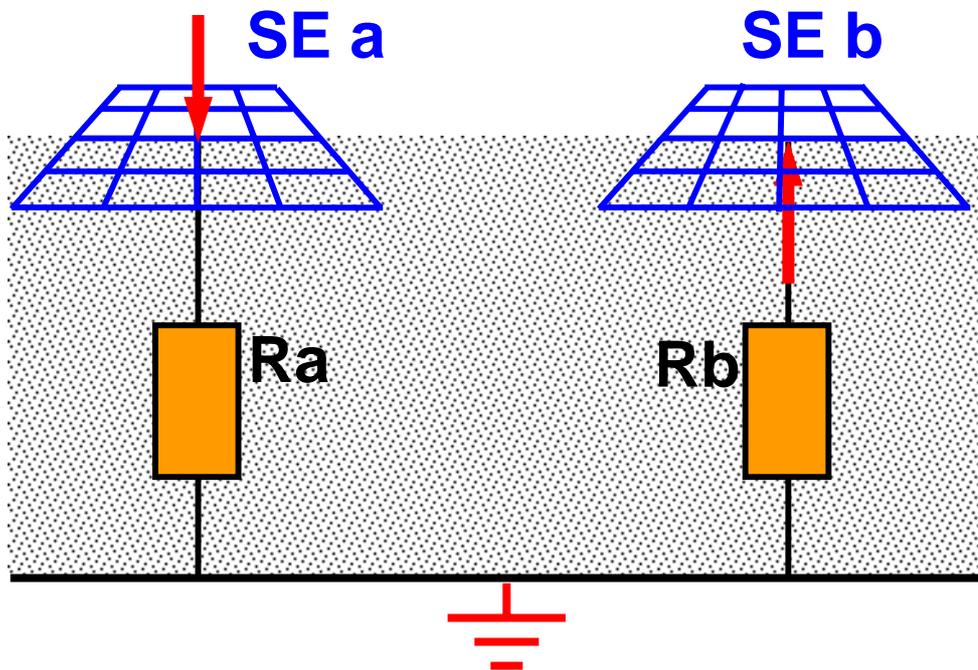
Cuidados ao analisar dados

Trata-se de variações pequenas;

As variações comentadas acima para os valores de CHX e CX devem ser simultâneas;

Desta forma ficam minimizados os efeitos da variação da temperatura e da umidade sobre os valores das capacitâncias medidas.

SISTEMAS DE ATERRAMENTO



$$A = [\rho \times L] / R. \quad \text{Considerando } R_a + R_b = 20 \Omega,$$

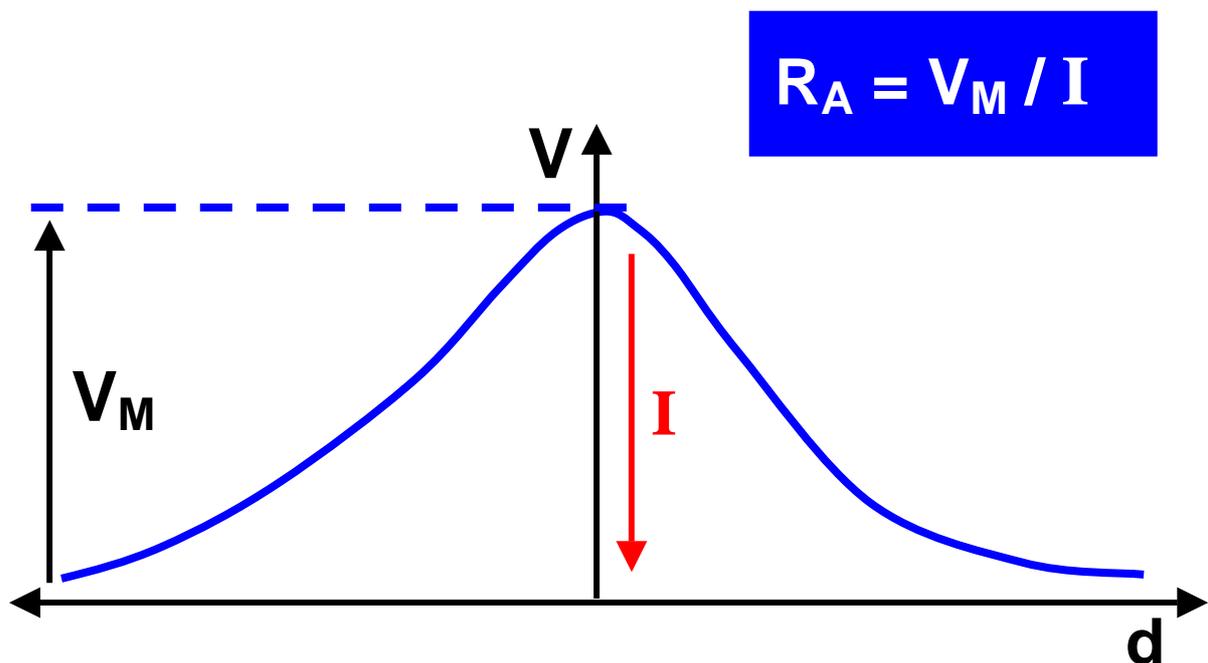
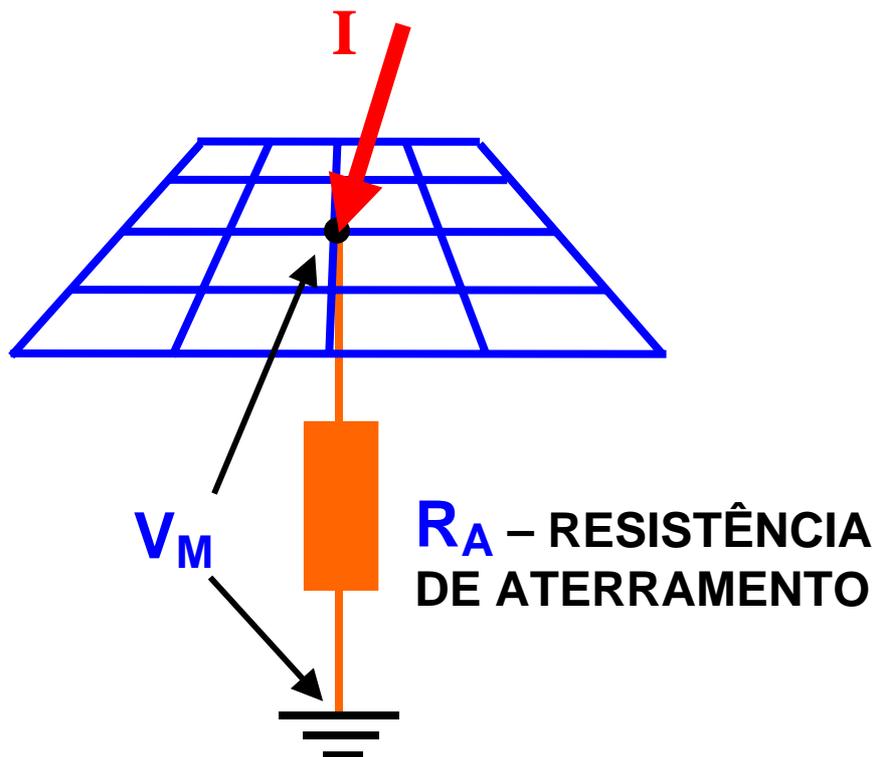
$$A = [500 \times 50.000] / 20 = 1.250.000 \text{ m}^2$$

→ cilindro de solo com diâmetro $d = 1,26 \text{ km}$ ⁵⁸

LEI DE OHM, CONSIDERAÇÕES

Parâmetros concentrados $\rightarrow V = I \times R$ (caso particular)

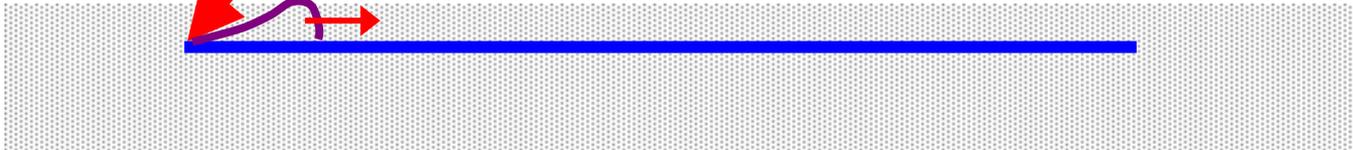
Parâmetros distribuídos $\rightarrow \vec{E} = \vec{J} \times \rho$ (em cada ponto)



COMPORTAMENTO FRENTE A SURTO ATMOSFÉRICO

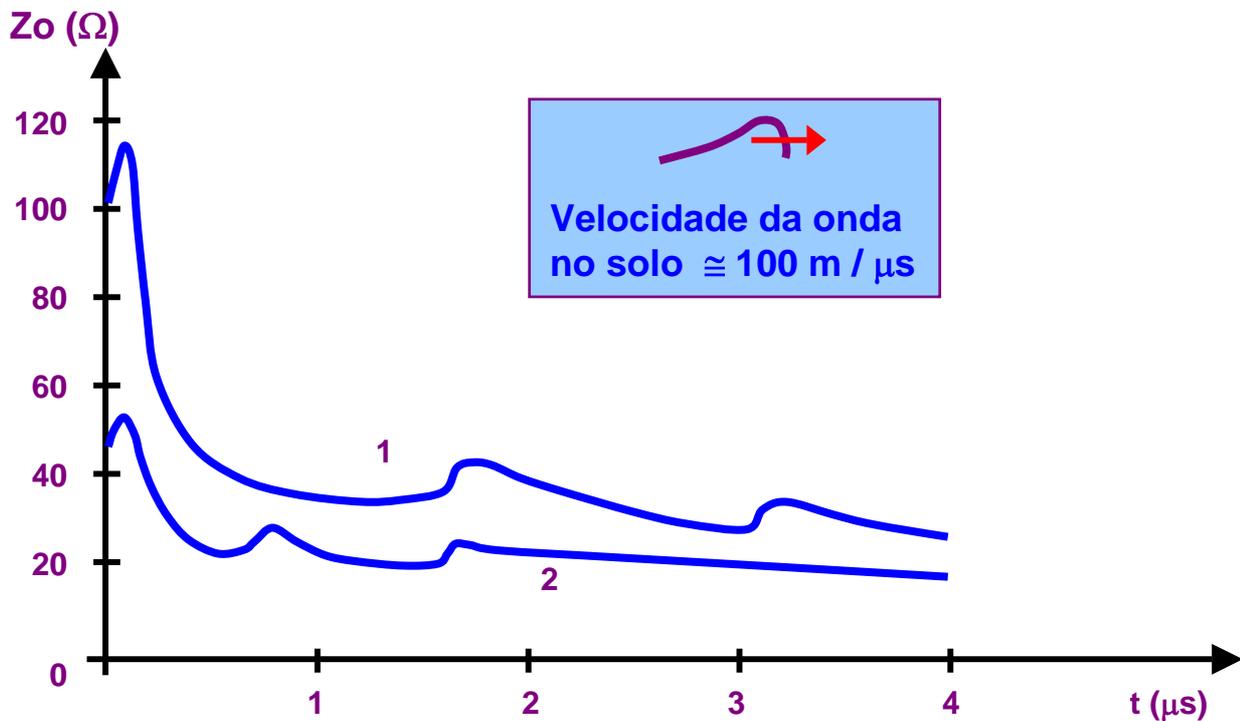
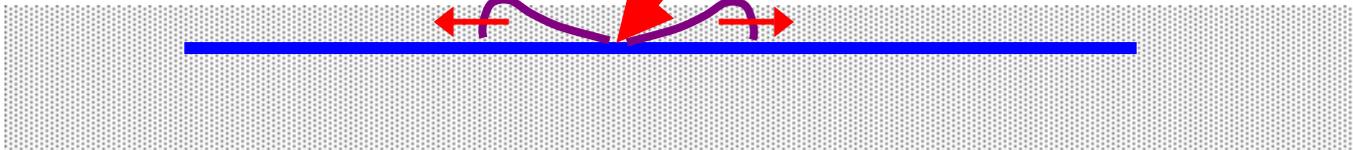
Surto de Corrente

Caso 1: $L = 100 \text{ m}$
 $\rho = 1.000 \Omega \cdot \text{m}$



Surto de Corrente

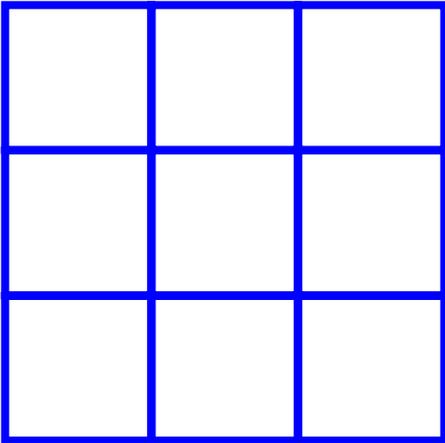
Caso 2: $L = 100 \text{ m}$
 $\rho = 1.000 \Omega \cdot \text{m}$



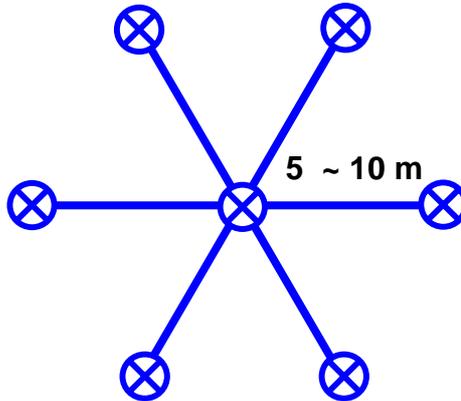
Variação da Impedância de Surto de um eletrodo horizontal,
 $L = 100 \text{ m}$; solo com $\rho = 1.000 \Omega \cdot \text{m}$

CONFIGURAÇÕES DE MALHAS

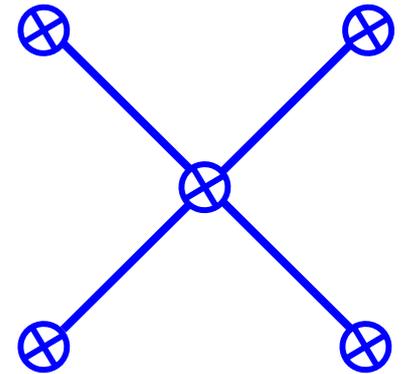
MALHA DE SUBESTAÇÃO



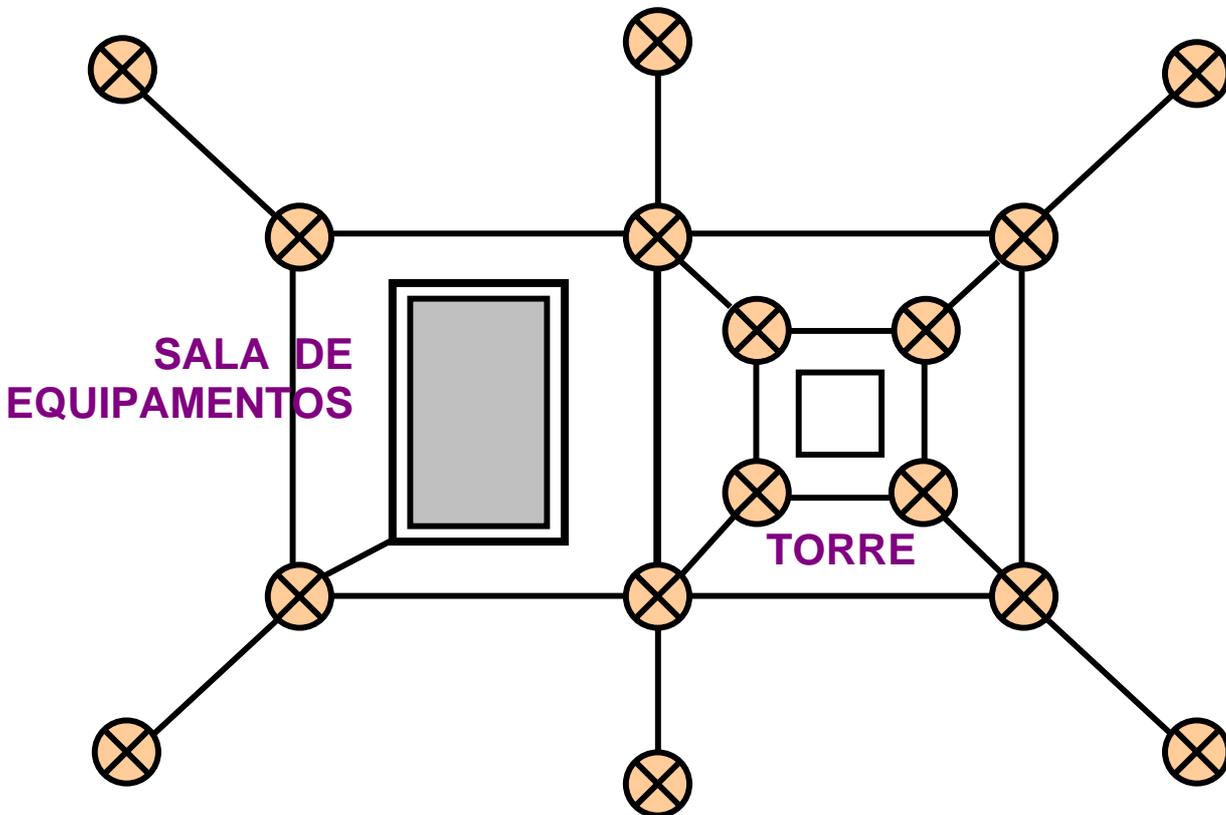
ATERRAMENTO DE AT EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO (pára-raios, chaves, TDs...)



SOLO DE ALTA RESISTIVIDADE

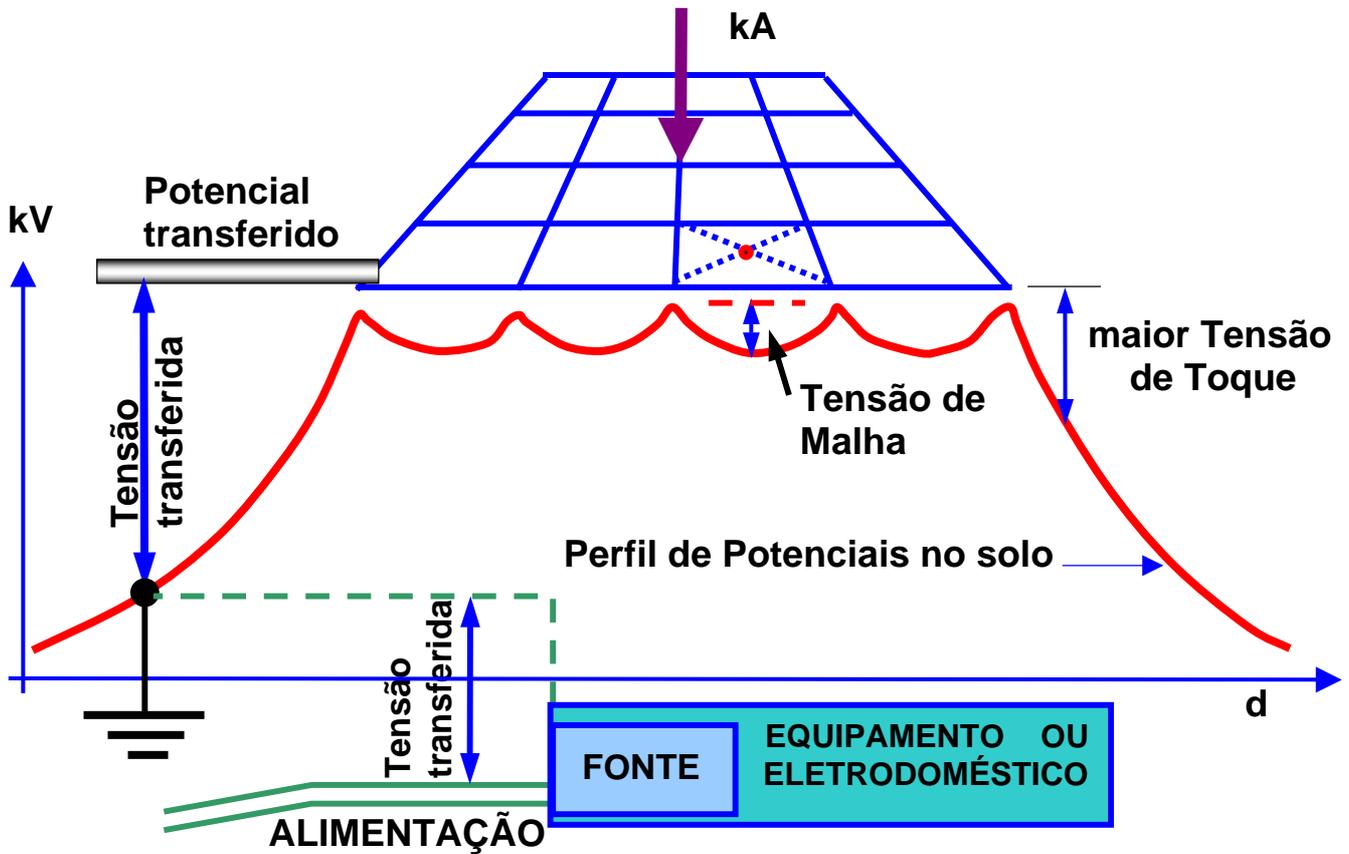


SOLO DE BAIXA RESISTIVIDADE



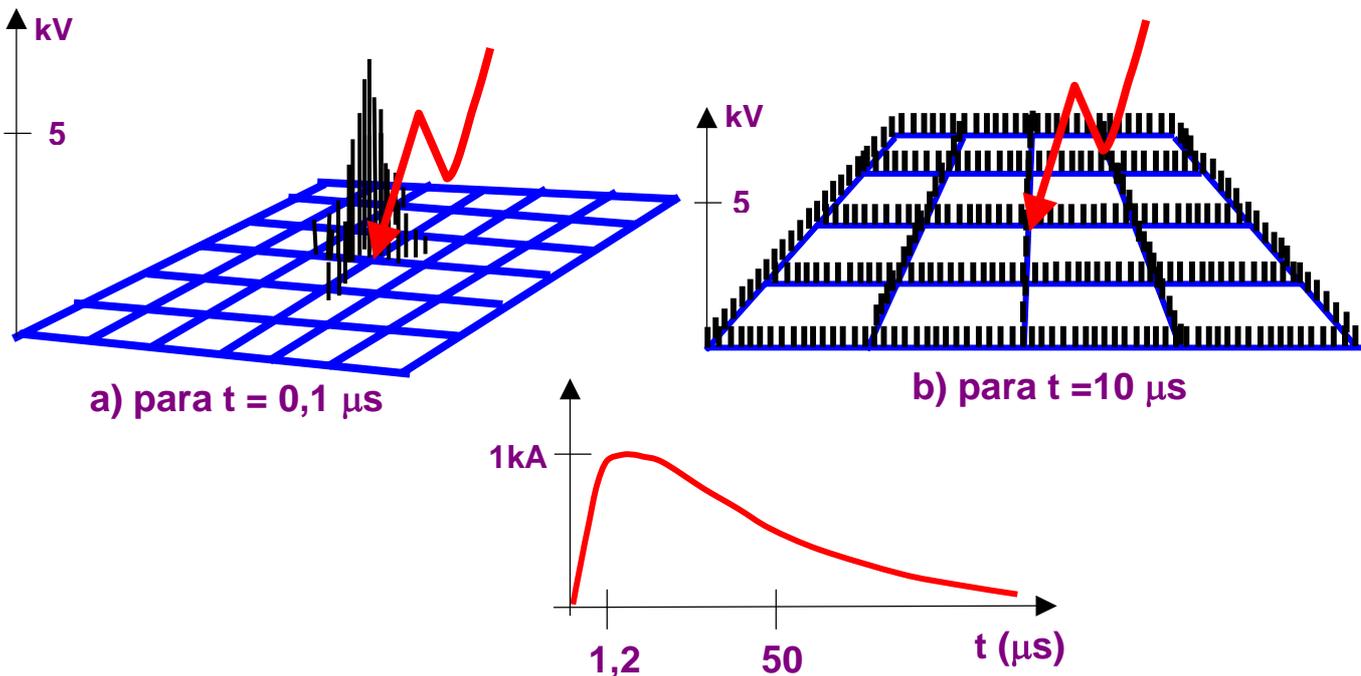
MALHA DE ESTAÇÃO DE TELECOMUNICAÇÕES

MALHA DE SE – COMPORTAMENTO EM BAIXA FREQUÊNCIA



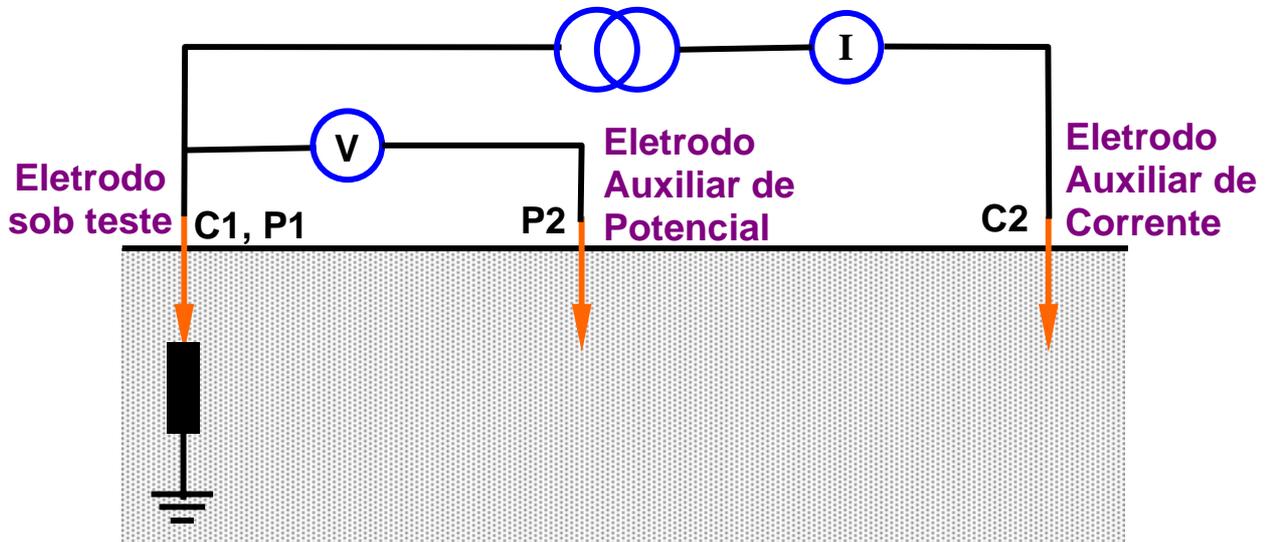
COMPORTAMENTO COM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Elevação de Tensão em Malha de 60 m x 60 m quando uma descarga impulsiva de 1,2 / 50 μ s com amplitude de 1 kA é injetada no centro

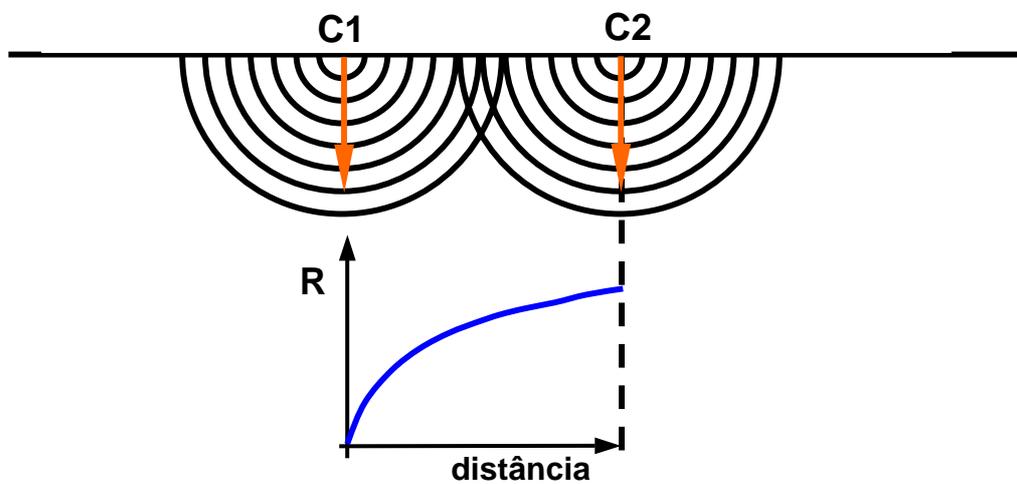


MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

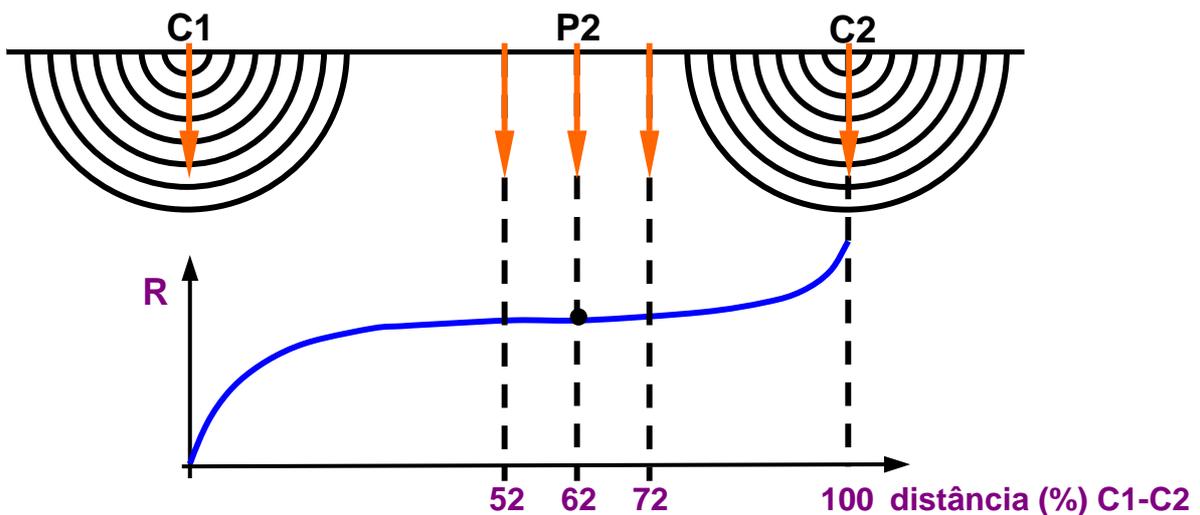
MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL E MÉTODO DO 62 %



Áreas de Resistência Efetiva (sobrepostas)



Áreas de Resistência Efetiva (não sobrepostas)



OBSERVAÇÃO:

NO MÉTODO DOS 62 % MEDEM-SE TAMBÉM OS VALORES DE RESISTÊNCIA PARA 52 % E 72 % DA DISTÂNCIA TOTAL.

A DIFERENÇA ADMISSÍVEL ENTRE ESTES VALORES DEPENDE DO CRITÉRIO ADOTADO (2 %, 5 % OU 10 %).

AS DISTÂNCIAS MÍNIMAS RECOMENDADAS ENTRE OS ELETRODOS DE CORRENTE, C1 E C2, EM MALHAS DE TERRA DE SE, SÃO FUNÇÃO DA MAIOR DIMENSÃO (MAIOR DIAGONAL).

Maior dimensão (m)	Distância (C1 – C2) (m)	Patamar (P1 – P2) (m)
entre 2 e 7	100	62
13	110	68
20	130	81
27	150	93
33	165	102
40	180	112
45	200	124
55	210	130
60	225	140
65	235	146
> 65 m	3,5 x maior dimensão (no máximo: 600 m)	0,62 x (C1--C2)

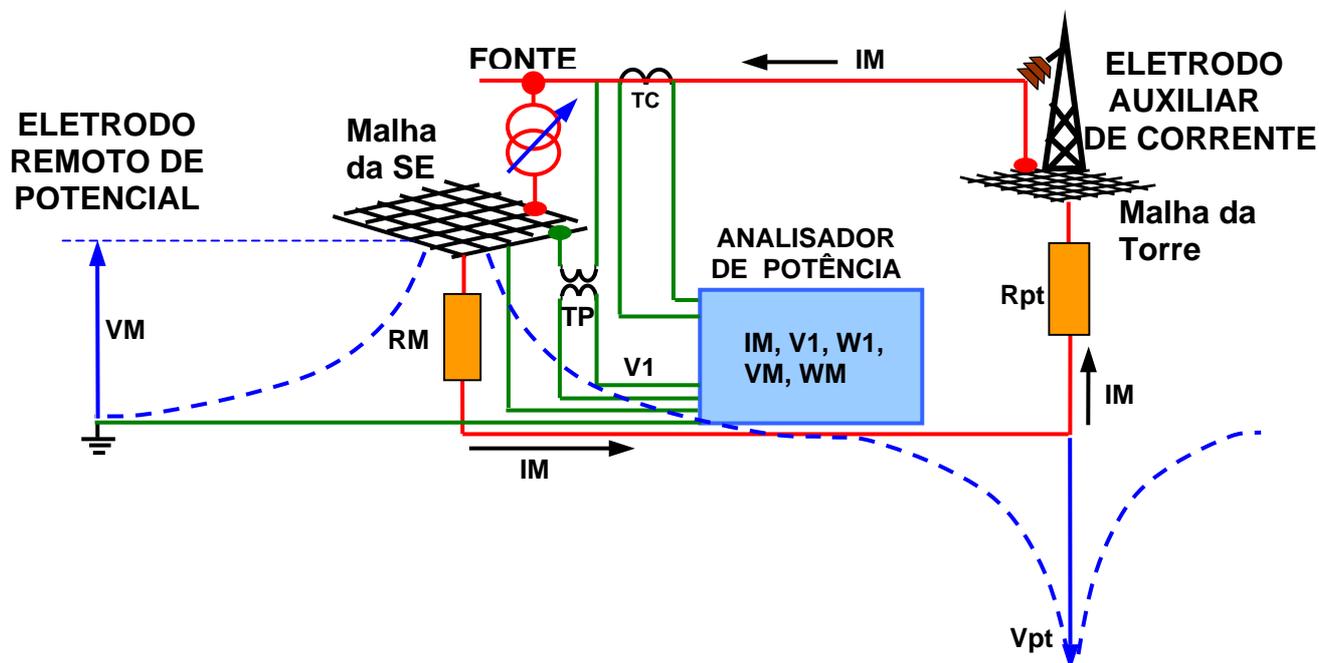
ATENÇÃO: USAR LUVAS!!

- MOTIVOS**
- SURTOS DE MANOBRA
 - CURTO-CIRCUITO
 - TEMPO RUIM
 - INTERFERÊNCIA DE (LTs, LDs)

LIMITAÇÕES DO MÉTODO CONVENCIONAL

- Solo de Alta Resistividade (a corrente de ensaio fica limitada)
- Interferência
- Impedância dos cabos

MÉTODO DE INJEÇÃO DE ALTAS CORRENTES

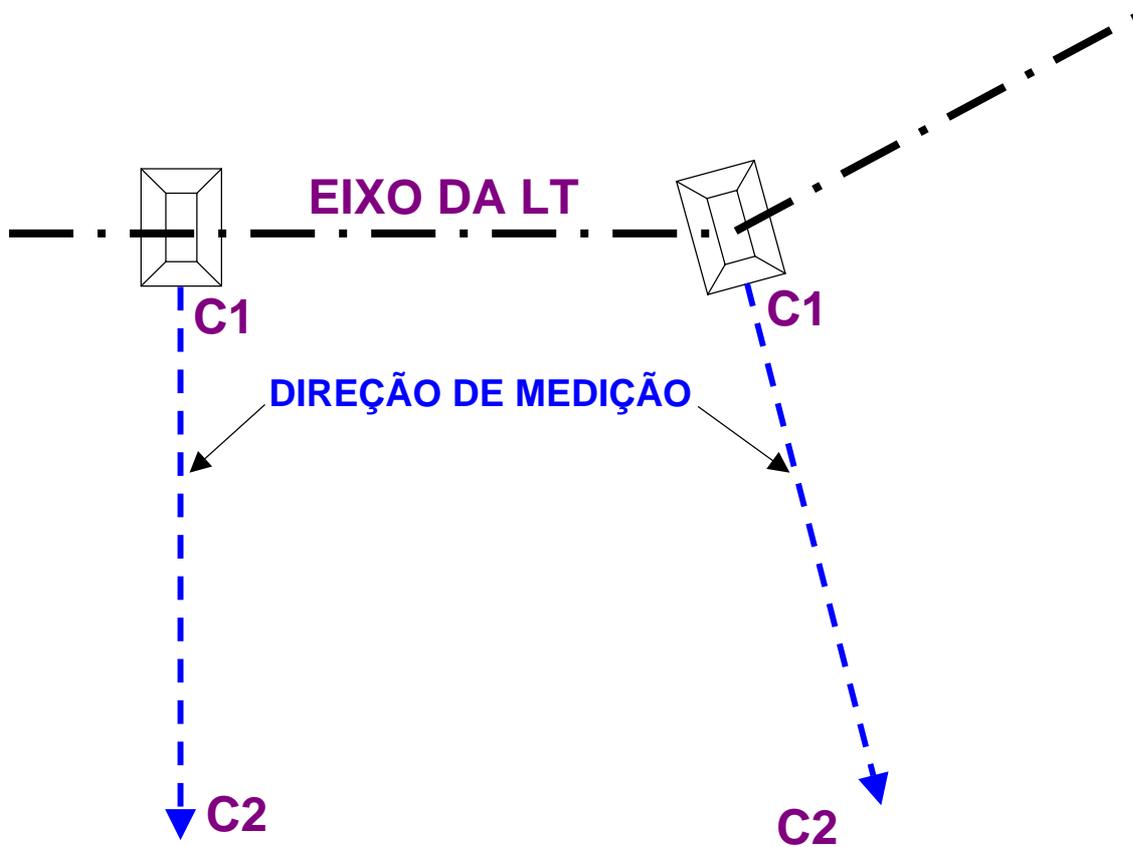


- Aplicação: malhas de SEs novas, malhas de áreas grandes.
- Eletrodo auxiliar de corrente 3 ~ 5 km: LT
- Eletrodo remoto de Potencial > 1km (verificação prática ...)
- Interferência, cancelamento com inversão de polaridade da fonte
- Trabalho de isolamento do cabo guarda da torre escolhida
- Medição da corrente de retorno pelos cabos de cobertura
- Medição de potenciais de passo, toque, malha (contato)
- Problema com a potência e controle da corrente. Ex: 10 ohms com 50 A: 25 kVA, 500 V – ajustáveis. Algumas empresas adotam ligar 220 V de secundário de TD diretamente e adotar a corrente que aparecer.
- Custo elevado
- Resultados:

Normalmente os valores obtidos são menores aos estimados.
Comentários. Distância vs Profundidade / r ; indutância em 60 Hz e kHz

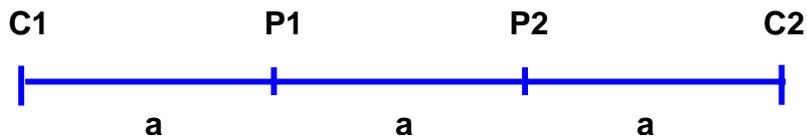
RESISTÊNCIA DE PÉ DE TORRE

PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PÉ DE TORRE USAM-SE 60 OU 80 METROS ENTRE C1 E C2 E UM CRITÉRIO DE 20 % PARA A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MEDIDA ENTRE PONTOS INTERMEDIÁRIOS.
DIREÇÃO ORTOGONAL AO EIXO DA LT OU NA BISSETRIZ EXTERNA



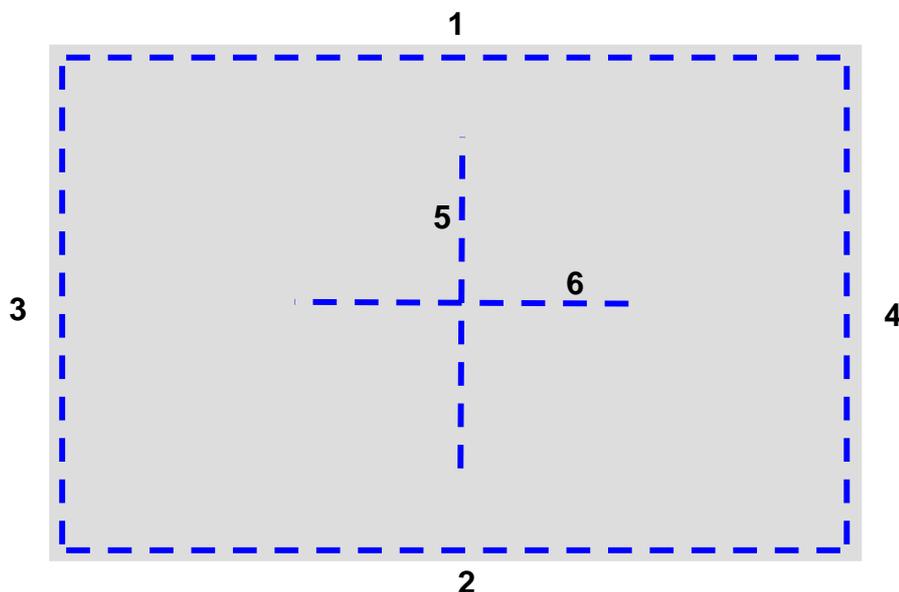
MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO MÉTODO DOS QUATRO PONTOS (WENNER) (ANTES DE DIMENSIONAR MALHA)

A) **APÓS** TERRAPLENAGEM DO SOLO PARA CONSTRUÇÃO DE SE



MEDE-SE A RESISTÊNCIA PARA $a = 4, 8, 16, 32 \text{ m} \dots$ EM DOIS EIXOS ORTOGONAIS. A RESISTIVIDADE É DADA POR $\rho = 2 \pi R$

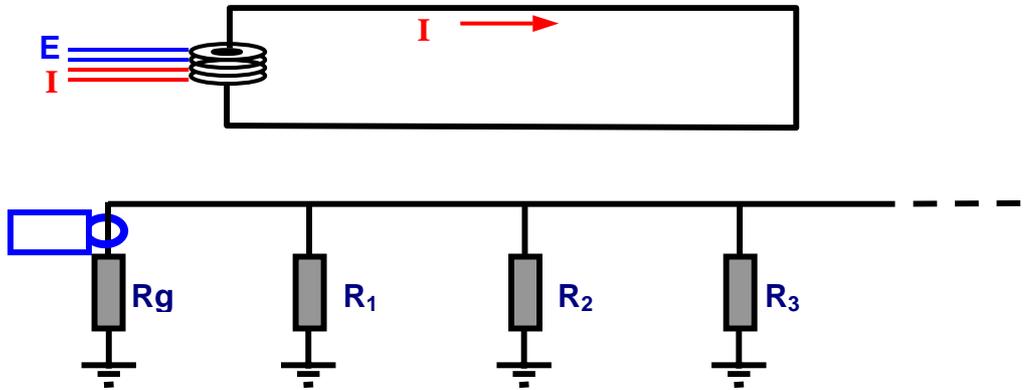
A ANÁLISE DOS VALORES OBTIDOS PERMITE DEFINIR SE O SOLO É HOMOGÊNEO OU SE DEVE SER MODELADO EM CAMADAS, PARA O DIMENSIONAMENTO DA MALHA.



B) EM TERRENO DE LT, PARA DIMENSIONAR CONTRAPESOS, A MEDIÇÃO É FEITA PARA $a = 10, 20, 30 \text{ m}$. SE ENTRE A PRIMEIRA E A SEGUNDA MEDIÇÃO A DIFERENÇA FOR MENOR QUE 20 % A TERCEIRA MEDIÇÃO NÃO É NECESSÁRIA.

ALICATE TERRÔMETRO

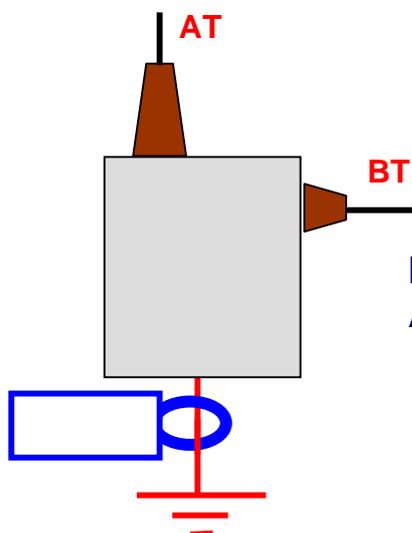
Mede a resistência de eletrodos de aterramento (R_g) em sistemas multi-aterrados. Também mede a corrente de fuga em equipamentos aterrados.



Medição de Resistência de Aterramento com Alicate Terrômetro

O valor de resistência medido pelo instrumento representa a soma da resistência R_g com a resistência equivalente do circuito formado pelas demais resistências de aterramento interligadas (em paralelo).

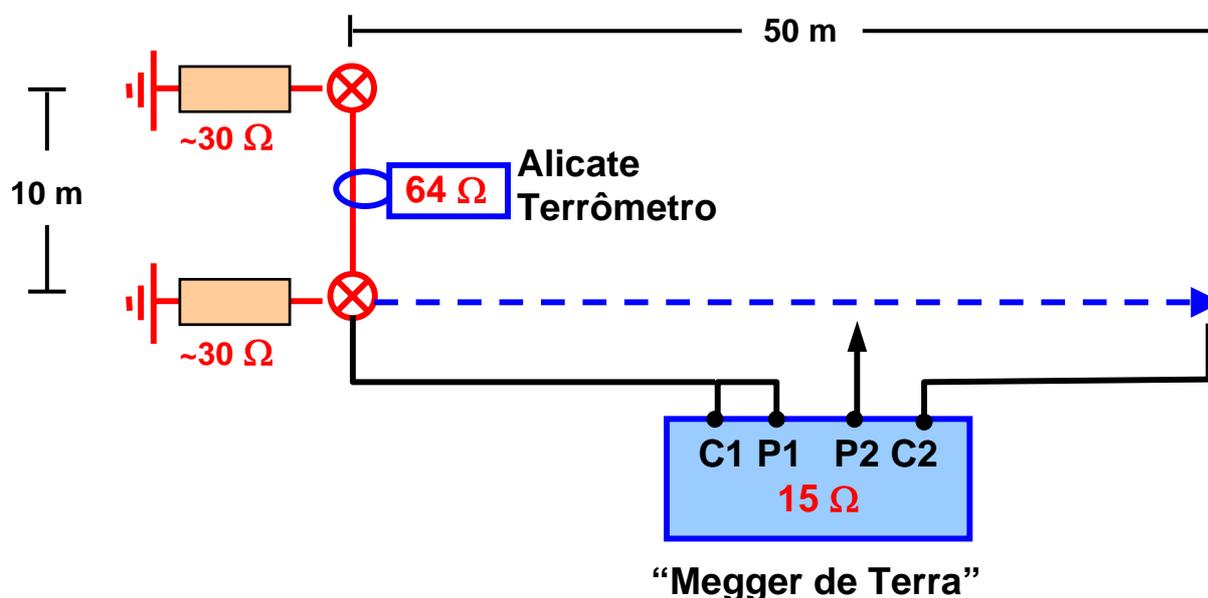
N° de eletrodos	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50
Erro (%)	100,0	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7	14,3	12,5	11,1	5,3	3,4	2,6	2,0



Medição de Corrente de Fuga com Alicate Terrômetro (em transformador)

Alicate Terrômetro x Método da Queda de Potencial

Dois eletrodos de 1,2 metros, $\phi = 17,5$ mm, enterrados na vertical, em solo argiloso, úmido, no centro de um campo de futebol, separados por 10 m e interligados.



Aplicações deste método

- Sistemas multiterrados. O circuito não precisa ser interrompido.
- Indicação de continuidade do circuito sob teste.
- Medição da corrente de fuga para a terra de um equipamento ligado a um eletrodo (ou sistema de aterramento).

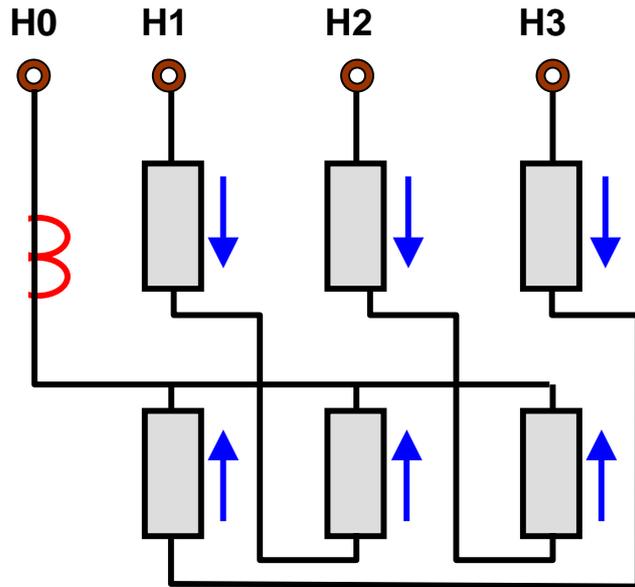
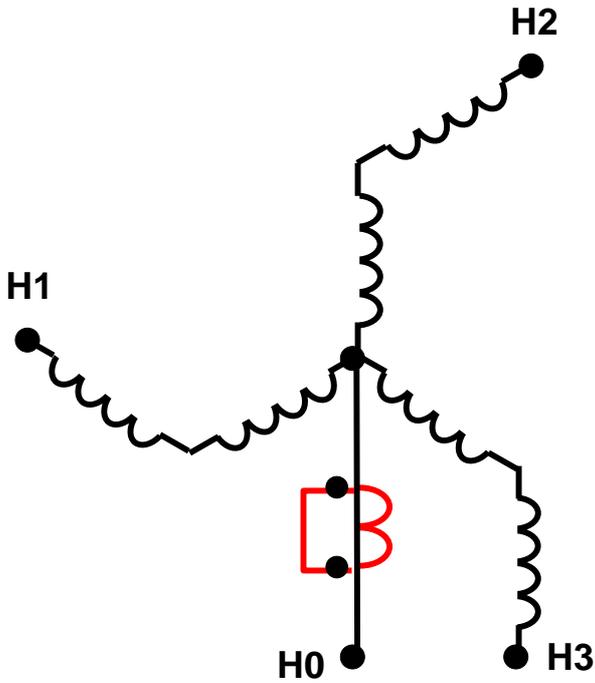
Cuidados necessários

- Verificar se efetivamente se trata de um sistema multiterrado.
- Estimar o número de eletrodos interligados.
- A presença de outros aterramentos, como fundações prediais...
- Campo magnético ≤ 50 A/m e Campo elétrico ≤ 1 V/m, respectivamente. (Minipa ET – 4300) Obs. No interior de residências, estão entre 1 e 10 V/m. Em ambientes urbanos, com RDs, os valores podem ser muito maiores.
- Em SEs subestações energizadas, a aplicação do Alicate Terrômetro para medição de continuidade ou corrente de fuga torna-se inadequada.

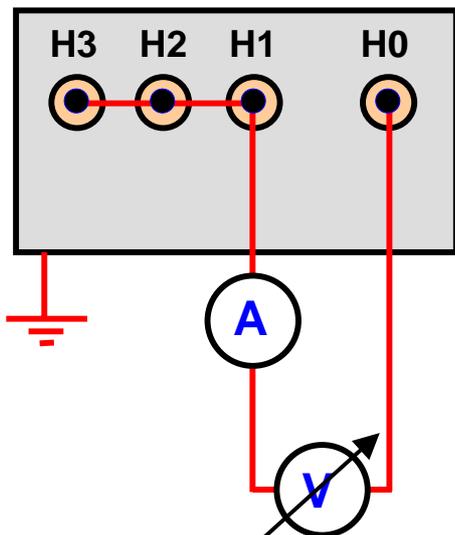
REATOR TRIFÁSICO DE ATERRAMENTO

IMPEDÂNCIA DE SEQÜÊNCIA ZERO. CONCEITO BÁSICO (Z_1 , Z_2 e Z_0)

MEDIÇÃO DE Z_0

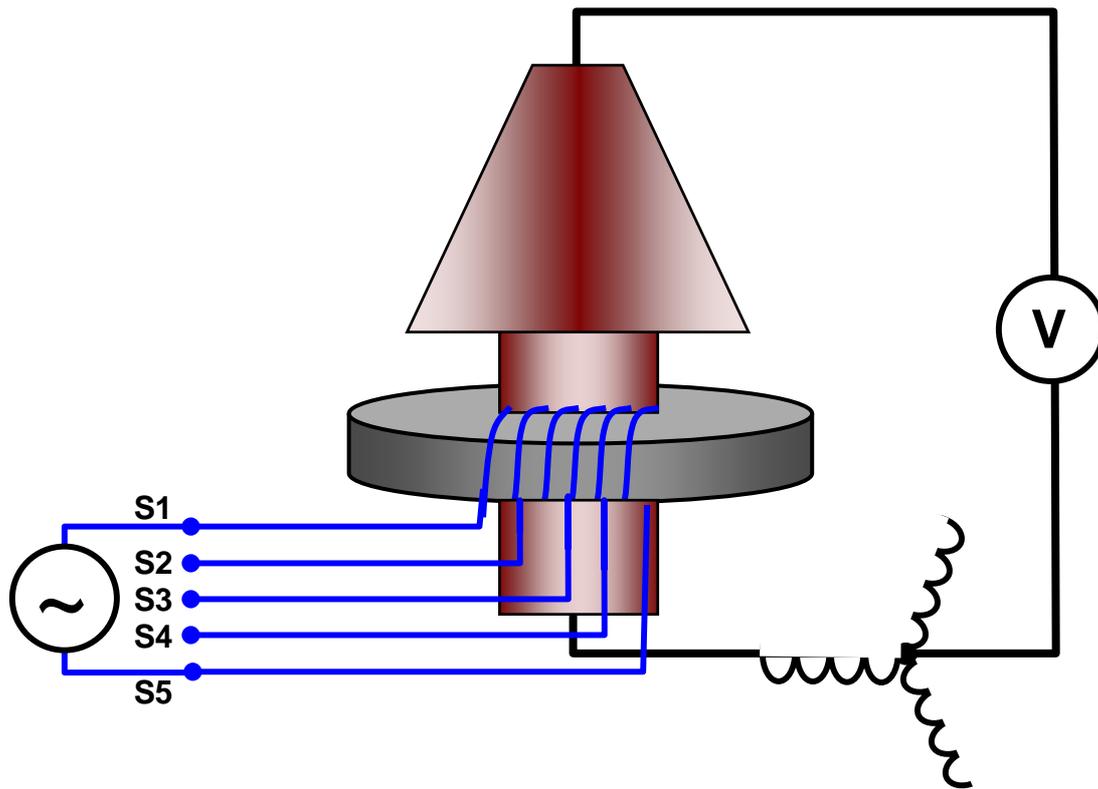


$$L = d\phi / dI$$



$$Z_0 \text{ (por fase)} = 3 V / I$$

TCs de BUCHA – RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO



IDENTIFICAÇÃO BUCHA DO TC	MEDIR TENSÃO ENTRE AS BUCHAS	
	ENROLAMENTO ESTRELA	ENROLAMENTO TRIÂNGULO
H1; X1; Y1	H1-H0; X1-X0; Y1-Y0	H1-H2; X1-X2; Y1-Y2
H2; X2; Y2	H2-H0; X2-X0; Y2-Y0	H2-H3; X2-X3; Y2-Y3
H3; X3; Y3	H3-H0; X3-X0; Y3;Y0	H3-H1; X3-X1; Y3-Y1
H0; X0; Y0	H1-H0; X1-X0; Y1-Y0	—

TENSÃO A SER APLICADA:

1 VOLT / ESPIRA (EX.: 400/5 → 80 ESPIRAS → 80 V

(TENSÃO SEMPRE INFERIOR QUE A TENSÃO DE SATURAÇÃO DO TC)

TENSÕES ESPERADAS (EX: S1-S5 = 400/5 A; S1-S4 = 200/5 A; S1-S2 = 100/5 A)

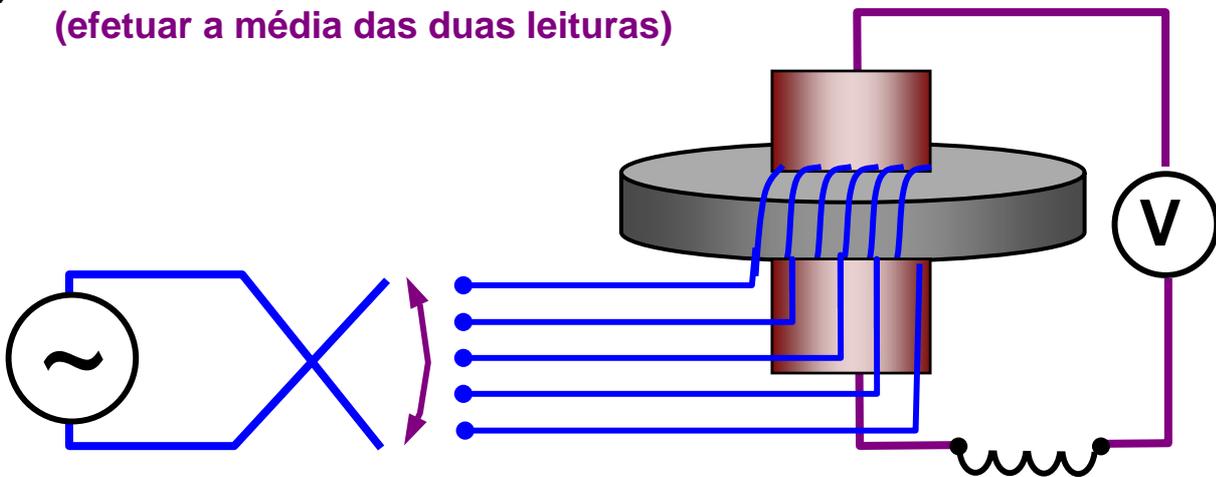
AO APLICAR 80 V ENTRE S1-S5 OBTÉM-SE, NA AT: $80 \times (5 / 400) = 1 \text{ V}$

ENTRE OS BORNES S1-S4 = $80 \times (200 / 400) = 40 \text{ V}$

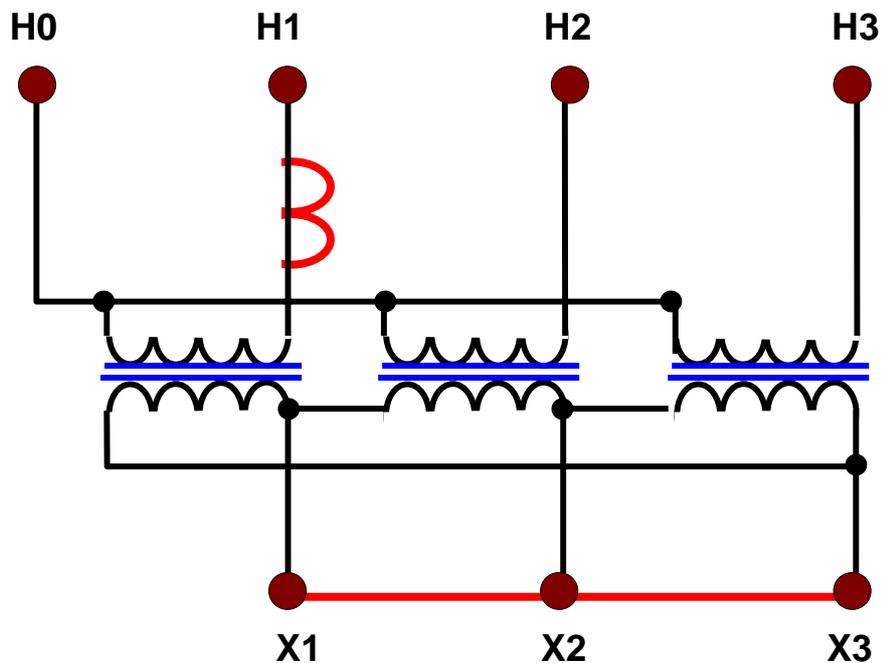
ENTRE OS BORNES S1-S2 = $80 \times (100 / 400) = 20 \text{ V}$

CANCELAMENTO DE INTERFERÊNCIA POR INDUÇÃO

- a) **INVERSÃO DA POLARIDADE DA FONTE**
(efetuar a média das duas leituras)

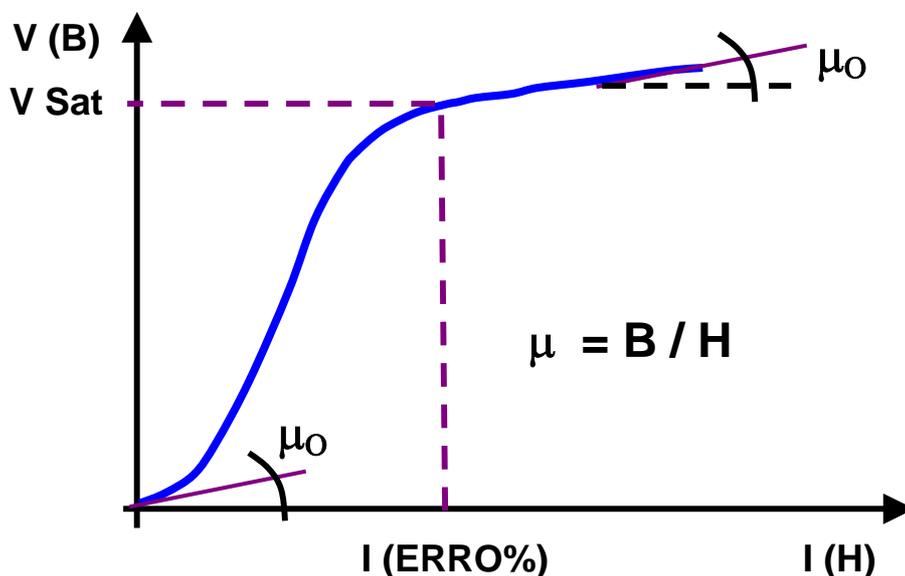


- b) **CURTO-CIRCUITO EM ENROLAMENTO NÃO ENVOLVIDO NO TESTE**



ENSAIO DE SATURAÇÃO EM TCs

CONCEITO DE SATURAÇÃO EM MATERIAIS MAGNÉTICOS



OBJETIVO DO ENSAIO, CLASSE DE EXATIDÃO EM TCs PROTEÇÃO

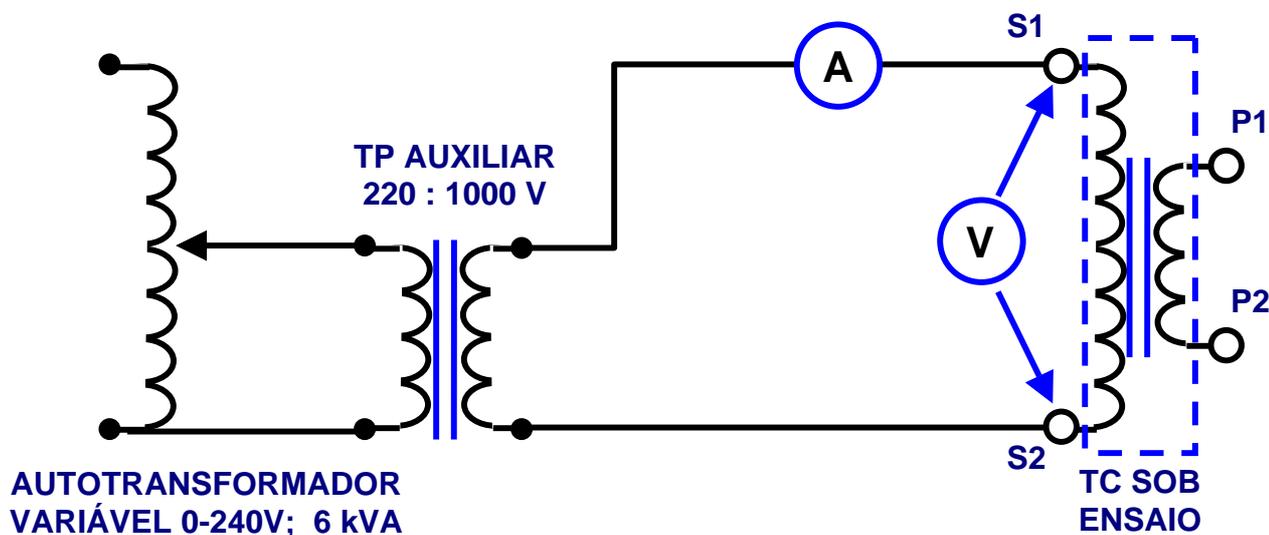
$$V_s = F \times I_N \times \sqrt{(RI + RC)^2 + (XI + XC)^2} \quad [V]$$

Onde:

- V_s = Tensão de Saturação (Ver tabela de cargas nominais)
- F = Fator de Sobrecorrente (ASA, ANSI, NBR 6856 = 20 I_N)
- I_N = Corrente Secundária Nominal (5 A, com raras exceções)
- RI = Resistência do Enrolamento Secundário a 75°C
- RC = Resistência da Carga Nominal
- XI = Reatância do Enrolamento Secundário
- XC = Reatância da Carga Nominal

ASA: H, L (Vmáx)	ANSI: C, T (Vmáx)	EB-251 A, B (VA)	NBR 6856 A, B (Vmáx)	VA	Z (Ω)	XC (Ω)	RC (Ω)
10	10	C 2,5	10	2,5	B – 0,1	0,0436	0,09
20	20	C 5,0	20	5,0	B – 0,2	0,0872	0,18
50	50	C 12,5	50	12,5	B – 0,5	0,2179	0,45
100	100	C 25	100	25	B – 1,0	0,8660	0,50
200	200	C 50	200	50	B – 2,0	1,7321	1,00
400	400	C 100	400	100	B – 4,0	3,4641	2,00
800	800	C 200	800	200	B – 8,0	6,9282	4,00

CARGAS NOMINAIS PARA TCs DE PROTEÇÃO (60 Hz; 5A)



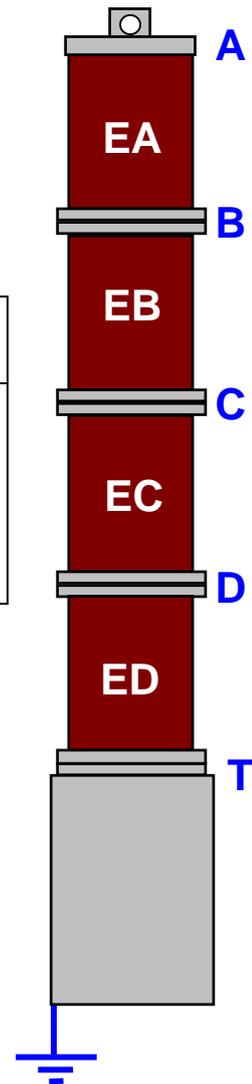
ROTEIRO DO ENSAIO E CUIDADOS NA EXECUÇÃO

- DESMAGNETIZAR NÚCLEO, COM $1,2 \times V_N$ (TABELA). DETALHES
- AJUSTAR VALORES DE CORRENTE SEMPRE NO SENTIDO CRESCENTE (NÃO RETORNAR)
- EMPREGAR VALORES PRÓXIMOS DE 0,01 – 0,02 – 0,03 – 0,05 – 0,10 – 0,20 – 0,30 – 0,50 – 0,70 – 1,00 – 2,00 – 3,00 e 5,00 A
- PLOTAR DADOS ($V \times I$) EM PAPEL LOG-LOG
- EXTRAPOLAR CURVA PARA OBTER VALOR CORRESPONDENTE A 10 A ($10\% I_n \times F$, no caso de 5 A e $F = 20$)
- COMPARAR VALOR OBTIDO COM V_N CALCULADO
- NO CASO DE TC COM ESPIRAS EM CURTO, O ENSAIO MOSTRA VALORES EXTREMAMENTE BAIXOS DE TENSÃO (A CORRENTE CRESCE RAPIDAMENTE)

ENSAIOS DE ISOLAMENTO EM PÁRA-RAIOS

RESISTÊNCIA DA ISOLAÇÃO

ELEMENTO ENSAIADO	CABO LINE	CABO EARTH	OBSERVAÇÕES
EA	A	B + T	MEDIR O VALOR DE R (MΩ), 1 MINUTO (COM 2,5 OU 5,0 kV)
EB	B	C + T	
EC	C	D + T	
ED	D	T	
COLUNA	A	T	



MEDIDOR DE CORRENTE DE FUGA

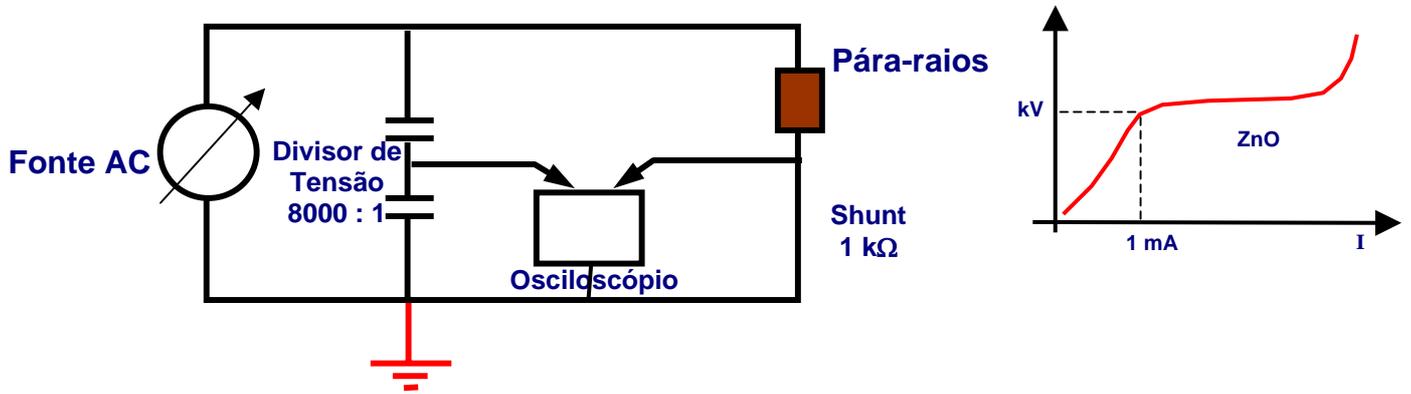
- CRITÉRIO: $I > 3 \times I \text{ INICIAL}$

FATOR DE POTÊNCIA DA ISOLAÇÃO

ELEMENTO ENSAIADO	CABO HV	CABO LV	POS. CHAVE	OBSERVAÇÕES
EA	A	B	UST	MEDIR OS VALORES em mW e mVA (COM 2,5 OU 5,0 kV)
EB	B	C	UST	
EC	C	D	UST	
ED	D	C	GUARD	
COLUNA	A	T	GROUND	

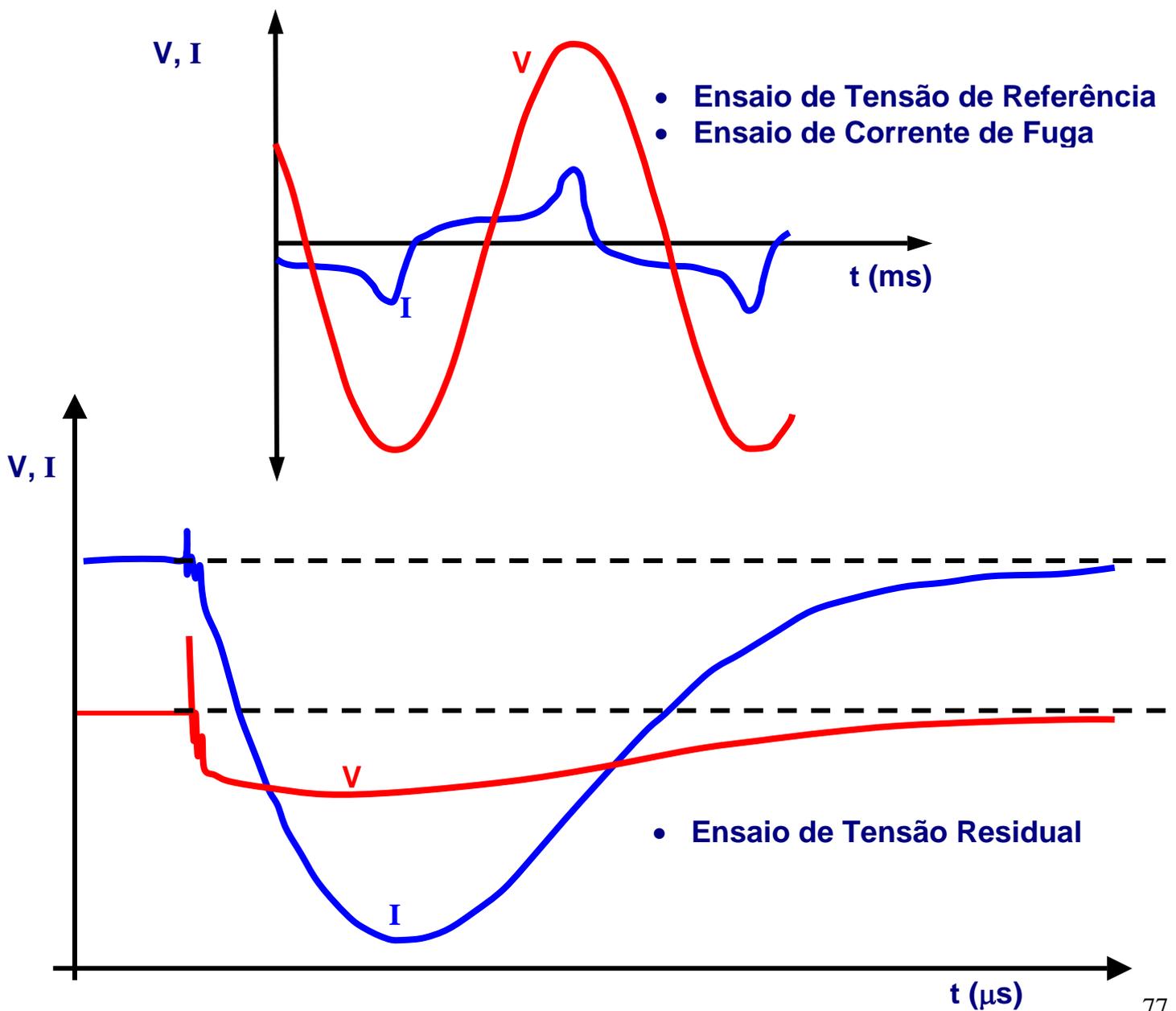
TERMOVISOR: COERÊNCIA COM mW E MΩ.

- CRITÉRIO: $\Delta t^\circ = + 2 \text{ }^\circ\text{C}$ PARA QUALQUER SEÇÃO.
- CUIDADOS COM REFLEXÕES INFRAVERMELHAS, PORCELANA COM SUPERFÍCIE IRREGULAR, CONTAMINAÇÃO...



Medição da Tensão de Referência e Corrente de Fuga – Circuito de Ensaio

Formas de Onda da Tensão e Corrente



ENSAIOS EM CABOS / MUFLAS

TIPOS DE ISOLAÇÃO SÓLIDA DE CABOS

MATERIAL		DENOM.
TERMOPLÁSTICO	CLORETO DE POLIVINILA ATÉ $V_0 / V = 0,6 / 1,0$ kV	PVC / A
	CLORETO DE POLIVINILA ATÉ $V_0 / V = 12 / 20$ kV	PVC / B
	POLIETILENO ATÉ $V_0 / V = 12 / 20$ kV	PE
TERMOFIXO	ETILENO + PROPILENO OU SIMILAR (EPM, EPDM) ATÉ $V_0 / V = 27 / 35$ kV	EPR
	POLIETILENO RETICULADO QUIMICAMENTE ATÉ $V_0 / V = 27 / 35$ kV	XLPE

Onde:

V_0 = VALOR EFICAZ DA TENSÃO ENTRE CONDUTOR E TERRA OU BLINDAGEM DA ISOLAÇÃO

V = VALOR EFICAZ DA TENSÃO ENTRE CONDUTORES ISOLADOS

CLASSIFICAÇÃO DOS ENSAIOS

A) DE ACEITAÇÃO OU RECEBIMENTO:

- **ENERGIZA-SE UM CONDUTOR COM A BLINDAGEM ATERRADA. OS DEMAIS CONDUTORES DEVEM SER TAMBÉM ATERRADOS.**
- **APLICA-SE 80% DO VALOR DA TENSÃO APLICADA PELO FABRICANTE DURANTE 15 MINUTOS.**
- **CABO EM OPERAÇÃO, DENTRO DO PERÍODO DE GARANTIA, APLICA-SE 65 %, DURANTE 5 MINUTOS.**

B) DE MANUTENÇÃO – APÓS REPAROS NO CABO OU ACESSÓRIOS; OU POR T° ELEVADA (TERMOVISOR)

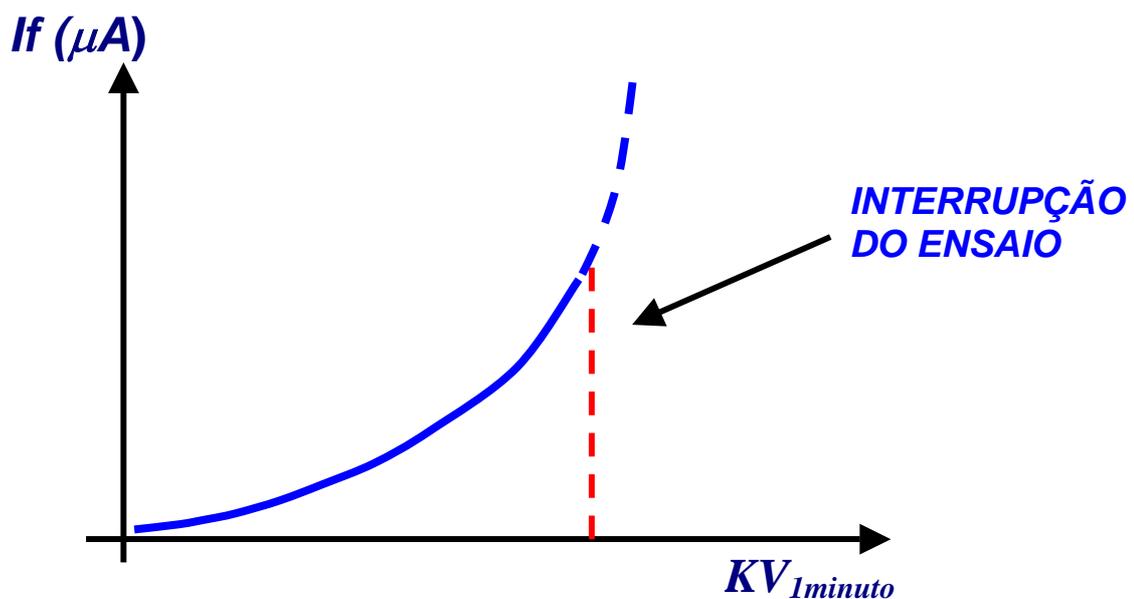
- **APLICA-SE 50% DO VALOR DA TENSÃO APLICADA PELO FABRICANTE**
- **EM INSTALAÇÕES COM MAIS DE 20 ANOS APLICA-SE AOS CABOS, POR 5 MINUTOS, A TENSÃO FASE- FASE DO SISTEMA.
(CLASSE 15 = 15 KV; CLASSE 35 = 35 KV)**

CORRENTE DE FUGA x TENSÃO

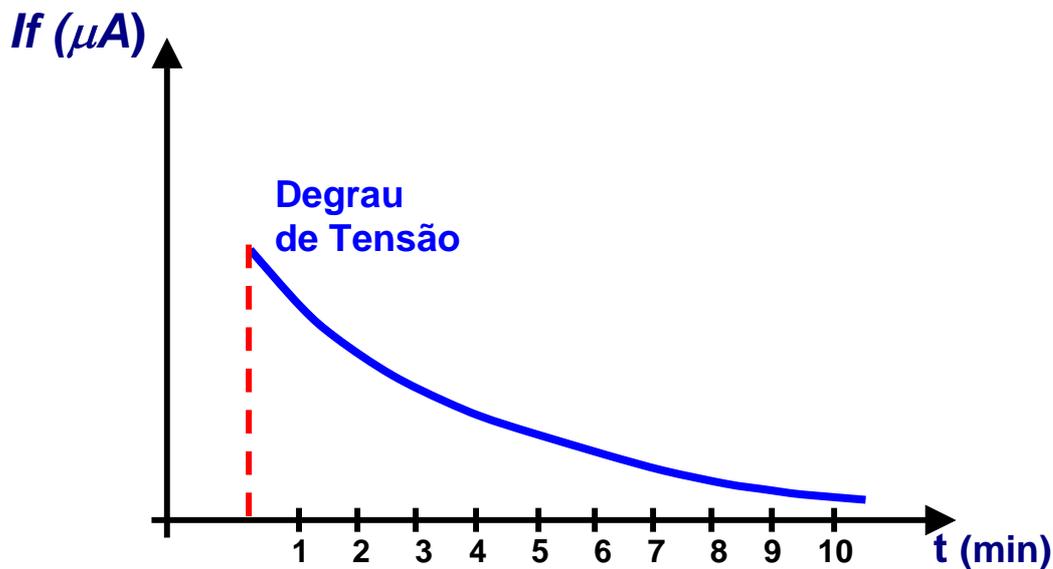
- AUMENTA-SE A TENSÃO LENTAMENTE NA FORMA DE GRAUS DE 5 OU 10 KV
- ENSAIO É INTERROMPIDO SE A CURVA APRESENTAR UMA SUBIDA BRUSCA (PONTO INDICADO NA CURVA) PARA NÃO SOLICITAR DESNECESSARIAMENTE A ISOLAÇÃO DO CABO
- AJUSTAM-SE, LENTAMENTE (DURANTE MEIO MINUTO), OS VALORES DOS DEGRAUS DE TENSÃO, CONFORME TABELA ABAIXO.

V_0 / V (kV)	DEGRAUS DE TENSÃO (kV)
8,7 / 15	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
12 / 20	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55
15 / 25	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
20 / 35	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95

- AGUARDA-SE 1 MINUTO PARA A ESTABILIZAÇÃO DA CORRENTE REGISTRANDO-SE ENTÃO O VALOR DA CORRENTE DE FUGA CORRESPONDENTE.

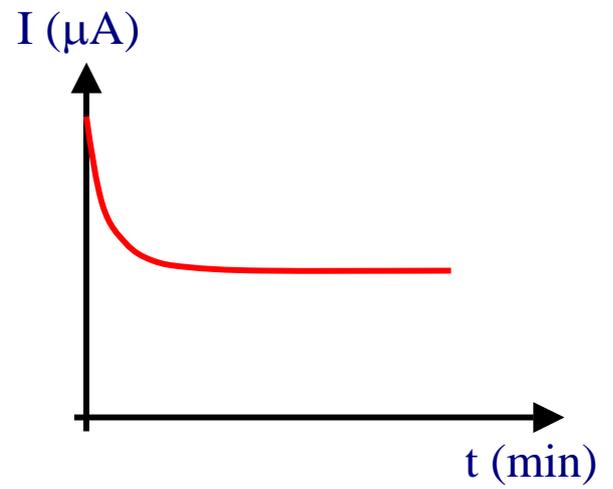
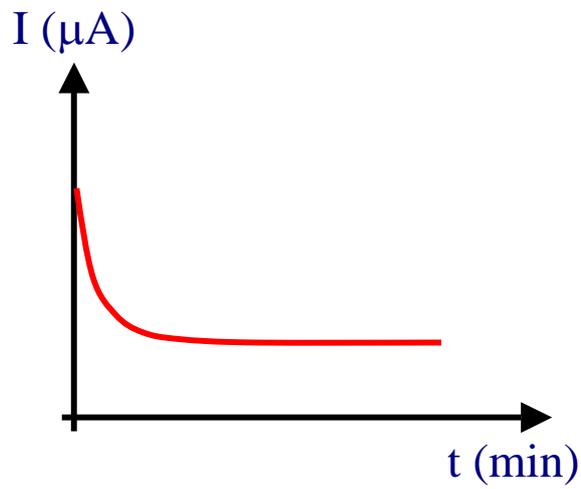


CORRENTE DE FUGA x TEMPO

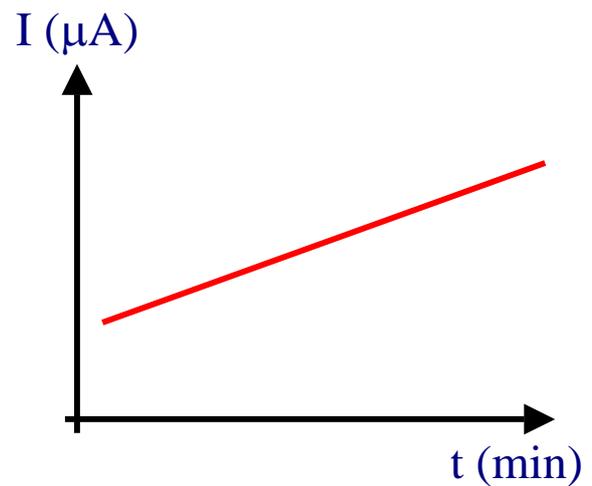
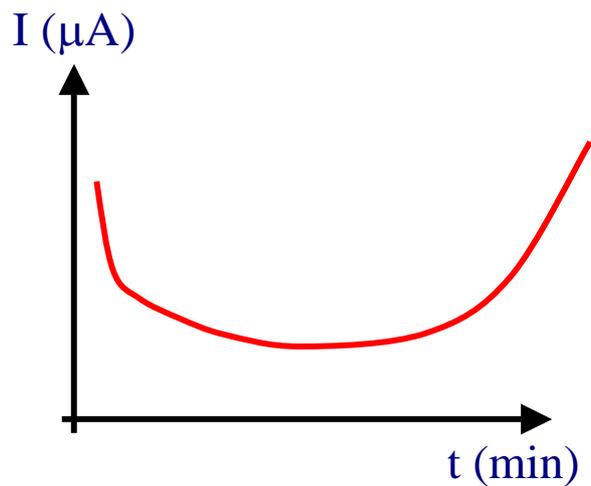


- **IMEDIATAMENTE APÓS ATINGIR A TENSÃO DE ENSAIO REGISTRAR O VALOR DA CORRENTE DE FUGA**
- **FAZER MEDIÇÕES DE 1 EM 1 MINUTO, ATÉ 10 MINUTOS**
- **PLOTAR OS VALORES PARA O GRÁFICO CORRENTE DE FUGA x TEMPO**
- **REDUZIR A TENSÃO ATÉ ZERO E DESCARREGAR O CABO (ATERRAR)**

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

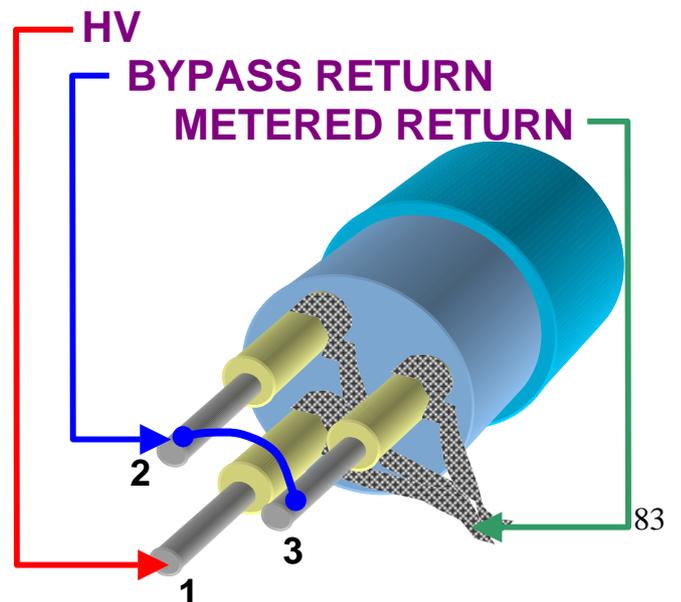
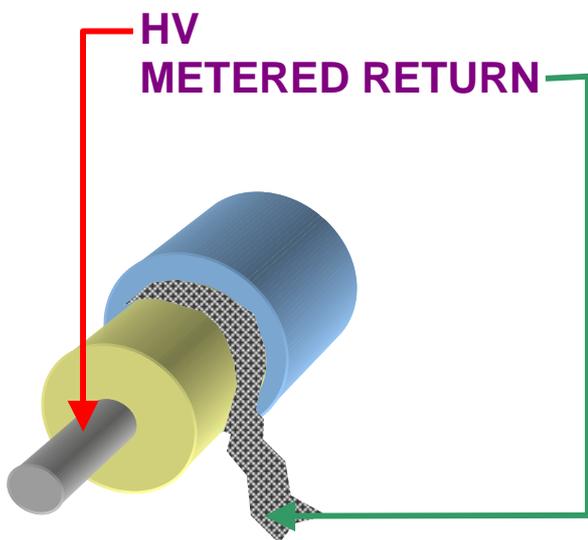
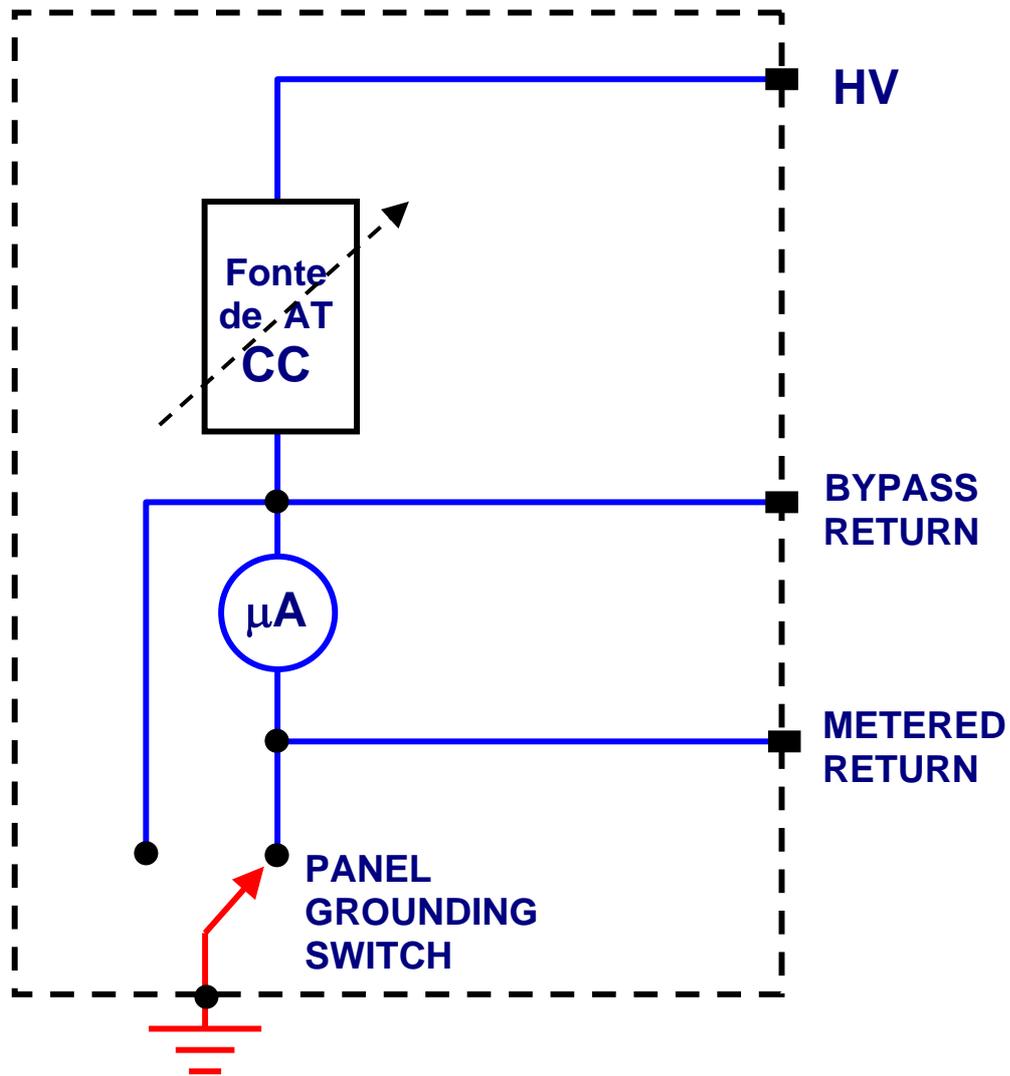


CABOS COM ISOLAÇÃO EM BOAS CONDIÇÕES



CABOS COM ISOLAÇÃO DETERIORADA

ESQUEMA SIMPLIFICADO DE ENSAIADOR TIPO HI-POT



ENSAIOS EM CAPACITORES

A) CAPACITÂNCIA – POTÊNCIA REATIVA

$$C = (I \cdot 10^6) / (E \cdot \omega)$$

ONDE:

C = CAPACITÂNCIA [μ F]

I = CORRENTE EM AMPERES

ω = FREQUÊNCIA ANGULAR $2 \pi f$. PARA 60 Hz \rightarrow 377 [rad/s]

E = TENSÃO APLICADA [V]

POTÊNCIA REATIVA, Q

$$Q = V^2 \cdot \omega \cdot C \cdot 10^{-3}$$

ONDE:

Q = POTÊNCIA REATIVA [kVar]

V = TENSÃO NOMINAL DO CAPACITOR [kV]

C = CAPACITÂNCIA [μ F]

CRITÉRIOS ADOTADOS

A DIFERENÇA ENTRE AS CAPACITÂNCIAS DE DUAS UNIDADES DE MESMA ESPECIFICAÇÃO PODE SER DE ATÉ 15 %

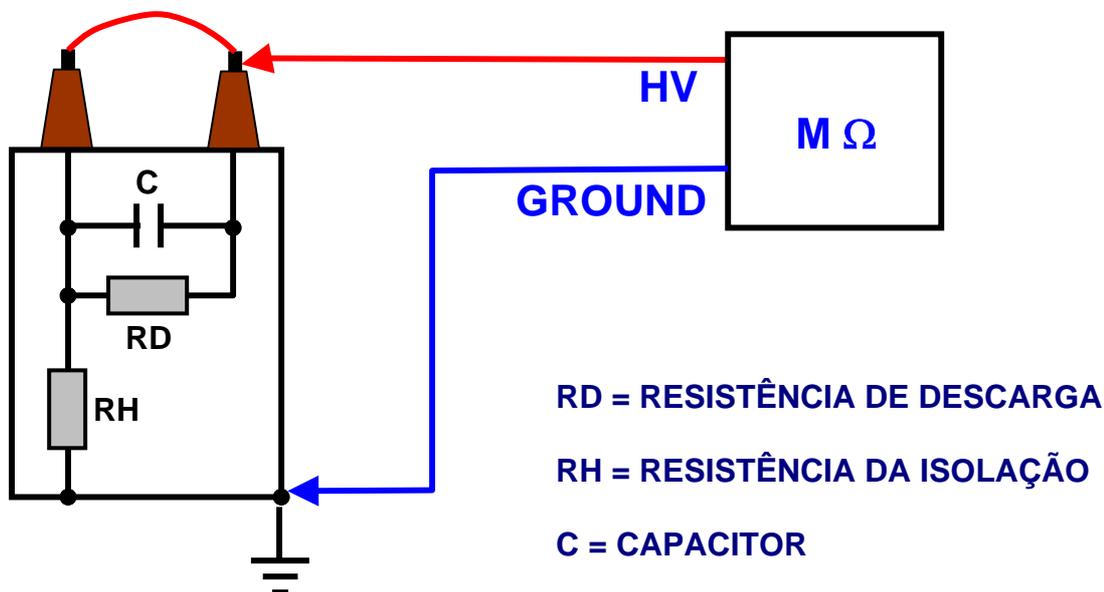
A POTÊNCIA OBTIDA ATRAVÉS DA CAPACITÂNCIA MEDIDA NÃO DEVE DIFERIR DA POTÊNCIA NOMINAL EM:

– 5 % a + 10 % PARA UNIDADES CAPACITORAS

0 % a + 10 % PARA BANCOS DE CAPACITORES

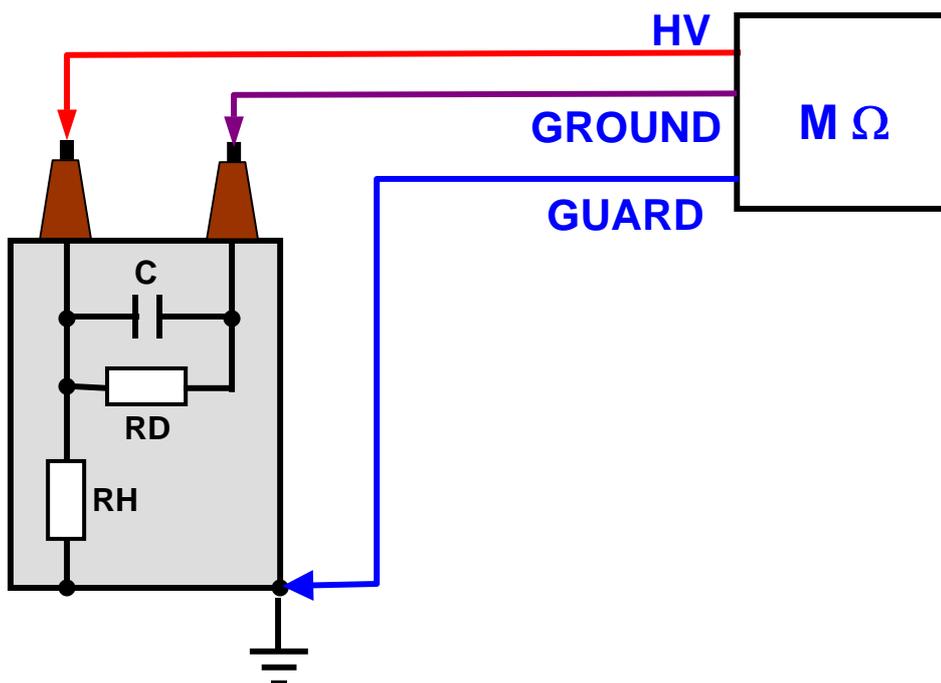
B) ISOLAÇÃO

RESISTÊNCIA DA ISOLAÇÃO TOTAL: COM 2,5 kV CC, 1 MINUTO. (>1 G Ω)



RESISTÊNCIA DA ISOLAÇÃO ENTRE BUCHAS

CUIDADOS: UTILIZAR 500 V; LEITURA → APÓS UM MINUTO



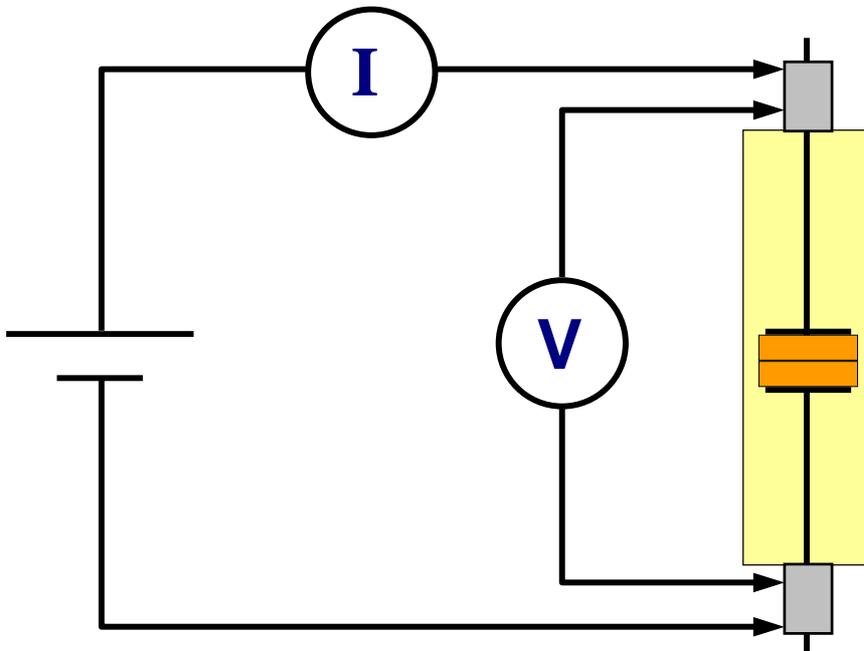
DISJUNTORES

RESISTÊNCIA DE CONTATO

MÉTODO: QUEDA DE TENSÃO (para Resistências $< 1 \text{ m}\Omega$)

Lembrando: Resistências entre $1 \text{ m}\Omega$ e 1Ω \rightarrow Ponte Kelvin;

Resistências $> 1 \Omega$ \rightarrow Ponte Weatstone



ISOLAMENTO CA

TLI (TANK LOSS INDEX): ÍNDICE DE PERDAS NO TANQUE EM DISJUNTORES DE GRANDE VOLUME DE ÓLEO

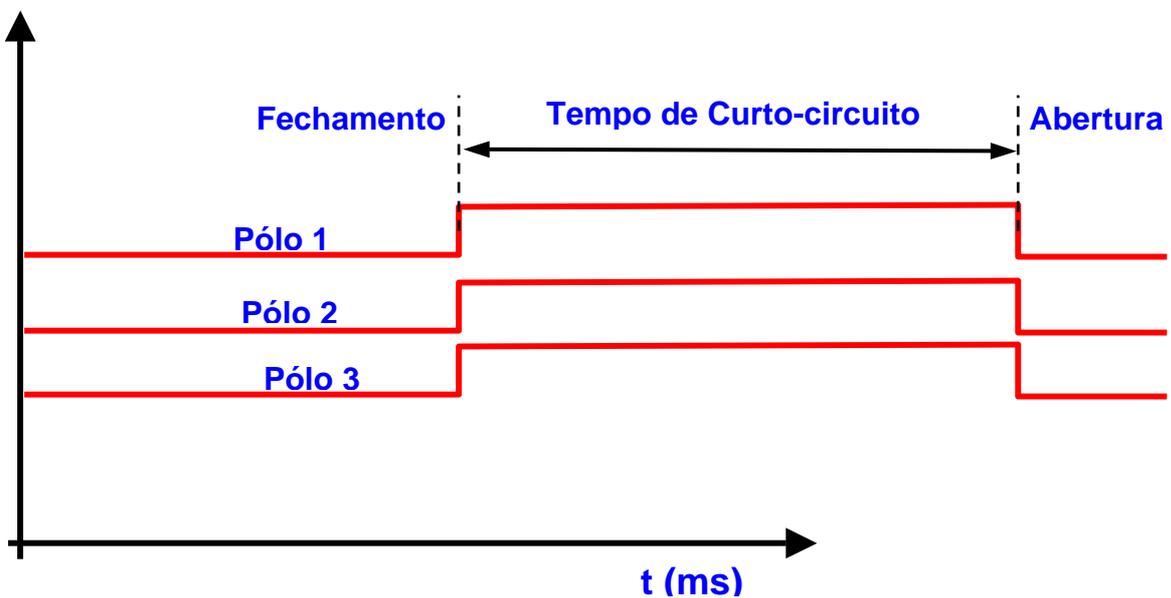
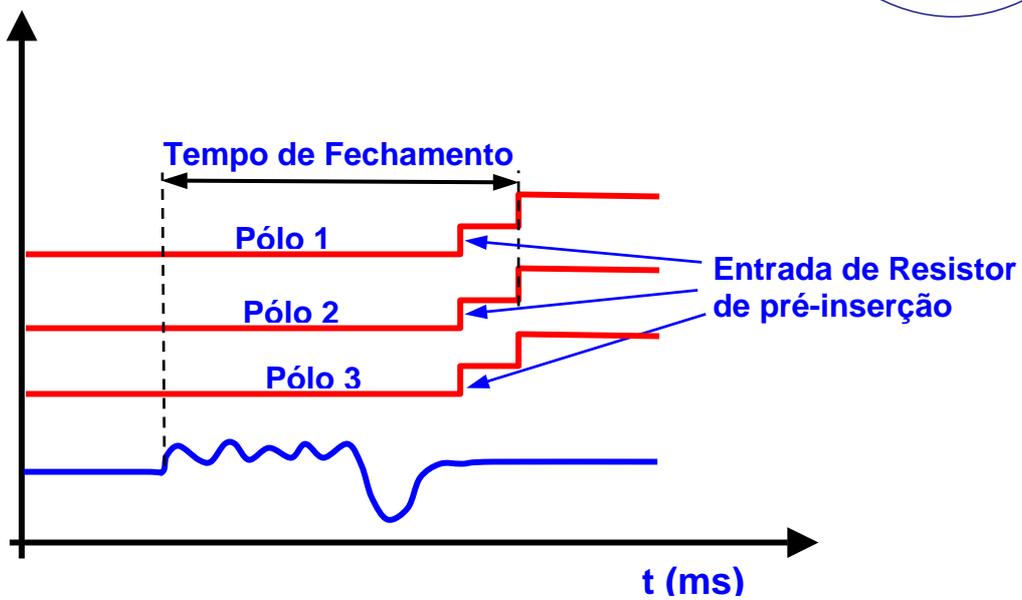
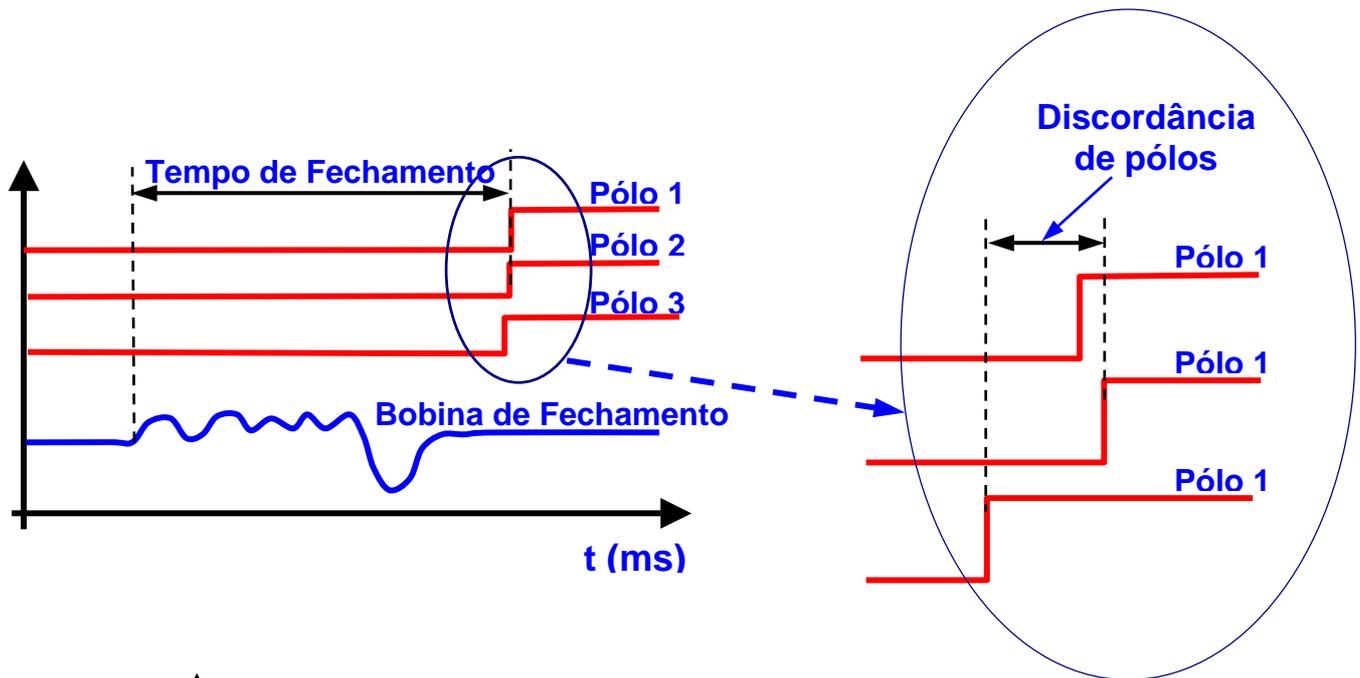
IDÉIA: COMPARAR os mW somados de cada contato (T1 / T2 ou B1 / B2), contra a Massa, medidos independentemente, na condição aberto, com os mW medidos para a condição fechado (PÓLO).

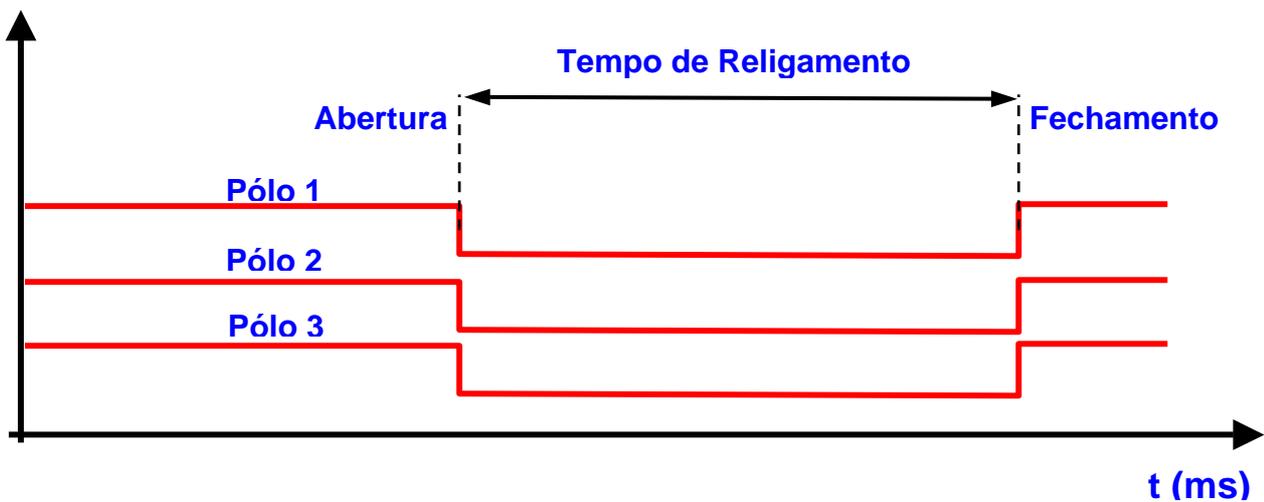
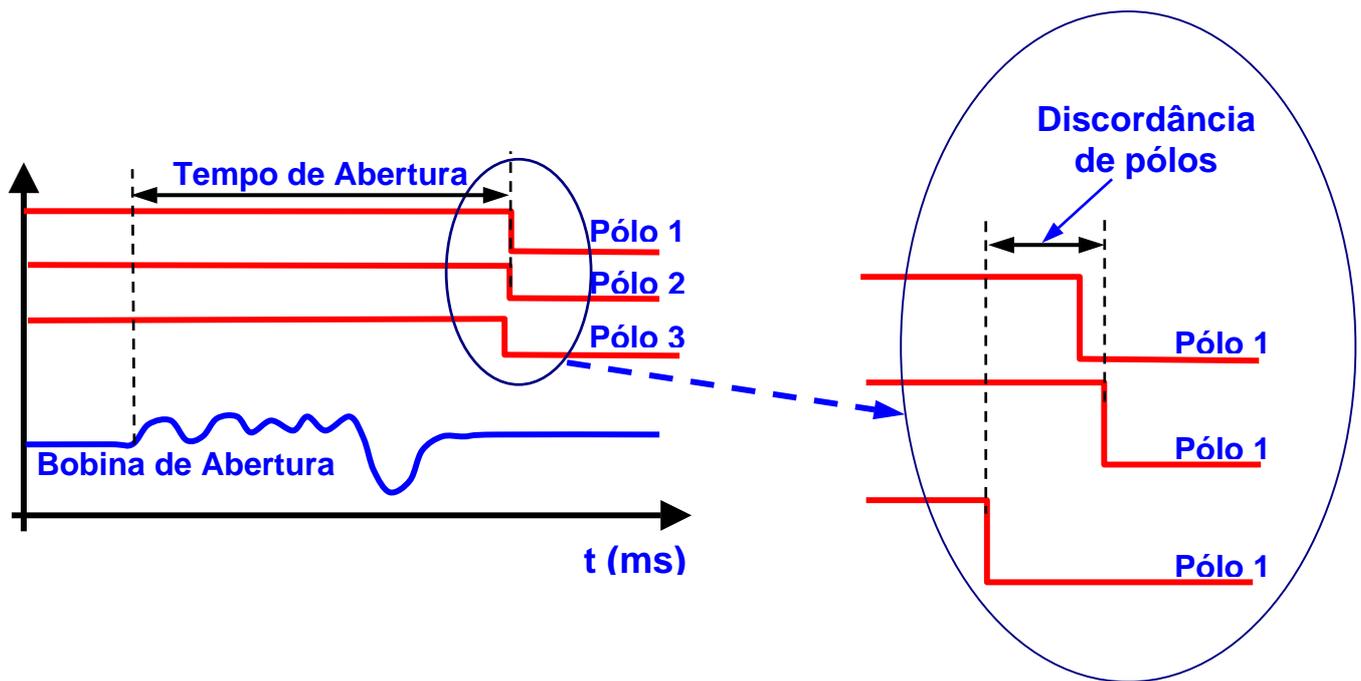
Critério

Discrepâncias maiores que + 16 mW ou -16 mW entre as medições mW fechado e o somatório dos valores parciais na condição aberto, são consideradas anormais e indicam a necessidade de investigar a causa com a maior rapidez possível.

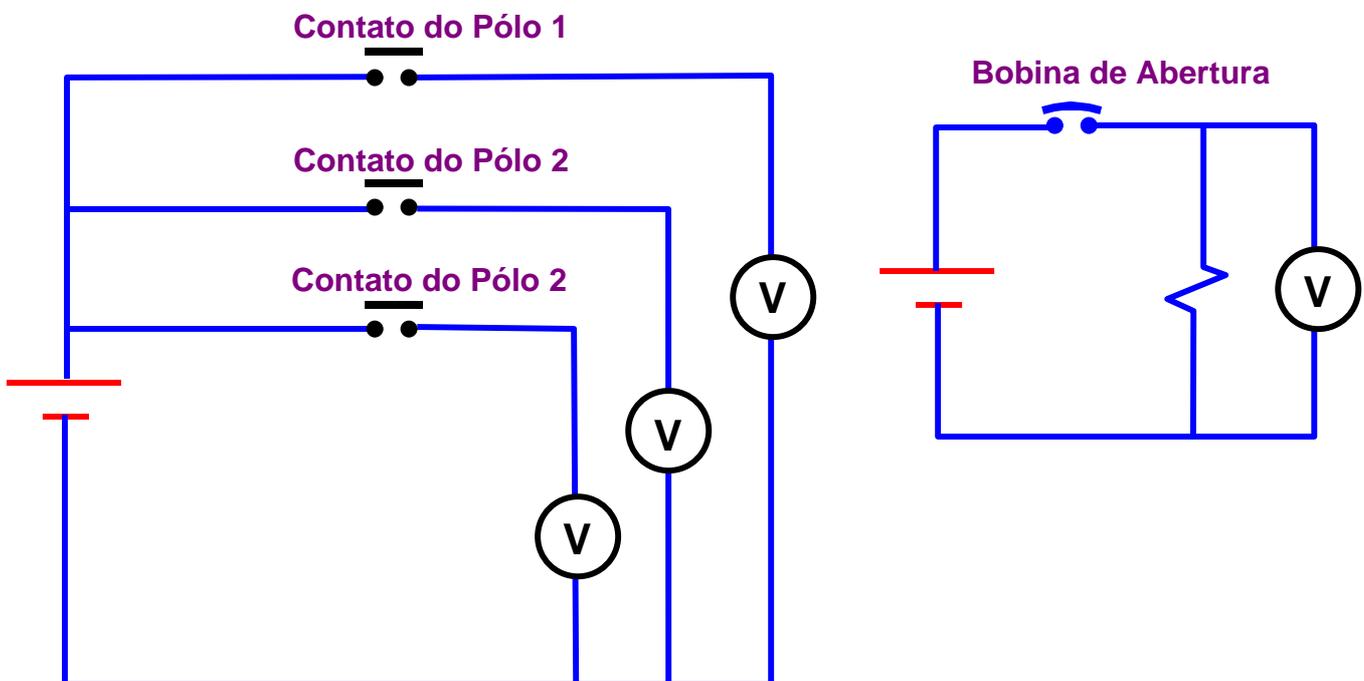
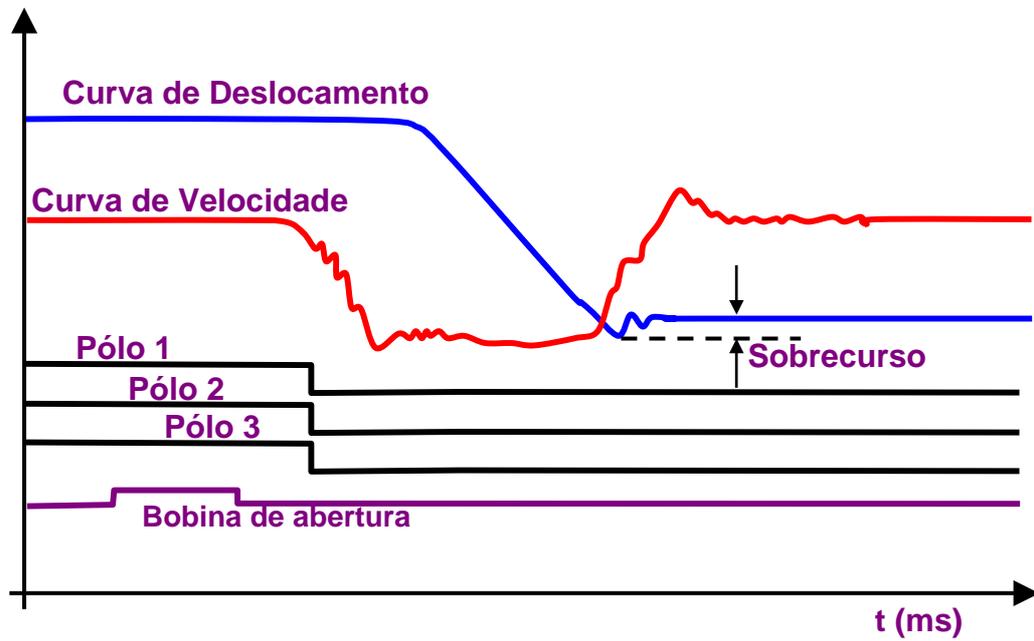
- PARA PEQUENO VOLUME ESTE CRITÉRIO NÃO É ADEQUADO**
- TAMPOUCO PARA DISJUNTORES A AR COMPRIMIDO, SOPRO MAGNÉTICO, SF6 OU VÁCUO ESTE CRITÉRIO NÃO É APLICÁVEL. JUSTIFICAR...**

TEMPOS DE OPERAÇÃO





DESLOCAMENTO / VELOCIDADE DOS CONTATOS MÓVEIS



CIRCUITO DE ENSAIO – ESQUEMA BÁSICO