

Aspectos técnicos do ensaio de descontinuidade realizado com *Holiday Detector* via seca

Waldiberto de Lima Pires

Dep. Pesquisa e Inovação Tecnológica
WEG Equipamentos Elétricos S.A.



Abordagem

1. Introdução (motivação)
2. Fundamentos teóricos
 - a. Circuito de teste
 - b. Conceitos de eletrostática
 - c. Fenômenos dielétricos
 - d. Tipos de fonte (CA x CC)
3. Critérios de aplicação
 - a. Tensão mínima de ensaio (eficácia)
 - b. Tensão máxima de ensaio (segurança)
 - c. Exemplos práticos
4. Recomendações normativas
5. Conclusão

Ensaio de descontinuidade – Objetivo e importância:

- Encontrar imperfeições⁽¹⁾, que não seriam facilmente detectáveis por exame visual, na película acabada⁽²⁾.
- Descontinuidades expõem a superfície não protegida (região da falha) ao ambiente externo.

(1) Porosidades, trincas, bolhas, inclusões, rachaduras, crateras, perda de espessura, presença de contaminantes, retenção de solventes, etc.

(2) Revestimento eletricamente isolante aplicado sobre superfície metálica (condutora de eletricidade) devidamente curado, limpo e seco.



Introdução

Tipos de equipamentos:

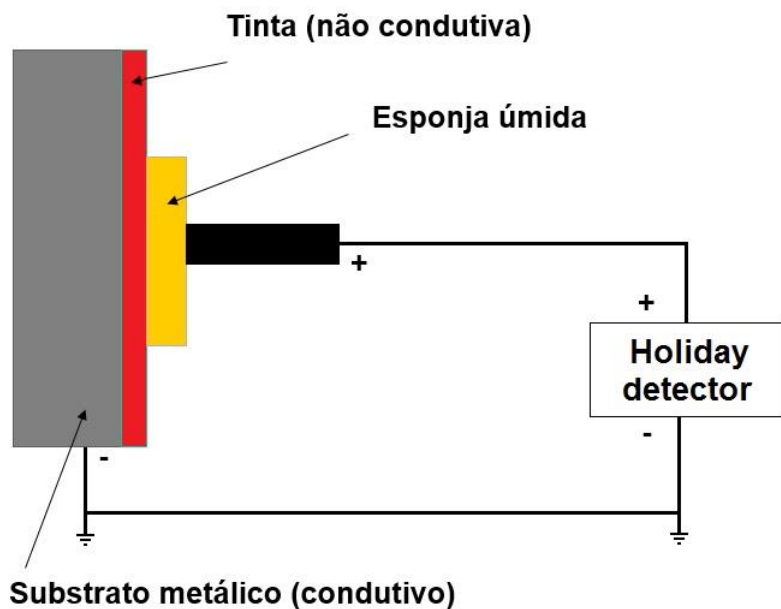
- Via úmida (baixa tensão) – “Teste da esponja molhada”
- Via seca (alta tensão) – “Teste da faísca” (*Spark test*)



Introdução

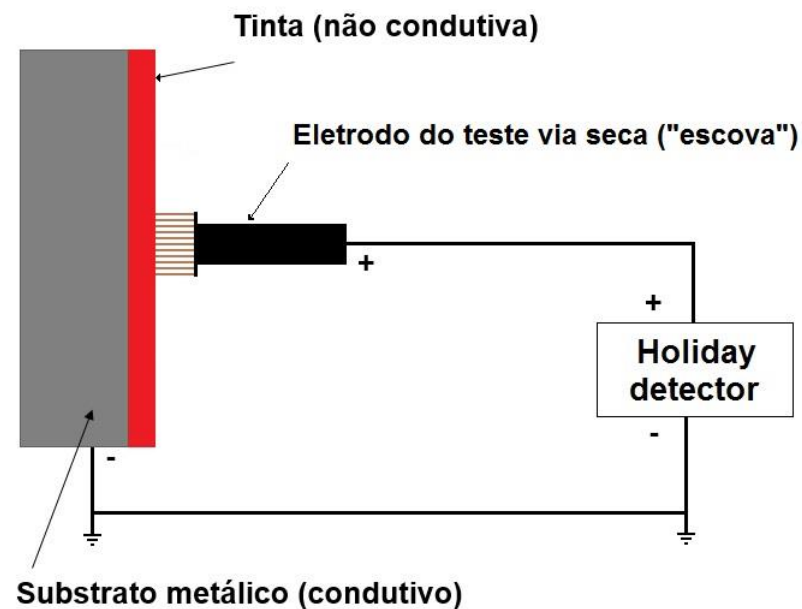
Sistema de teste:

- Via úmida



* Experiências mostram que a umidade pode reduzir a resistência de isolamento mais de 50 vezes!

- Via seca

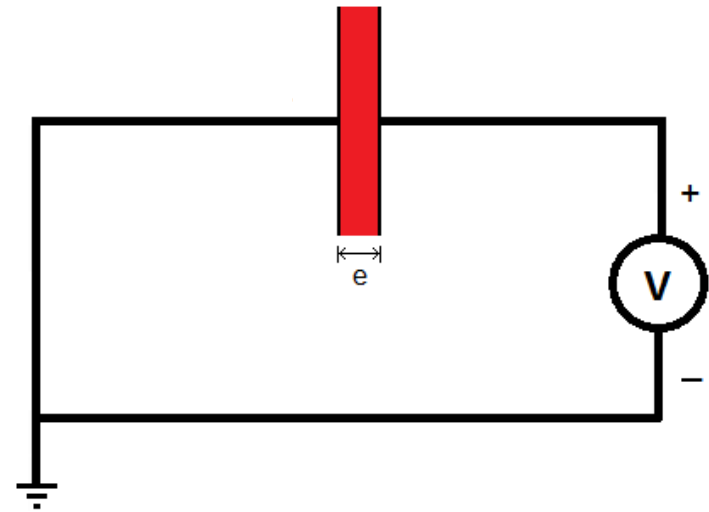
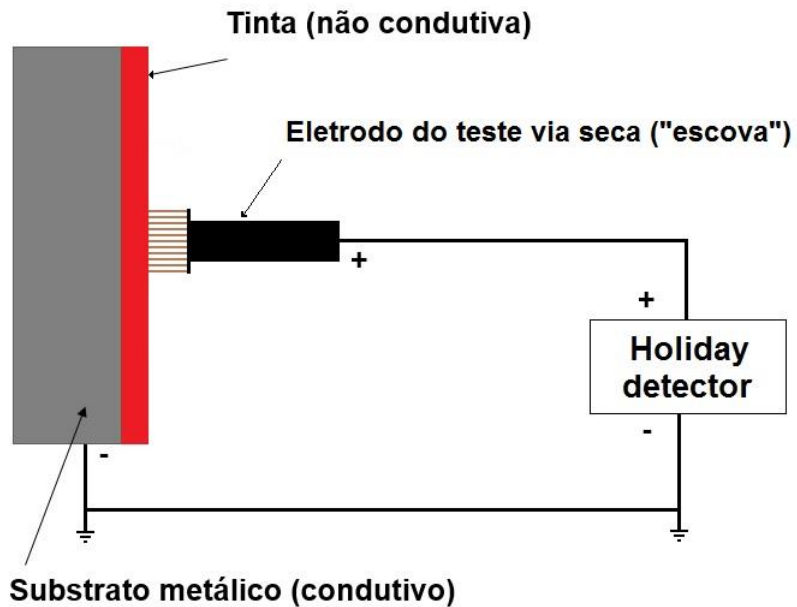


Dúvidas (Motivação):

- O método é eficaz?
- Por que realizar o teste?
- Que tipo de equipamento devo usar (via seca ou úmida)?
- Que nível de tensão deve ser aplicado?
- O revestimento pode ser danificado no teste?
- O tipo de tensão aplicada (CA/CC) afeta o resultado?
- A velocidade de aplicação da escova/esponja indicada nas normas é adequada?
- O teste pode ser realizado mais de uma vez sobre a mesma região?
- Dentre outras...

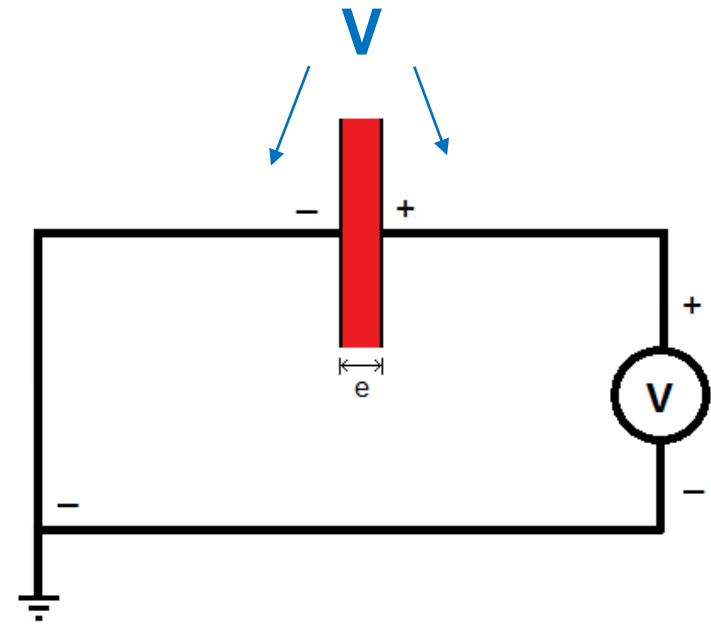
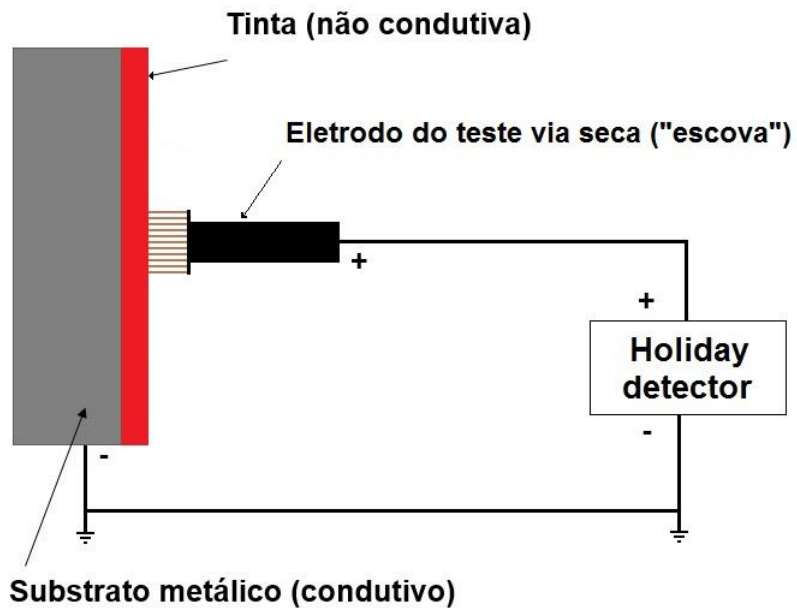
Fundamentos teóricos

Circuito de teste:



Fundamentos teóricos

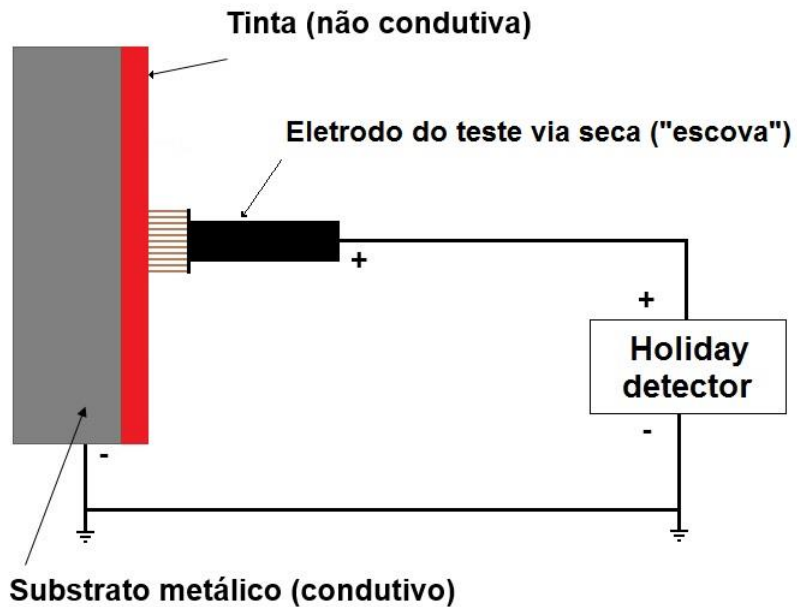
Circuito de teste:



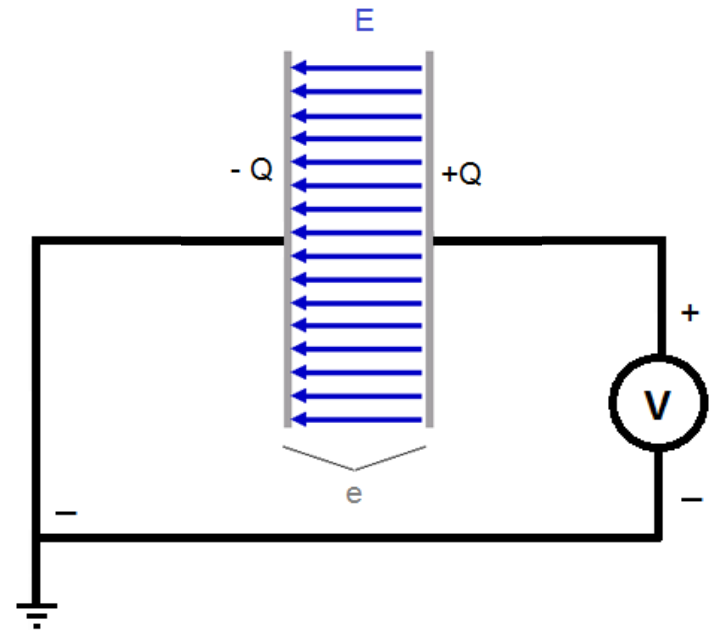
e = espessura da película isolante

Fundamentos teóricos

Circuito de teste:



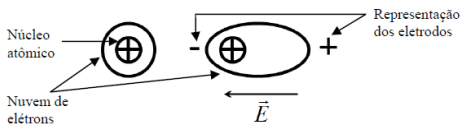
$$E = \frac{V}{e} \left(\frac{V}{m} \right)$$



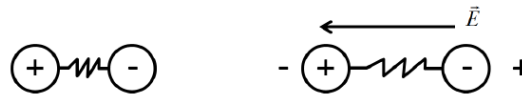
Fundamentos teóricos

Fenômenos dielétricos

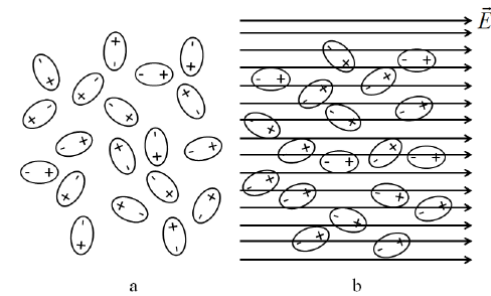
Polarização eletrônica



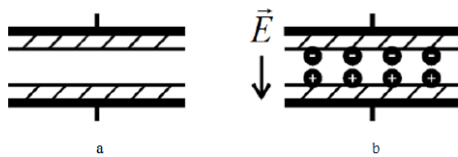
Polarização atômica



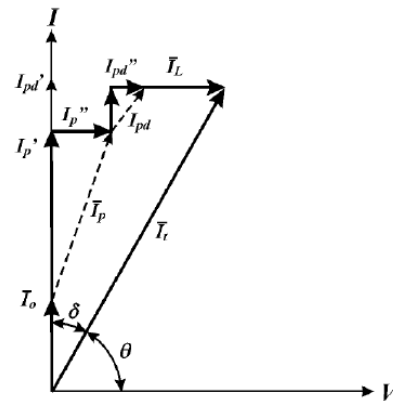
Polarização dipolar



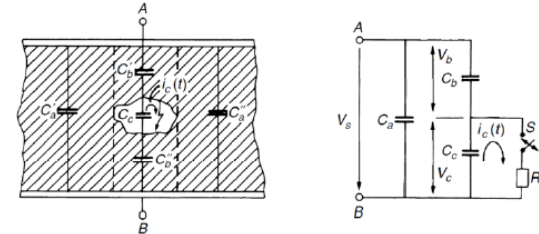
Polarização por cargas espaciais



Perdas por condução



Descargas parciais



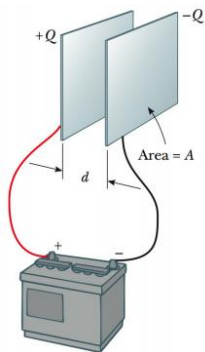
Fundamentos teóricos

Campo elétrico - Campo de força provocado pela ação de cargas elétricas ou por sistemas delas (prótons, elétrons, íons) .

Rigidez dielétrica - Máxima intensidade de campo elétrico que um dielétrico pode suportar sem sofrer ruptura.

Tensão disruptiva - Tensão necessária para romper o dielétrico (varia com o tipo e espessura de material dielétrico).

* Experiências mostram que a tensão disruptiva CC pode exceder em 300% a tensão disruptiva CA!



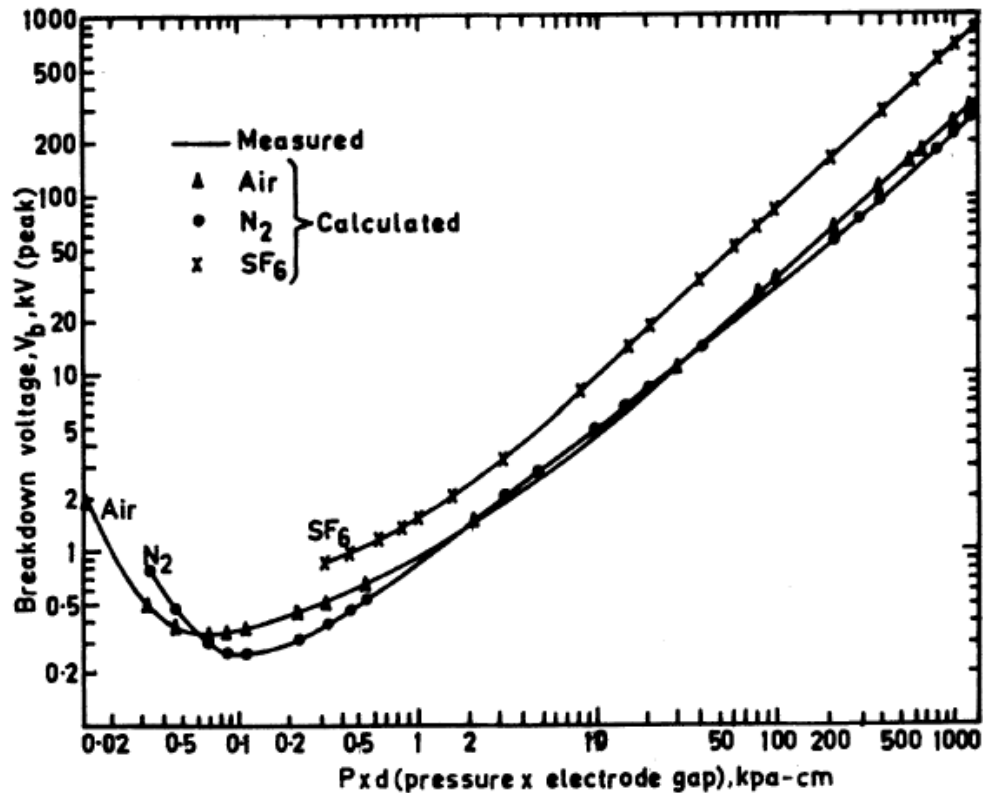
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|}$$

$$E \propto \frac{V}{d} \left(\frac{V}{m} \right)$$

Material	Rigidez Dielétrica (V/m)
Ar (1 atm)	3×10^6
Nylon	14×10^6
Óleo de silicone	15×10^6
Baquelite	24×10^6
Teflon	60×10^6
Mica	160×10^6

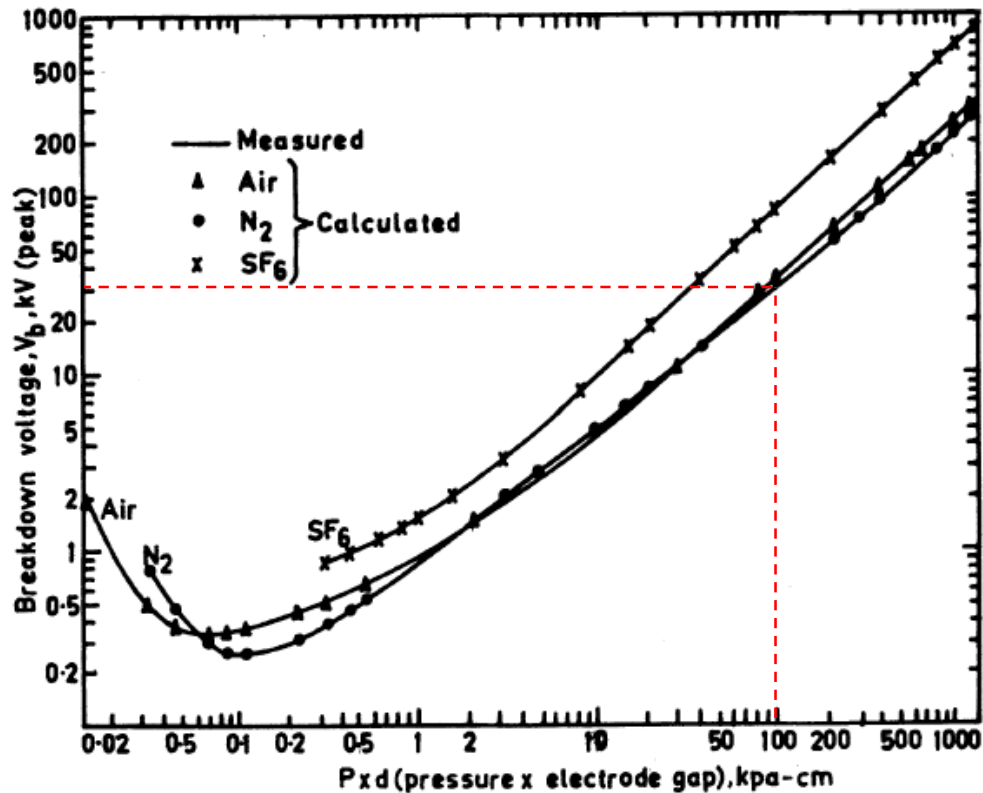
Fundamentos teóricos

A curva de Paschen



Fundamentos teóricos

A curva de Paschen



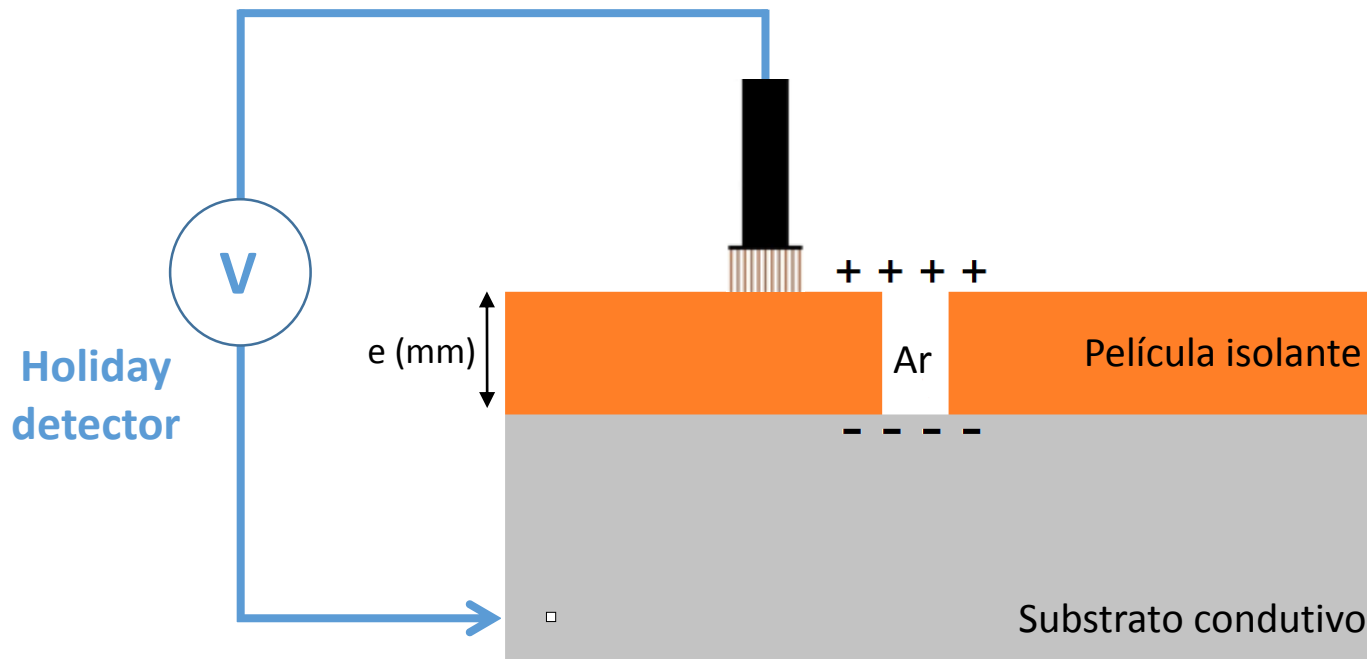
30 kV/cm \cong 3 kV/mm

100 kPa \cong 1 atm

Aspectos práticos

Condições para a detecção não-destrutiva de descontinuidades:

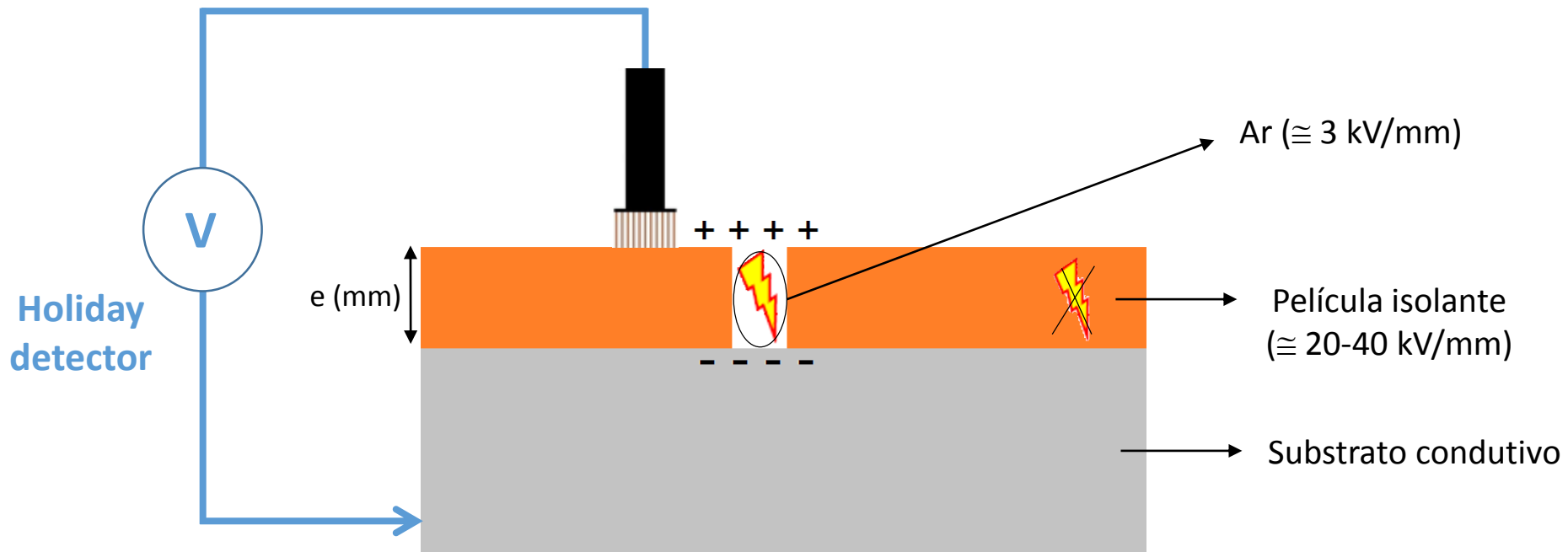
- $V_{\text{teste}} >$ Tensão disruptiva do ar na região de maior espessura
- $V_{\text{teste}} <$ Tensão disruptiva da película na região de menor espessura



Aspectos práticos

Condições para a detecção não-destrutiva de descontinuidades:

- $V_{\text{teste}} >$ Tensão disruptiva do ar na região de maior espessura
- $V_{\text{teste}} <$ Tensão disruptiva da película na região de menor espessura



⇒ Tensão disruptiva do ar $< V_{\text{teste}} <$ Tensão disruptiva da película

Limites de aplicabilidade para ensaio seguro e eficaz:

1. **Espessura máxima e tipo de revestimento**
2. **Rigidez dielétrica do ar e condição ambiente**
 - **Sob CNTP $\cong 3\text{kV/mm}$**
3. **Rigidez dielétrica do material do revestimento**
 - **WEG TAR FREE WT $\cong 20\text{ kV/mm}$**
 - **WEGPOXI BLOCK N2912 II $\cong 30\text{ kV/mm}$**
 - **WEGPOXI BLOCK N2912 I $\cong 40\text{ kV/mm}$**

⇒ Tensão mínima de ensaio = Tensão disruptiva do ar na região de maior espessura

⇒ Tensão máxima de ensaio = Tensão disruptiva do revestimento na região de menor espessura

Aspectos práticos

Exemplo 1:

- Revestimento com primer WEG TAR FREE WT.
- Espessura de camada máxima especificada = 0,5 mm.

$$\begin{aligned}\text{Tensão mínima de ensaio} &= \text{Tensão disruptiva do ar} \\ &= 3 \text{ kV/mm} * 0,5 \text{ mm} \\ &= 1,5 \text{ kV}\end{aligned}$$

Garante a sensibilidade
(eficácia) do método

$$\begin{aligned}\text{Tensão máxima de ensaio} &= \text{Tensão disruptiva da película isolante} \\ &= 20 \text{ kV/mm} * 0,5 \text{ mm} \\ &= 10 \text{ kV}\end{aligned}$$

Garante a integridade
dielétrica da película

⇒ Portanto, para um teste eficaz e seguro, $1500 \text{ V} < V_{\text{teste}} < 10000 \text{ V}$.

⇒ **NACE TM0186 sugere uma faixa de 4 a 12 kV/mm ⇒ $2000 \text{ V} \leq V_{\text{teste}} \leq 6000 \text{ V}$.**

⇒ **PETROBRÁS N-2137 sugere $V_{\text{teste}} = 9500 \text{ V}$.**

Aspectos práticos

Exemplo 2:

- Revestimento com primer WEGPÓXI BLOCK N2912 II.
- Espessura de camada = 0,3 – 0,4 mm.

Tensão mínima de ensaio = Tensão disruptiva do ar

$$= 3 \text{ kV/mm} * 0,4 \text{ mm}$$

$$= 1,2 \text{ kV}$$

Garante a sensibilidade
(eficácia) do método

Tensão máxima de ensaio = Tensão disruptiva da película isolante

$$= 30 \text{ kV/mm} * 0,3 \text{ mm}$$

$$= 9 \text{ kV}$$

Garante a integridade
dielétrica da película

⇒ Portanto, para um teste eficaz e seguro, $1200 \text{ V} < V_{\text{teste}} < 9000 \text{ V}$.

⇒ **NACE TM0186 sugere de 4 a 12 kV/mm ⇒ $1600 \text{ V} \leq V_{\text{teste}} \leq 3600 \text{ V}$.**

⇒ **PETROBRÁS N-2137 sugere $5500 \text{ V} \leq V_{\text{teste}} \leq 7500 \text{ V}$.**

Recomendações normativas

NORMA	APLICAÇÃO	ESPESSURA (mm)	TENSÃO TESTE (equação)	TENSÃO TESTE (Tabela)	V _{mín} teórico*	V _{máx} teórico**
NACE RP0274 (Vt = 7900√mm)	Pipeline coatings	0,51	5642	6000	1530	10200
		0,79	7022	7000	2370	15800
		1,60	9993	10000	4800	32000
		2,40	12239	12000	7200	48000
		3,20	14132	14000	9600	64000
		4,00	15800	16000	12000	80000
		4,80	17308	17000	14400	96000
ASTM G62	Pipeline coatings < 1,016 mm (Vt = 3294√mm)	0,51	2352	nc	1530	10200
		0,79	2928	nc	2370	15800
		1,02	3320	nc	3048	20320
	Pipeline coatings > 1,041 mm (Vt = 7843√mm)	2,40	12150	nc	7200	48000
		3,20	14030	nc	9600	64000
		4,00	15686	nc	12000	80000

* 3 kV/mm

** 20 kV/mm

Recomendações normativas

NORMA	APLICAÇÃO	ESPESSURA (mm)	TENSÃO TESTE (equação)	TENSÃO TESTE (Tabela)	V _{mín} teórico*	V _{máx} teórico**
ASTM D5162 (Tabela)	Nonconductive protective coating on metallic substrates (> 0,50 mm)	0,20 - 0,31	nc	1500	930	4000
		0,32 - 0,46	nc	2000	1380	6400
		0,47 - 0,77	nc	2500	2310	9400
		0,78 - 1,03	nc	4000	3090	15600
		1,04 - 1,54	nc	5000	4620	20800
		1,55 - 2,04	nc	7500	6120	31000
		2,05 - 2,55	nc	10000	7650	41000
		2,56 - 3,19	nc	12000	9570	51200
NACE SP0188 (Tabela)	New protective coatings on conductive substrates (> 0,50 mm)	0,20 - 0,30	nc	1500	900	4000
		0,30 - 0,40	nc	2000	1200	6000
		0,40 - 0,50	nc	2500	1500	8000
		0,50 - 1,00	nc	3000	3000	10000
		1,00 - 1,40	nc	4000	4200	20000
		1,40 - 2,00	nc	6000	6000	28000
		2,00 - 3,20	nc	10000	9600	40000
		3,20 - 4,70	nc	15000	14100	64000

* 3 kV/mm para a maior espessura

** 20 kV/mm para a menor espessura

Recomendações normativas

NORMA	APLICAÇÃO	ESPESSURA (mm)	TENSÃO TESTE (equação)	TENSÃO TESTE (Tabela)	V _{mín} teórico*	V _{máx} teórico**
NACE RP0490 (V _t = 104√μm)	Fusion-Bonded epoxy external pipeline coatings (0,25-0,76 mm)	0,25	1644	1650	750	5000
		0,28	1740	1750	840	5600
		0,30	1801	1800	900	6000
		0,33	1889	1900	990	6600
		0,36	1973	1950	1080	7200
		0,38	2027	2050	1140	7600
		0,41	2106	2100	1230	8200
		0,51	2349	2350	1530	10200
		0,64	2631	2650	1920	12800
		0,76	2867	2900	2280	15200

NORMA	APLICAÇÃO	ESPESSURA (mm)	TENSÃO TESTE (mín)	TENSÃO TESTE (máx)	V _{mín} teórico*	V _{máx} teórico**
NACE TM0186 (Et entre 4 e 12 kV/mm)	Internal tubular coatings of 0,25 to 0,76 mm dry-film thickness	0,25	1000	3000	750	5000
		0,28	1120	3360	840	5600
		0,30	1200	3600	900	6000
		0,33	1320	3960	990	6600
		0,36	1440	4320	1080	7200
		0,38	1520	4560	1140	7600
		0,41	1640	4920	1230	8200
		0,51	2040	6120	1530	10200
		0,64	2560	7680	1920	12800
		0,76	3040	9120	2280	15200

* 3 kV/mm

** 20 kV/mm

Recomendações normativas

PETROBRAS N-2137:

3 APARELHAGEM

3.2 A seleção do instrumento a ser usado deve obedecer aos seguintes critérios:

- a) aparelho detector de tensão constante (67,5 V) e via úmida, para sistemas de pintura com espessura de película seca inferior ou igual a 150 µm;
- b) aparelho detector de tensão variável e via seca, com variação contínua ou com "taps" constantes de, no máximo, 500 V, com faixa de operação de 500 V a 5 000 V, para sistemas de pintura com espessura de película seca acima de 150 µm.

4 EXECUÇÃO

4.2 Aparelho Via Seca

4.2.1 Selecionar na superfície a ser testada uma região isenta de falhas visuais e com espessura idêntica à especificada para o sistema de pintura.

4.2.2 Passar a escova metálica do aparelho detector (superfície planas ou cilíndricas de grande diâmetro) ou a mola (superfícies cilíndricas de pequeno diâmetro), inicialmente com uma voltagem mínima, elevando-se a tensão de 500 V em 500 V até o disparo do alarme ou até um máximo de 5 000 V.

4.2.3 Diminuir de 500 V a tensão do disparo do alarme e executar o teste.

ESPESSURA (mm)	V teste	Vmín teórico*	Vmáx teórico**
0,15	2500	450	3000
0,20	3500	600	4000
0,25	4500	750	5000
0,30	5500	900	6000
0,35	6500	1050	7000
0,40	7500	1200	8000
0,45	8500	1350	9000
0,50	9500	1500	10000

* 3 kV/mm ** 20 kV/mm

Velocidade máxima do eletrodo:

- ASTM D 4787 = 0,3 m/s = 30 cm/s
- ASTM D 5162 = 0,3 m/s
- NACE SP0188 = 0,3 m/s
- ASTM G62 = Não especifica.
- NACE TM0186 = 18 m/min = 0,3 m/s (máx.)
- NACE RP0490 = Recomenda determinar experimentalmente caso-a-caso, levando em consideração a taxa de pulso no caso de fontes pulsadas.
- NACE RP0274 = Recomenda determinar experimentalmente caso-a-caso, levando em consideração a taxa de pulso no caso de fontes pulsadas.
- PETROBRAS N-2137 = 20 cm/s (via seca); 15 cm/s (via úmida).

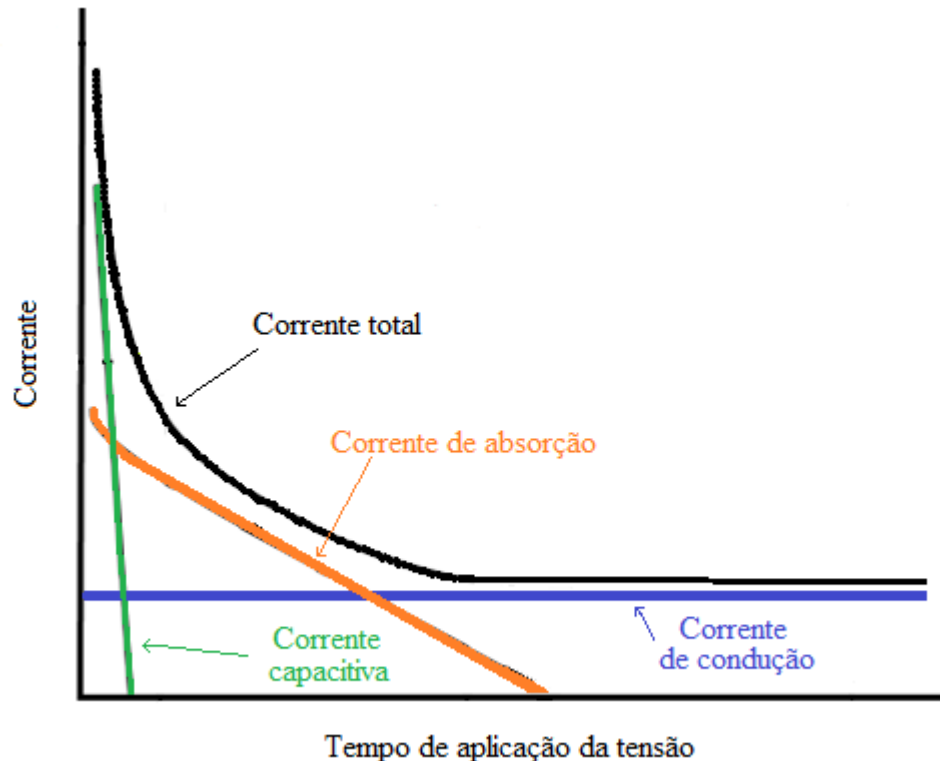
O teste de descontinuidade realizado com o ***Holiday Detector*** pode ser considerado um método **eficaz e seguro** de verificação da qualidade da película seca de tinta, se executado adequadamente!

Obrigado!



Fundamentos teóricos

O comportamento dos materiais dielétricos, quando submetidos a campos elétricos



$$i = i_C + i_R + i_P$$

$$i_P = i_A$$

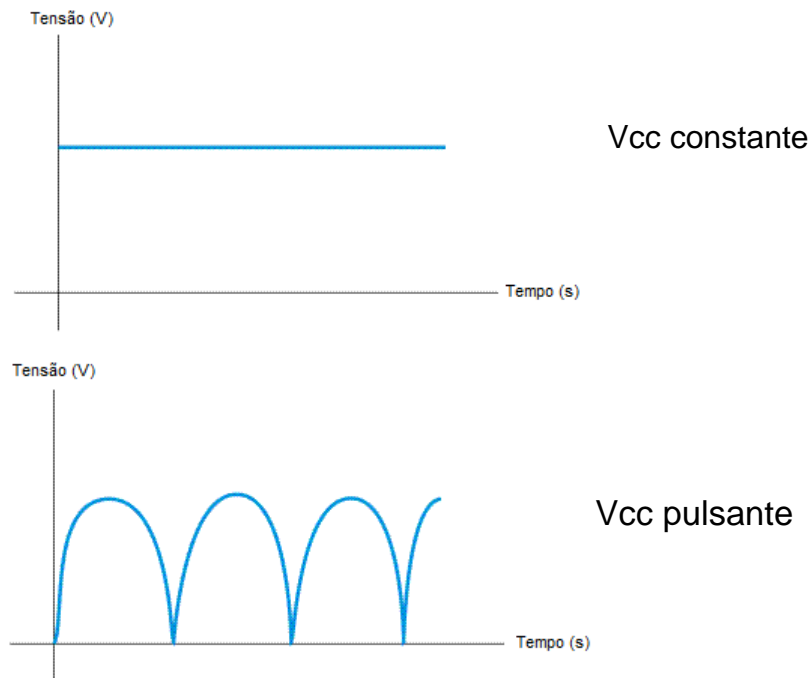
$$i_R = \frac{V}{R}$$

$$i_C = C \frac{dV}{dt}$$

Fundamentos teóricos

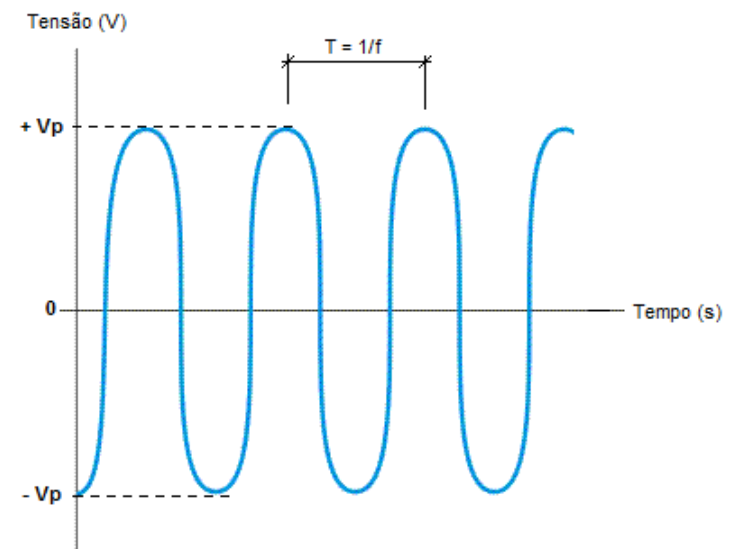
Tipos de fonte:

- Corrente contínua (CC)



Não há inversão de polaridade!

- Corrente Alternada (CA)

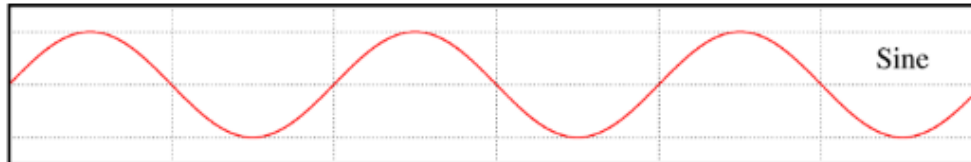


$f = 60 \text{ Hz}$

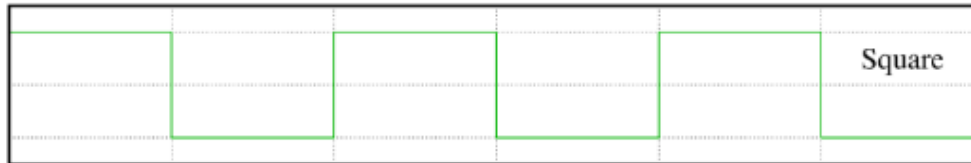
Há inversão de polaridade!

Fundamentos teóricos

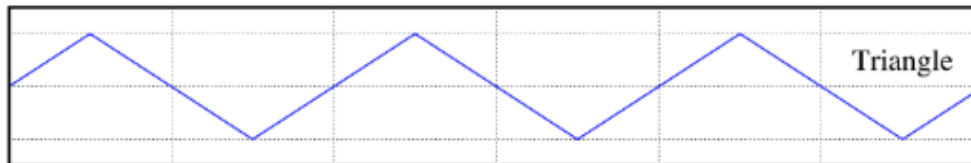
Formas de onda:



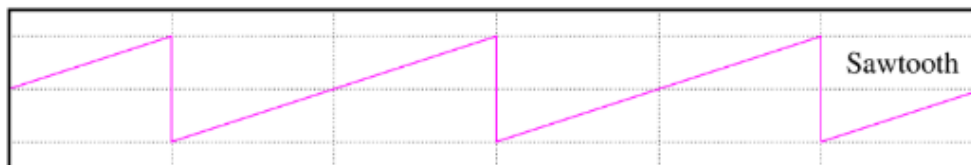
Senoidal



Quadrada ou retangular



Triangular



Dente de serra

Corrente contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA)!