CDU 621.3.027.3
Alta tensão

Fontes de alta tensão choque

HERMÍNIO DUARTE-RAMOS
Prof. Dr. Engenheiro Electrotécnico
Schering-Institut (T. U. Hannover)

1. INTRODUÇÃO

As propriedades de isolamento nos equipamentos de uma rede eléctrica de transporte e distribuição de energia não se atestam apenas por meio de ensaios com altas tensões contínuas e alternadas, porquanto na realidade se constatam deteriorações nos isolantes que não se explicam por esforços estacionários ou quase-estacionários mas outrossim encontram a razão em elevadas sobretensões de curta duração. Todos estes esforços intensos nos equipamentos, sobrepostos ao esforço do funcionamento normal, resultam da propagação em alta velocidade de ondas migrantes nos circuitos eléctricos, sempre em consequência de fenómenos transitórios impostos pela continuidade da energia electromagnética nas variações temporais e espaciais. As respectivas causas repartem-se em dois grupos conforme a sua origem relativamente à instalação: sobretensões de origem externa, principalmente provocadas por descargas atmosféricas; e sobretensões de origem interna, devidas à exploração dos sistemas, tais como ocorrem na interrupção de circuitos, nalguns casos de curto-circuito nas redes, etc. O primeiro tipo é o mais agreste, afectando sobretudo linhas aéreas, cabos de alta tensão e transformadores, pois as correspondentes ondas de tensão choque são mais íngremes e mais elevadas que no segundo tipo. Por isso bem cedo despertou os cuidados dos cientistas e tecnólogos.

Os primeiros trabalhos sobre os fundamentos teóricos das ondas migrantes apareceram à volta de 1910, cujos resultados se confirmaram experimentalmente com êxito nos anos imediatos. Daí a preocupação de imitar com o máximo significado possível a forma de onda dessas sobretensões, ditas choque, por intermédio de geradores de parâmetros concentrados, nos laboratórios de ensaios, para teste dos equipamentos fabricados (transformadores, geradores, isoladores, pára-raios, etc.).

O presente estudo ocupa-se das fontes de tensão choque, em particular no que diz respeito ao seu esquema de principio e à correspondente extensão em cascata na produção de picos de tensão até aos milhares de quilovolt, tal como se exigem nos laboratórios científicos e industriais.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE TENSÃO CHOQUE

Por intermédio de uma fonte de tensão contínua [6], constituída por transformador de ensaio e rectificador no lado da alta tensão (fig. 1 a), provoca-se a carga do condensador choque de capacidade C_s através da resistência de carga R_C de alto valor óhmico. A capacidade C_s é muito superior à capacidade C_P que constitui a carga de serviço do gerador na qual se inclui a capacidade do provete, a capacidade dos condutores de ligação à fonte, as capacidades dos equipamentos de medição e ainda as capacidades adicionais

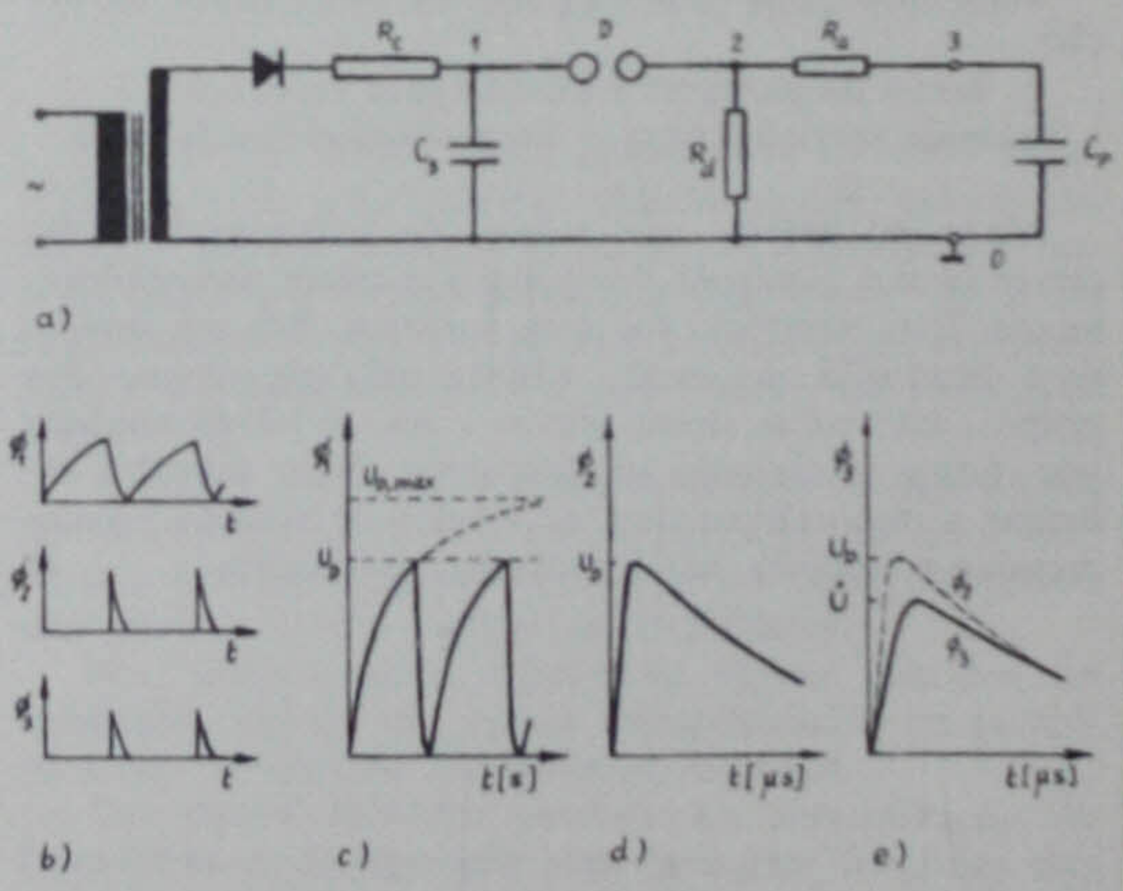


Fig. 1 — Princípio de funcionamento de um gerador de tensões choque
a) Esquema eléctrico do gerador
b) Evolução simultânea dos potenciais
c) Potencial do condensador choque (ponto 1)
d) Potencial da resistência de descarga (ponto 2)
e) Potencial da saída (ponto 3)

necessárias para se garantir um valor C_p que seja praticamente independente da capacidade do provete, mas de maneira que $C_s \gg C_p$. A tensão aos bornes do condensador choque sobe lentamente de acordo com a elevada constante de tempo R_c/C_s, até um valor U_D que provoca repentinamente a disrupção de um disruptor de esferas, com a qual o condensador choque se começa a descarregar sobre o provete. Durante este fenómeno transitório a tensão no provete segue uma evolução temporal equivalente à sobreposição simultânea da carga dos condensadores de serviço de capacidade C_p sobre a resistência de amortecimento R_a e da descarga dos mesmos condensadores em paralelo com C_s ainda sobre a resistência de descarga R_d, mas com preponderâncias diferentes no início e já no desenvolvimento do fenómeno em consequência das respectivas constantes de tempo serem muito distintas : a princípio a tensão choque gerada e aplicada no provete cresce exponencialmente com uma constante de tempo R_aC_p relativamente pequena porque a resistência de amortecimento possui baixo valor óhmico para que a fronte da onda tenha curta duração; depois da tensão atingir um certo valor máximo, dito valor de pico $\hat{U}$, começa a decair também exponencialmente mas com uma constante de tempo $R_d(C_s+C_p)$, relativa à descarga das capacidades em jogo sobre a resistência R_d, a qual expressa um valor muito maior que a anterior pois a resistência de descarga se escolhe $R_d > R_a$ a fim de que a cauda da onda seja muito menos inclinada que a fronte.

Esta interpretação descritiva dos fenómenos requer evidentemente tradução rigorosa pela matemática, que se fará adiante. Por agora prossegue-se a interpretação física através da observação dos potenciais de cada ponto do circuito gerador de alta tensão choque (fig. 1 b.)

O potencial do ponto 1 anterior ao disruptor evolui conforme impõe o condensador choque (fig. 1 c): antes de cada disrupção do disruptor a subida do potencial $\emptyset_1$ é exponencial; ao atingir-se U_D inicia-se a disrupção, durante a qual $\emptyset_1$ se reduz a um valor baixo, praticamente zero, conduzindo a extinção do escorvamento do arco eléctrico; recomeça então nova carga exponencial do condensador choque, e assim sucessivamente desde que se mantenha a alimentação de corrente contínua. Deste mecanismo conclui-se, por um lado, que a constante de tempo de carga R_CC_s, muito alta porque ambos os factores são elevados, define o intervalo de tempo entre dois impulsos consecutivos (normalmente de 1 a 30 segundos), isto é, o ritmo de produção de tensões choque pode determinar-se pelo valor da resistência de carga R_C. Por outro lado, ainda se deduz que a energia posta em jogo por cada impulso é: $W = C_s U_D^2/2$, sendo por conseguinte tanto maior quanto mais elevada for a capacidade do condensador choque e mais alta a tensão de disrupção do disruptor.

Posteriormente ao disruptor o potencial do ponto 2 (fig. 1 d) sobe de zero até ao valor de disrupção U_D no início da disrupção, e decresce em seguida de acordo com a constante de tempo de descarga dos condensadores colocados em paralelo sobre a resistência de descarga R_d. Assim se observa que o controlo da energia de cada impulso se manipula pela tensão de disparo U_D, ou seja, pelo afastamento das esferas do disruptor no caso de disrupção natural, ou por disrupção artificial provocada no disruptor com dispositivo de disparo (impulso ionizante do intervalo interelectródico do disruptor).

À saída do gerador o potencial do ponto 3 (fig. 1 e) segue a mesma evolução do potencial $\emptyset_2$ mas não atinge igual valor de pico porque existe uma queda de tensão na resistência de amortecimento R_a, que evita uma subida demasiado íngreme da tensão no provete. Mostra este facto que um modo de variar o pico $\overline{U}$ da tensão gerada consiste na variação de $\overline{U}_D$ por meio de comando do disruptor (à distância com motor eléctrico no afastamento das esferas e por impulso de disparo provocado ao nível de tensão desejado). Na realidade, como se assinalou, existem outros modos de modificar o pico da tensão choque, a partir da alteração das constantes de tempo que determinam a forma do impulso: a fronte é regulada pelo baixo valor óhmico R_a, que não pode ser excessivamente reduzido para que se amorteçam eventuais oscilações devidas à auto-indução do circuito (como se justificará adiante); a cauda varia-se pelo alto valor óhmico R_d, o qual deve ser pelo menos dez vezes superior a R_a.

3. VALORES CARACTERÍSTICOS DA TENSÃO CHOQUE E DO GERADOR

Para se identificar univocamente cada tensão choque gerada definem-se determinados valores característicos, que numa tensão choque completa (fig. 2 a) correspondem ao valor de pico $\hat{U}$ e à razão T_f/T_r (valores expressos em micro-segundos) do chamado tempo de fronte T_f relativo à duração da subida do impulso, e do tempo de semi-cauda T_r, relativo ao intervalo de tempo até que a onda decresça a metade do valor de pico (por exemplo, uma onda 1/50 significa $T_f = 1\ \mu s$ e $T_r = 50\ \mu s$).

Actualmente estes valores são obtidos, por convenção internacional, pela recta que passa nos pontos da fronte de tensão iguais a 30 % (outrora usava-se 10 %) e 90% do valor de pico: o tempo de fronte T_f exprime em μs o intervalo de tempo que decorre desde a intersecção dessa recta convencional com a linha de tensão nula até ao cruzamento com a linha de pico, ou seja, por semelhança de triângulos,

$$T_s = \frac{t_{0.9}}{0{,}9} - \frac{t_{0.3}}{0{,}3}$$

isto é $$T_f = 1{,}67(t_{0,9} - t_{0,3});$$

e o tempo de semi-cauda, T_r, também expresso em μs, decorre desde o mesmo instante inicial até ao momento em que a cauda atinge 50 % do pico, isto é,

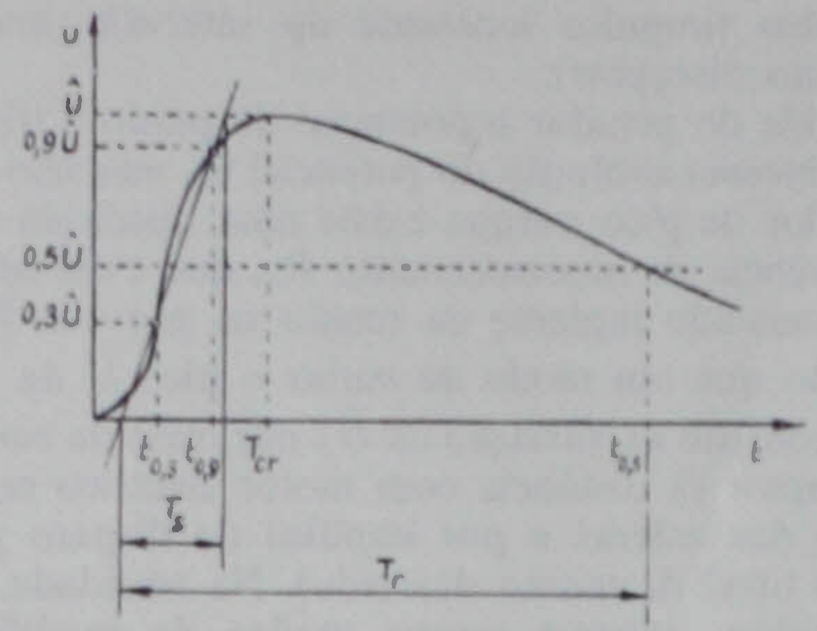
$$T_r \simeq t_{0,5}$$

igualdade tanto mais correcta quanto menor for a razão T_f/T_r.

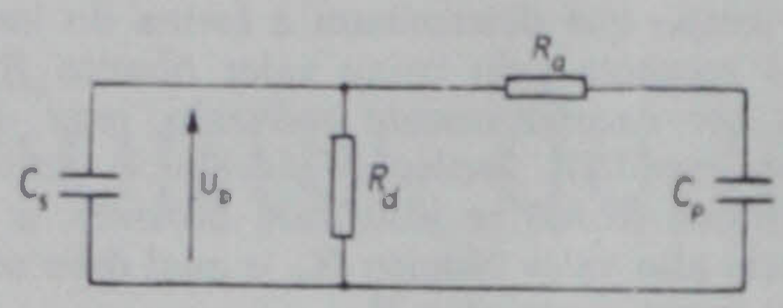
O gerador da tensão choque é porém caracterizado pelo máximo pico dos impulsos que pode gerar, e ainda pela sua energia máxima e rendimento.

Designa-se energia choque de um gerador a grandeza referenciadora da possibilidade de gerar tensões choque igual à energia máxima armazenável no condensador choque

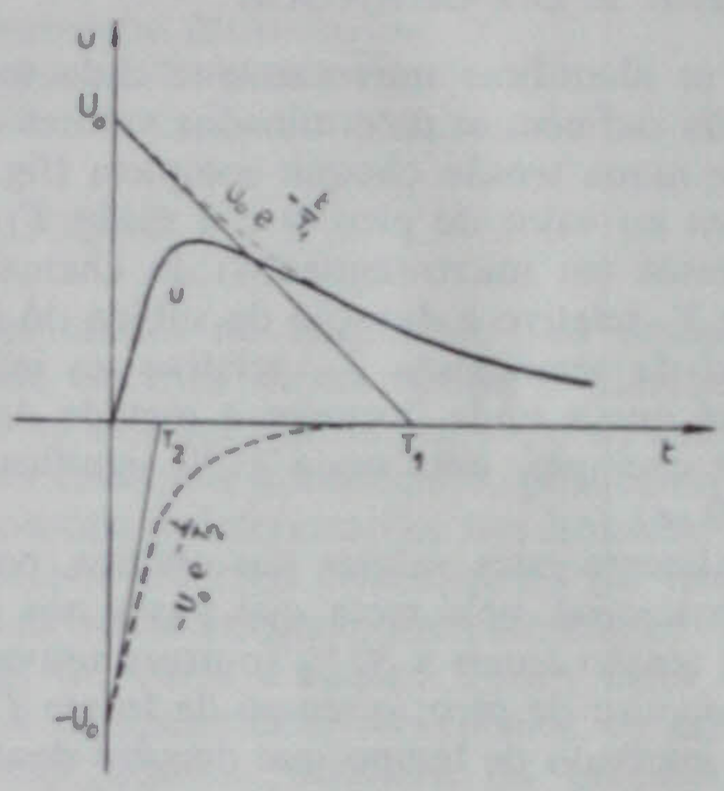
$$W = \frac{1}{2} C_s\ U^2_{D\ max}$$



a)



b)



c)

Fig. 2 — Cálculo de uma tensão choque
a) Normalização da onda completa
b) Esquema equivalente do gerador
c) Onda aperiódica bi-exponencial

geralmente expressa em quilo-joule. Denomina-se rendimento do gerador à relação entre o valor de pico $\hat{U}$ da tensão choque que se obtém com uma dada tensão U_D do condensador choque, quer dizer,

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_D}$$

portanto sempre inferior à unidade. Como o valor de pico $\hat{U}$ não pode ser maior que o valor definido pela distribuição da carga eléctrica inicial $C_s\ U_D$ sobre o paralelo do condensador choque com a capacidade de serviço, conclui-se

$$\eta \leqslant \frac{C_s}{C_s + C_P}$$

donde se observa que convém ser $C_s \gg C_P$ para que $\hat{U}$ seja o maior possível.

Os parâmetros da fonte de tensão choque referem-se às grandezas que definem as condições físicas de produção, sobretudo no que respeita à forma de onda, que já se sabe serem R_c, R_d, R_a, e C_s, cujas funções no processo se interpretaram, tendo-se justificado as relações normais

$$R_c \gg R_d \geq 10\,R_a$$

além de se obrigar

$$R_a \geq 2\sqrt{\frac{L\,C_s + C_P}{C_s\,C_P}}$$

para conveniente amortecimento de oscilações na frente introduzidas pela auto-indução L dos condutores (como se verá mais tarde). Para se ter um elevado rendimento faz-se C_s da ordem de cinco vezes o valor de C_P estipulando as normas $C_s > 1$ nF. Ora a capacidade C_P atinge em geral 0,5 a 2 n F, o que conduz à relação

$$C_s \geq 10\,C_P$$

interessando que se mantenha constante e independente do provete em ensaio. Por isso C_P deve ser um valor muito maior que a capacidade dos provetes, isto é,

$$C_P \gg C_{provete}$$

condição normalmente satisfeita pelas capacidades dos divisores de tensão capacitivos. Se o provete possuir uma certa indução L_P deverá ainda garantir-se

$$C_s \geq \frac{8T_1}{L_P}$$

onde T_1 é a constante de tempo da cauda (que se define a seguir), eliminando-se assim as oscilações na cauda da tensão choque.

4. ESTUDO ANALÍTICO DE UM GERADOR

O cálculo do esquema eléctrico de um gerador de tensão choque simplifica-se muito se se desprezar a auto-indução dos condutores, supondo-se ainda insignificante a resistência do arco eléctrico no disruptor perante a resistência de amortecimento. Nestas hipóteses o esquema equivalente (fig. 2 b) estabelece a equação diferencial de 2.ª ordem

$$\frac{d^2u}{dt^2} + A\frac{du}{dt} + Bu = 0$$

com

$$A = \frac{R_d\,(C_s + C_P) + R_a\,C_P}{R_d\,R_a\,C_s\,C_P}$$

e

$$B = \frac{1}{R_d\,R_a\,C_s\,C_P}$$

que se integra facilmente atendendo às condições limi-

tes (para $t=0$ é $u=0$ e a tensão do condensador choque iguala U_D) e com o conhecimento da forma da solução

$$u = U_o\left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$$

expressão representativa de uma onda aperiódica bi-exponencial (fig. 1 c) igual à adição algébrica de exponenciais com a amplitude inicial

$$U_o = \frac{U_D}{R_a C_P} \cdot \frac{T_1\, T_2}{T_1 - T_2}$$

e as constantes de tempo

$$T_{1,2} = \frac{2\, R_d R_a C_s C_P}{R_d(C_s + C_P) + R_a C_P \mp \sqrt{\alpha}}$$

com

$$\alpha = [R_d(C_s + C_P) + R_a C_P]^2 - 4\, R_d R_a C_s C_P$$

satisfazendo portanto a propriedade

$$T_1\ T_2 = R_d\ R_a\ C_s\ C_P$$

donde se obtém para a tensão de saída

$$u\,(t) = U_D\, \frac{R_d C_s}{T_1 - T_2}\left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$$

que permite uma análise mais perfeita das condições de produção.

4.1 *Constantes de tempo*

Na hipótese das ondas normalizadas em que $T_f/T_r < 1/50$, nas quais se constata $T_2 \ll T_1$, as expressões deduzidas para as constantes de tempo simplificam-se apreciavelmente [1], pois se verificam as desigualdades

$$R_a\ C_P \ll R_d\ (C_s + C_P)$$

e

$$4\ R_d\ R_a\ C_s\ C_P \ll R_d\ (C_s + C_P)^2$$

mantendo-se a propriedade $T_1\ T_2 = R_d\ R_a\ C_s\ C_P$, donde se conclui

$$T_1 \simeq R_d\ (C_s + C_P)$$

$$T_2 \simeq R_a\ \frac{C_s\ C_P}{C_s + C_P}$$

mas como o gerador é construído de modo que $C_s \gg C_P$ será ainda

$$T_1 \simeq R_d\ C_s$$

$$T_2 \simeq R_a\ C_P$$

conclusões que aliás confirmam os pensamentos enunciados na interpretação física dos fenómenos.

4.2 *Tempo de crista*

O intervalo de tempo que decorre até que a tensão choque atinja o seu pico (fig. 2 a), designado tempo de crista T_{cr}, calcula-se derivando a equação deduzida para u e igualando a zero (condição de máximo da função), com o que resulta

$$T_{cr} = \frac{T_1\ T_2}{T_1 - T_2}\ \ln\ \frac{T_1}{T_2}$$

portanto dependente unicamente das constantes de tempo T_1 e T_2.

4.3 *Valor de pico*

O pico da tensão choque determina-se agora por substituição de $t = T_{cr}$ na expressão de u_t

$$\hat{U} = U_D\, \frac{R_d C_s}{T_1 - T_2}\left[\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{T_2}{T_1 - T_2}} - \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{T_1}{T_1 - T_2}}\right]$$

sendo praticamente nula a segunda parcela comparada com a primeira, porquanto se refere ao valor da exponencial de menor constante de tempo no instante T_{cr}, donde se define o pico

$$\hat{U} \simeq U_D\, \frac{R_d C_s}{T_1 - T_2}\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{T_2}{T_1 - T_2}}$$

que permite exprimir a tensão bi-exponencial u por

$$u(t) \simeq \hat{U}\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{T_2}{T_1 - T_2}}\left(e^{-\frac{t}{T_1}}\ e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$$

em função do valor do pico $\hat{U}$.

4.4 *Tempo de fronte e tempo de semi-cauda*

Na hipótese em consideração $T_2 < T_1$ verifica-se

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{T_2}{T_1 - T_2}} \simeq 1$$

e portanto, para pequena duração de tempo, satisfaz-se a relação aproximada

$$\frac{u\,(t)}{\hat{U}} \simeq 1 - e^{-\frac{t}{T_2}},\ \text{com}\ t < T_{cr}$$

que possibilita o cálculo dos instantes t em que ocorrem certos valores da tensão u iguais a uma dada percentagem do pico. Assim se pode calcular o tempo de fronte (conforme a sua definição atrás indicada)pois

$$0{,}9 \simeq 1 - e^{-\frac{t_{0,9}}{T_2}}$$

ou seja $t_{0,9} \simeq -T_2\ 1n\ 0{,}1$ e, de igual modo,

$$t_{0,3} \simeq -T_2\ 1n 0{,}6$$

pelo que

$$T_f \simeq 3{,}15\ T_2$$

sendo assim o valor T_1 cerca de três vezes a constante de tempo T_2.

A determinação do tempo de semi-cauda, para tempos t muito grandes, permite desprezar a segunda parcela da expressão deduzida para u, escrevendo-se

$$\frac{u(t)}{\hat{U}} \simeq e^{-\frac{t}{T_1}},\quad \text{com}\ t > T_{cr}$$

e como por definição $T_r \simeq t_{0,5}$, na hipótese em estudo será:

$$0{,}5 \simeq e^{-\frac{t_{0,5}}{T_1}}$$

isto é, $t_{0,5} \simeq T_1 \ ln \ 0{,}5$, que estabelece

$$T_r \simeq 0{,}7 \ T_1$$

e portanto T_r surge aproximadamente igual a 70 % da constante de tempo T_1.

4.5. RENDIMENTO DO GERADOR

A definição do rendimento do gerador e o cálculo do pico da tensão choque conduzem imediatamente à expressão

$$\eta_1 \simeq \frac{R_d C_s}{T_1 - T_2}\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{T_2}{T_1 - T_2}}$$

que, na suposição $T_2 < T_1$, se reduz a

$$\eta_1 \simeq \frac{C_s}{C_s + C_p}$$

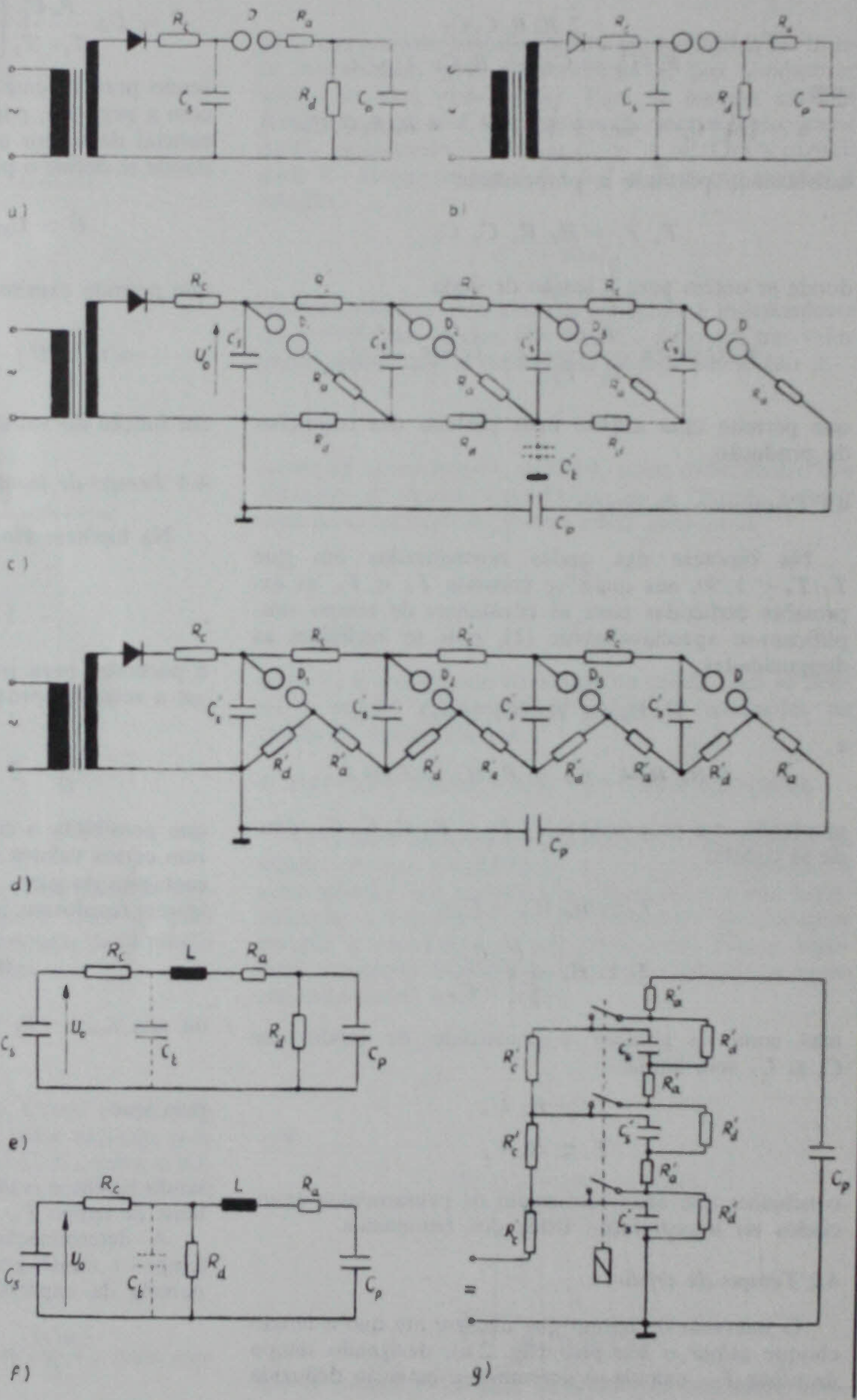


Fig. 3 — Esquemas de geradores de alta tensão choque

a) Esquema a
b) Esquema b
c) Cascata de Marx em esquema a
d) Cascata de Marx em esquema b
e) Esquema equivalente a de uma cascata
f) Esquema equivalente b de uma cascata
g) Cascata com interruptores electrónicos

aproximação reveladora da influência dos componentes físicos da instalação sobre o rendimento do gerador; não depende praticamente de R_a e R_d, e será tanto maior quanto menor for a relação C_P/C_s, tendo portanto o melhor valor quando C_P corresponde apenas à capacidade do provete. No entanto liga-se sempre um condensador em paralelo com cada provete nos ensaios porque em geral não se conhece a capacidade do provete e assim se garante que R_a e R_d não exerçam influência notória. Esta capacidade de carga adicional deve ser tão elevada que a capacidade do provete não altere sensivelmente o valor de C_P.

4.6. CÁLCULO DO ESQUEMA *a* E DO ESQUEMA *b*

Além do esquema estudado na constituição do gerador de tensão choque, dito esquema *b* (fig. 3 b), ainda se usa o esquema *a* (fig. 3 a) que se distingue daquele pela posição da resistência de descarga relativamente à resistência de amortecimento.

A análise de ambos os circuitos à semelhança do estudo que tem vindo a fazer-se, estabelece expressões aproximadas para cálculo das suas grandezas características (Quadro I), donde se conclui: como $T_2 < T_{2b}$ o esquema *a* dá frontes de tensão mais rápidas; visto que $T_{1a} > T_{1b}$ o esquema *a* oferece caudas mais lentas; mas o esquema *b* concede um rendimento melhor que o esquema *a* pois $\eta_a < \eta_b$ para iguais valores das capacidades e resistências em cada esquema, especialmente em ondas com reduzido tempo de fronte. No caso $T_s/T_r = 1{,}2/5$ não se usa o esquema *a* pois o seu grau de utilização é muito pequeno relativamente à razão das capacidades C_P/C_s. O esquema *b* contudo não convém quando a tensão aplicada ao provete se observa por meio de um osciloscópio, porque é necessário utilizar um divisor de tensão óhmico nas medições osciloscópicas, sendo então frequente combinarem-se os dois tipos de esquemas, procedimento justificável uma vez que nas expressões para os dois esquemas (Quadro I) são iguais os valores das constantes k_2 e k_1 (Quadro II) de proporcionalidade entre o tempo de fronte T_f e a constante de tempo T_2 ou entre o tempo de semi-cauda T_r e a constante de tempo T_1, embora evidentemente as constantes de tempo difiram consoante o tipo de esquema.

4.7. INFLUÊNCIA DA AUTO-INDUÇÃO DO GERADOR

Considerando a auto-indução dos condutores, que não é desprezável nas grandes cascatas, estabelece-se um esquema equivalente (fig. 3 e) cuja equação diferencial na condição do caso aperiódico limite

$$L_{crit} = \frac{R_a^2}{4} \cdot \frac{C_s C_P}{C_s + C_P},$$

conduz à expressão

$$u = U_D \frac{C_s}{C_s + C_P}\left[1 - \left(1 + \frac{t}{T}\right)e^{-\frac{t}{T}},\right]$$

com

$$T = 2\frac{L_{crit}}{R_a}$$

evitando-se portanto oscilações de elevada frequência na condição

$$R_a \geq 2\sqrt{\frac{L\,(C_s + C_P)}{C_s\,C_P}}$$

além de se estabelecer, por razões atrás acentuadas, $R_d > R_a$.

Deste modo a influência da auto-indução L no tempo de fronte é muito pequena, enquanto sobre a cauda se pode admitir desprezável.

5. CASCATA DE MARX

No esquema de principio estudado a amplitude da tensão choque é limitada pela tensão contínua disponível. Para tensões de pico superiores a 250 kV é mais económico multiplicar a tensão através da cascata de Marx, proposta em 1923 pelo professor alemão Erwin Marx, visto que o dimensionamento da instalação de alimentação (transformador e rectificador) se efectua apenas para uma fracção da tensão choque gerada.

A cascata de Marx (fig. 3 c, d) tem por princípio a carga de vários condensadores choque de capacidade C'_s em parallo, sobre resistências de carga $R'_c \gg R_d'$ e a descarga simultânea desses condensadores, colocados em série por meio de disruptores, sobre resistências de amortecimento R'_a, carregando C_P, e ainda a descarga de todos os C'_s e do C_P em paralelo sobre as resistências de descarga R'_d (estando as resistências de amortecimento R'_a inseridas conforme se trata do esquema *a* ou *b*).

O transformador de ensaio juntamente com o rectificador carrega os condensadores choque (fig. 3 c), a um certo valor U_D no instante de disparo do disruptor de manobra D_1, do 1.º andar, realizado por exemplo, com um impulso de arranque, pondo-se o primeiro condensador C'_s em série com o seguinte: assim o ponto 3 eleva-se ao potencial $\emptyset_3 = 2\,U_D$; o potencial do ponto 4, devido à carga da capacidade de terra C'_t através de R'_d (com a constante de tempo $R'_d\,C'_t$) fica inferior a U_D de um certo valor $\triangle$U, isto é, $\emptyset_4 = U_D - \triangle U$; a tensão U_{34} no segundo disruptor de manobra D_2 atinge por isso $U_{34} = \emptyset_3 - \emptyset_4 = U_D + \triangle U$; em consequência deste excesso de tensão $\triangle U$ também D_2 disrupta; e assim por diante, em todos os restantes disruptores de manobra. Daqui resulta no disruptor de manobra final, havendo n andares, uma tensão em vazio igual a nU_D. A disrupção deste último disruptor D aplica sobre a capacidade de carga de serviço C_P aproximadamente a tensão nU_D, não se atingindo bem este valor pois se dá uma queda de tensão nas resistências de amortecimento R_a'.

Uma cascata de n andares iguais, atendendo às relações

$$U_o = n\,U'_o$$

$$C_s = \frac{1}{n}\,C'_s$$

$$R_a = n\,R'_a$$

$$R_d = n\,R'_d$$

pode reduzir-se ao esquema equivalente *a* ou *b* conforme se reparte a resistência de descarga R_d pelos an-

dares: no esquema *a* as resistências de descarga R'_d são ainda resistências de carga (fig. 3 c), e no esquema *b* tanto as resistências R'_d como as resistências de amortecimento R'_a servem também de resistências de carga (fig 3 d).

Neste esquema em cascata de multiplicação da tensão já não se pode usar no cálculo a reprodução singela do esquema simplificado estudado anteriormente porque deixam de ser desprezáveis as influências sobre a forma de onda de auto-indução L dos condutores e da capacidade de terra C_t distribuída pelos andares do gerador. O cálculo da forma da tensão choque por um esquema equivalente simples só é possível se um ou mais destes parâmetros (L e C_t) forem desprezáveis, o que acontece em instalações pequenas, construídas com reduzidas dimensões, e também nos grandes geradores se a capacidade de serviço C_P for muito grande comparada com a capacidade de terra C_t ou então se as oscilações do gerador forem fortemente amortecidas mesmo com baixas capacidades de serviço.

6. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR

Os geradores de tensão choque são sobretudo construídos em coluna, quer em curva fechada, quer com a forma de caixa aberta, sendo as modernas instalações servidas por uma mesa de comando e controlo onde se leem as amplitudes da tensão e da corrente de carga do respectivo gerador.

Os condensadores no tipo de gerador em cuva, fabricados em folhas enroladas de papel de condensador (com reduzida auto-indução), são montados num cilindro isolante cheio de óleo, hermeticamente fechado e montado verticalmente. Na construção em caixa os vários condensadores parciais, em recipientes metálicos hermeticamente fechados, são instalados uns sobre os outros com separações de acordo com o isolamento exigido.

As resistências de carga e de amortecimento devem ter a menor auto-indução possível e suportar esforços dieléctricos e térmicos de curta duração mas muito intensos. Para isso fabricam-se resistências de carvão, de água, em finas camadas metálicas de alta resistividade, ou de fios resistivos metálicos enrolados num tubo isolante, embebendo-se cada unidade por meio de epóxido a fim de se elevar a rigidez dieléctrica contra descargas superficiais.

Os rectificadores de carga do gerador são sobretudo secos [6]. Antigamente usavam-se tubos electrónicos mas estas válvulas têm piores qualidades devido à grande sensibilidade a sobretensões e esforços de curto-circuito, dando portanto má garantia de serviço. Também se praticaram rectificadores mecânicos de agulhas movidas por motor síncrono mas os rectificadores secos exibem melhores propriedades, pois não produzem barulho e não originam perturbações por impulsos de alta frequência durante o funcionamento.

Os disruptores de esferas são principalmente fixados a tubos isolantes verticais e rotativos, cuja rotação por motor eléctrico comandado à distância varia o intervalo disruptivo e por consequência a amplitude da tensão choque.

Um problema fundamental nas cascatas de Marx consiste na sincronização dos disparos de todos os disruptores dos andares no momento desejado, a fim de se atenuar a dispersão de valores nas tensões geradas. Sabe-se que a disrupção do primeiro disruptor provoca o disparo dos restantes, quer por uma sobrelevação de tensão aos terminais destes disruptores em consequência das capacidades de terra, quer ainda pelas radiações ultra-violeta produzidas na primeira disrupção que vão ionizar o espaço interelectródico do andar seguinte, facilitando a descarga eléctrica entre os eléctrodos, e assim sucessivamente. Se os disruptores se encontram ao ar livre manifesta-se o inconveniente das poeiras modificarem o valor da tensão de disrupção, e por isso prefere-se a construção em ambientes capsulados [4]. Uma solução para o disparo da cascata consiste em instalar um disruptor auxiliar no primeiro andar (poderia ser noutro), actuando de 70 a 100 % do valor da tensão de disrupção dos disruptores principais. Consegue-se contudo maior exactidão com disparo artificial dos disruptores por intermédio de impulsos externos com trigatrão [2], ou ainda mais perfeitamente com raios laser [3]. Modernamente tem-se procurado melhorar o funcionamento substituindo os disruptores de esferas por interruptores electrónicos de alta tensão (fig. 3 g), o que se conseguiu com o chamado politrigatrão [5].

A título de informação de ordens de grandeza acrescenta-se que se constroem geradores de ondas choque de 100 kV a 10 MV, até vinte andares, com $C_s = 5$ a 20 nF e energia de 10 a 200 kJ (numa relação grosseira de 10 kJ/MV), gerando cada andar a tensão de 100 a 300 kV, e com um rendimento compreendido entre 0,6 e 0,9, sendo maior no esquema *b* em especial nas tensões com tempos de semi-cauda reduzidos.

Os princípios estabelecidos dão a compreender a concepção de uma instalação completa na produção

QUADRO I

Grandesas características dos esquemas a *e* b
(Hipóteses: desprezo de L *e da resistência do arco eléctrico;* $C_s > C_P : R_d > O\ R_a$

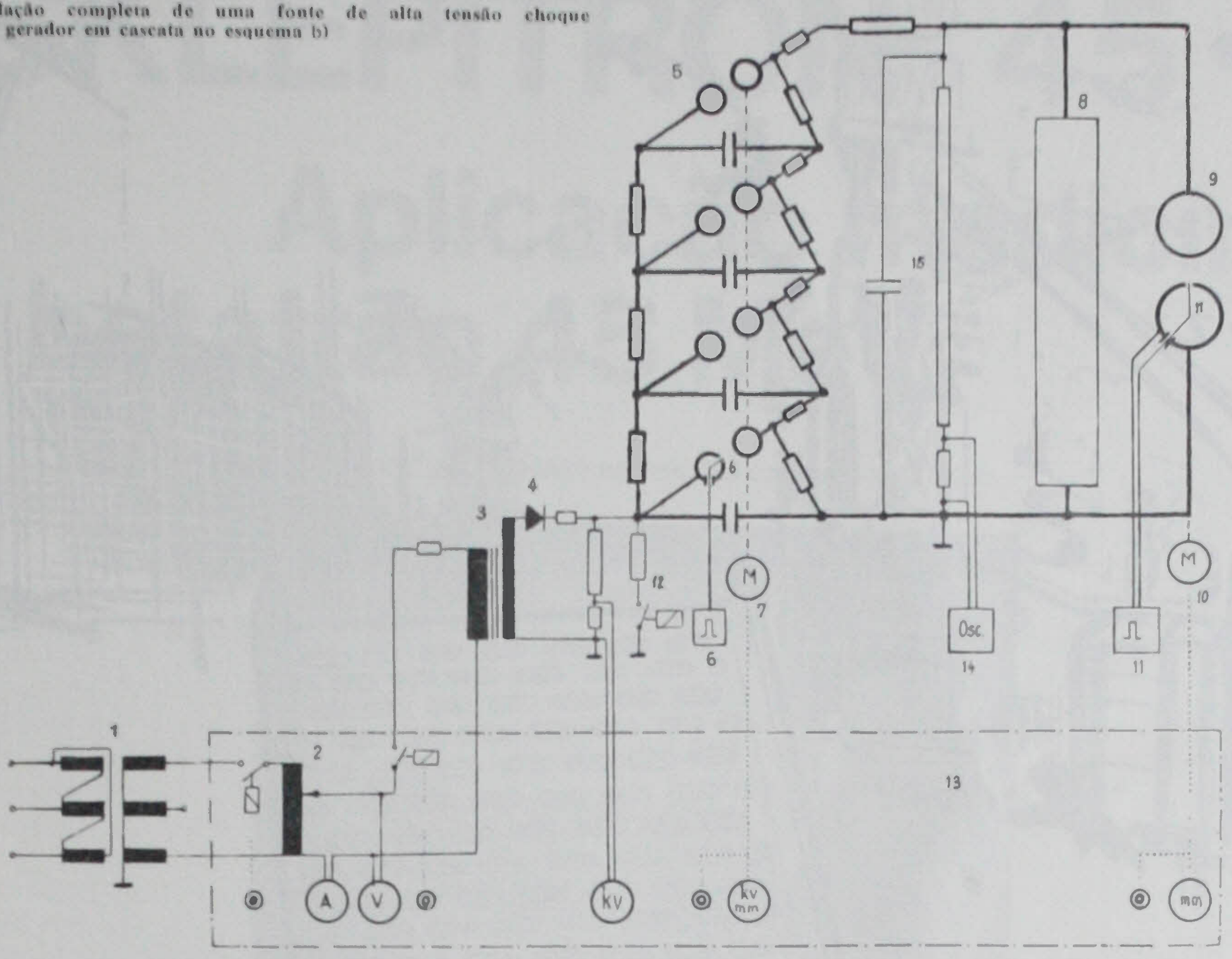
Esquema *a*	Esquema *b*
$T_f = k_2\, T_{2\,a}$	$T_f = k_2\, T_{2\,b}$
$T_r = k_1\, T_{1a}$	$T_r = k_1\, T_{1b}$
$T_2 a \simeq \frac{R_d R_a}{R_d + R_a} \cdot \frac{C_s C_P}{C_s + C_P}$	$T_{2b} \simeq R_a \frac{C_s C_P}{C_s + C_P}$
$T_1 a \simeq (R_d + R_a)\, C_s + C_P$	$T_{1b} \simeq R_d\, (C_s + C_P)$
$\eta_a \simeq \frac{R_d}{R_d + R_a} \cdot \frac{C_s}{C_s + C_P}$	$\eta_b \simeq \frac{C_s}{C_s + C_P}$

QUADRO II

Valores dos coeficientes k_2 *e* k_1 *dos esquemas* a *e* b *para tensões choque normalizadas*

Coef. / $T_f T_r$	1,2/50	1,2/50	1/50	1/200
k_2	1,49	2,96	2.50	3,15
k_1	1,44	0,73	0,72	0,70

Fig. 4 — Instalação completa de uma fonte de alta tensão choque (com gerador em cascata no esquema b)



de altas tensões choque (fig. 4): isolamento galvânico com a rede trifásica de abastecimento (1), controlo da alimentação por auto-transformador (2), alimentação em alta tensão por transformador de ensaio (3), e rectificação da corrente alternada (4), que alimenta o gerador de tensão choque (5), o qual é disparado por dispositivo electrónico com acoplamento capacitivo (6), de acordo com os afastamentos das esferas dos disruptores no gerador manobráveis por motor eléctrico de veio comum (7). Por razões de segurança do provete (8) instala-se em paralelo com este um disruptor de esferas (9) de modo a não se aplicar ao provete tensões excessivas, além de se equipar um eléctrodo com um dispositivo de disparo (11) que permite cortar a tensão choque antes da disrupção do provete. Ainda sob o aspecto de segurança se ligam automaticamente à terra todos os condensadores do gerador através de uma resistência suplementar de descarga (12) logo que se desliga a tensão de alimentação. Na elaboração deve contudo aplicar-se sempre manualmente uma vara de terra antes de se tocar no gerador, como boa regra de precaução. Todas as manobras de comando são executadas de uma mesa (13), onde existem os aparelhos de controlo necessários: amperímetros, voltímetros, botoneiras de comando. Para se efectuarem medições, por exemplo, da tensão choque gerada, em geral com osciloscópio (14), devidamente blindado, interliga-se o aparelho de medição por cabo coaxial adaptado a um divisor de tensão óhmico com blindagem capacitativa (15).

7. CONCLUSÕES

Descreveu-se o modo de produzir altas tensões choque nos laboratórios para ensaio dos equipamentos e investigação de materiais ou estudo de fenómenos peculiares aos altos impulsos de curta duração. Conhecem-se outras experiências na produção destes impulsos, principalmente com características particulares, como ondas rectangulares (muito íngremes) ou ondas muito planas (de longa duração na fronte, mas sobretudo na cauda, atingindo-se os milisegundos). No entanto as fontes baseadas na cascata de Marx são as únicas que se generalizaram.

Todo o processo de produção depende das capacidades choque, resistências de amortecimento e resistências de descarga, cujos valores determinam a forma de onda. A energia emprestada a cada impulso depende do nível inicial da tensão dos condensadores choque, o qual é definido pelos disruptores que paralisam o fenómeno de carga dos condensadores choque em paralelo e provocam a respectiva descarga em série sobre o provete ■

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

[1] R. Elsner: *Die Vorausberechnung von Stossgeneratoren und ihrer Stosswellen;* ETZ 59 (1937) p. 375.

[2] *Impulse under Strict Control;* Electrical Review 182 (1968).

[3] A. H. Guenther, J. R. Bettis: *Laser — triggered Megavolt Switching;* IEEE Journal of Quantum Electronics 3 (1967) p. 581-588.

[4] A. Rodewald: *Zur praezisen Ausloesung von Stossgeneratoren bei einer vorgewaehlten Ladespannung;* Bulletin SEV 59 (1968) p. 947-952.

[5] M. J. Bishop, R. Feinberg: *Grundsaetzliche Verbesserung des Hochspannungs-Stossgenerators. Anwendung des Polytrigatrons als Schaltgeraet;* E und M (1971) p. 62-67.

[6] H. Duarte-Ramos: *Fontes de alta tensão contínua;* ELECTRICIDADE (Outubro 1975) p. 395-403.