

# Comparação do fenómeno de descargas parciais em altas tensões alternada e contínua

HERMÍNIO DUARTE-RAMOS  
Prof. Dr. Eng.º Elect. (F.C.T. da U.N.L.)

## resumo

Analisam-se comparativamente alguns factores de influência no fenómeno das descargas parciais em dieléctricos sólidos com cavidades sob tensão alternada e tensão contínua: permitividade, condutividade, tempo, tensão aplicada, temperatura e carga espacial.

## abstract

*We compare the influence of some factors on partial discharges in solid dielectrics with voids by high a.c. and d.c. voltages, such as permittivity, conductivity, time, applied voltage, temperature and space charge.*

## 1. Introdução

Quando se aplica uma alta tensão a um dieléctrico sólido contendo cavidades, no interior ou adjacentes aos eléctrodos, logo que se atinge a tensão de escorvamento do gás em cada cavidade dá-se a sua disrupção, correspondente ao fenómeno de descargas parciais.

A acção destas ionizações nos materiais isolantes, onde as cavidades estão inseridas, pode ser mais ou menos perniciosa conforme o material sólido resiste pior ou melhor aos efeitos físico-químicos das descargas parciais. Em particular o polietileno, isolante de extraordinárias propriedades dieléctricas e técnico-económicas, permite valiosa pesquisa do fenómeno devido à sua transparência, ao mesmo tempo que se avalia a possibilidade da sua utilização no isolamento em alta tensão.

À medida que o desenvolvimento tecnológico se estendeu pelas tensões alternadas sucessivamente crescentes mais se revelou inconveniente a presença das descargas parciais na duração de vida dos materiais isolantes. Por isso o ensaio dos equipamentos de alta tensão às descargas parciais assumiu decisiva importância, justificando o vasto trabalho desenvolvido pelos investigadores científicos sobre a interpretação física do fenómeno e dos seus efeitos.

No actual caminho para o uso das altas tensões contínuas no transporte de energia eléctrica, além das aplicações onde se requerem altas tensões contínuas (raios X, filtragem de poeiras, etc.), surge obviamente a necessidade de conhecer o comportamento das cavidades sob tensão contínua, a fim de se estimar a gravidade da acção das descargas parciais na duração de vida dos respectivos isolantes. É assunto ainda por esclarecer, e daí a importância do seu estudo.

A partir da experiência adquirida na análise das descargas parciais no polietileno sob tensão alternada [1, 2] e da discussão de alguns dados experimentais publicados sobre o fenómeno em tensão contínua [3, 4] analisam-se comparativamente vários factores que intervêm no progresso físico, com vista a se definirem fisicamente as características essenciais das descargas parciais e dos seus efeitos nos materiais isolantes. Observa-se que as explicações apresentadas procuram justificar os resultados experimentais a partir de raciocínios científicos, baseados na natureza íntima dos fenómenos.

## 2. Descargas parciais em tensão alternada

Inúmeros autores têm-se ocupado do fenómeno de descargas parciais em alta tensão alternada, sobretudo

no polietileno com cavidades. Desta experiência estabeleceram-se algumas propriedades, que a seguir se sistematizam.

### I — Repartição da tensão aplicada

A tensão alternada aplicada a um dieléctrico, com o valor eficaz  $U$ , reparte-se em regime permanente entre a cavidade (onde assume o valor  $U_1$ ) e o restante material isolante em série (de valor  $U_2$ ), numa razão inversamente proporcional às correspondentes permitividades, pois  $U_1/U_2 = C_2/C_1$ .

As condutividades dos meios exercem influência significativa apenas nos regimes transitórios, de curta duração, imediatamente após cada descarga parcial, que se traduz num ligeiro desfasamento no tempo dos instantes de ocorrência das descargas parciais. Este facto é notório nos fenómenos que ocorrem junto ao instante de pico da tensão aplicada.

### II — Tensão de inserção

A tensão de inserção  $U_i$  das descargas parciais é praticamente independente do tempo de aplicação da tensão, pois o seu valor é determinado pela tensão de escorvamento da cavidade, o qual é condicionado pela pressão e natureza do gás contido na cavidade.

A carga espacial que eventualmente se forma na cavidade ao longo do tempo de aplicação da tensão pode alterar a tensão de escorvamento, mas também reduz a tensão restante  $U_r$ , que subsiste na cavidade após cada descarga parcial.

### III — Ocorrência de descargas parciais

As cargas parciais dão-se regularmente em cada alternância da tensão aplicada, com uma ocorrência da ordem da centena por segundo nas condições de inserção (teoricamente dão-se pelo menos duas descargas parciais por período da tensão).

A ocorrência de descargas parciais cresce linearmente com a tensão aplicada mas só até um certo valor, tendendo para um limite imposto pela carga espacial acumulada dentro da cavidade.

Se a carga espacial na cavidade aumenta no tempo pode-se dar a auto-extinção temporária das descargas parciais, até que por difusão dos iões positivos e sua recombinação com electrões livres se restabeleçam as condições iniciais de escorvamento da cavidade.

### IV — Intensidade das descargas parciais

Os impulsos relativos às descargas parciais mas exteriores ao provete com a cavidade, mantém a forma

e a amplitude para qualquer valor da tensão aplicada, evidentemente à parte a influência da carga espacial na cavidade. Isso significa que se mantém constante a queda de tensão interna, igual à diferença entre a tensão de escorvamento e a tensão restante,  $\Delta U_i = U_D - U_r$ .

A respectiva carga eléctrica aparente dos impulsos de descarga parcial, que portanto se mantém no tempo, na medida em que a permitividade não se altera, assume valores que podem ser elevados (na prática experimental medem-se valores de 50 pC a 1500 pC).

### V — Influência do tempo

A ocorrência de descargas parciais numa cavidade depende pouco do tempo de aplicação da tensão alternada, desde que não se agravem as condições ambientais (temperatura, humidade, pressão, vibrações, etc.).

No início da aplicação da tensão a carga eléctrica dos impulsos de descargas parciais decresce no tempo até se estabilizar num valor constante, o que se entende pela formação de uma carga espacial permanente rente às faces da cavidade.

Pode no entanto acontecer que a carga espacial não se estabilize e dê lugar à interrupção intermitente dos fenómenos de ionização.

### VI — Influência da temperatura

As descargas parciais em tensão alternada não dependem muito da temperatura do dieléctrico dentro da gama de valores normais de serviço (20° C a 80° C), porque o fenómeno é condicionado pela permitividade, cujo valor nos materiais isolantes sólidos pouco varia com a temperatura.

Reconhece-se todavia um certo crescimento da ocorrência de descargas parciais com a temperatura, dado que, simultaneamente, por excitação térmica, se reduz a tensão de escorvamento do gás contido na cavidade.

### VII — Efeito de polaridade

Como em tensão alternada os eléctrodos se comportam alternadamente como ánodo e cátodo, não se manifesta qualquer efeito de polaridade. Por isso o número de descargas parciais e as respectivas intensidades são iguais nas alternâncias positivas e negativas.

Não obstante no caso da cavidade adjacente a um eléctrodo os impulsos de uma das alternâncias são mais intensos se a face metálica da cavidade tiver natureza catódica, pois os electrões emitidos pelo eléctrodo metálico intensificam o processo das avalanchas,

o que não acontece tanto se o material do lado catódico da cavidade for isolante.

### VIII — Influência da carga espacial na cavidade

Quando em cada alternância ocorrem várias descargas parciais sucessivas (para isso a tensão aplicada terá de ser suficientemente elevada) forma-se junto à face anódica da cavidade uma carga espacial de iões positivos, crescente no decurso da alternância, pelo que os impulsos têm intensidade sucessivamente decrescente nessa alternância.

Ao inverter-se a polaridade da alternância da tensão os electrões da primeira descarga parcial imediata neutralizam a carga espacial positiva formada durante a alternância anterior, sendo então esse primeiro impulso inferior ao seguinte. Assim, numa cavidade achatada os impulsos decrescem, devido à formação de nova carga espacial positiva, crescentemente formada na face oposta à anterior. Todavia numa cavidade estreita e alongada, em que aquela neutralização se faz progressivamente, os impulsos de corrente das descargas parciais vão decrescendo em cada alternância.

### IX — Influência da carga espacial no dieléctrico

Parte dos electrões que participam nas descargas parciais penetram no dieléctrico, ficando nas interfaces da cavidade aprisionadas em níveis energéticos da zona proibida, ditos armadilhas (em inglês: «trap»). Assim se forma uma carga espacial negativa crescente no tempo, que não tem importância directa no processo das descargas parciais, embora possa exercer acção significativa no processo de envelhecimento do material isolante, por intensificação local do campo eléctrico nas interfaces.

### X — Influência da localização da cavidade

As descargas parciais em tensão alternada não diferem muito se a posição da cavidade é interior ao dieléctrico ou está adjacente a um dos eléctrodos. Isto porque não se manifesta efeito de polaridade apreciável, embora haja uma pequena diferença (como se anotou atrás).

### XI — Influência das descargas parciais na disrupção do dieléctrico

Referem-se três consequências agravantes do material isolante sempre que se dá uma descarga parcial.

Um agravamento do esforço eléctrico no material sólido em série com a cavidade resulta da limitação

da tensão na cavidade. De facto qualquer aumento da tensão aplicada acima das condições de inserção das descargas parciais vai manifestar-se apenas no material sólido em série com a cavidade, elevando aí o respectivo campo eléctrico aplicado.

A própria descarga parcial eleva localmente a intensidade do campo eléctrico, produzindo efeitos agravantes mesmo nas condições de inserção. Por um lado, aumenta a carga espacial nas interfaces dieléctrico-cavidade, donde pode resultar uma elevação local da intensidade do campo eléctrico, com o estabelecimento da disrupção intrínseca incompleta do dieléctrico. Por outro lado, constituindo uma ponta condutora de curta duração, a descarga parcial provoca intermitentemente uma grande elevação local da intensidade do campo eléctrico, que origina a propagação do arvorejamento, podendo-se atingir a disrupção completa do isolante, se não se estabelecer uma carga espacial positiva permanente nas extremidades dos canais do arvorejamento que limite o seu crescimento.

### XII — Influência das descargas parciais na duração de vida do dieléctrico

A presença de descargas parciais nos materiais isolantes sob alta tensão alternada pode causar uma redução notável na sua duração de vida. São indicadores disso a elevada ocorrência das descargas parciais e altos valores da carga eléctrica (não se definiram ainda limites toleráveis).

Mas essa dependência é condicionada por vários factores inerentes à estrutura da matéria isolante, tais como as forças de ligação das moléculas e a possibilidade de formação de carga espacial.

### 3. Descargas parciais em tensão contínua

Raros autores têm dedicado atenção ao fenómeno de descargas parciais nos materiais isolantes submetidos a altas tensões contínuas, sendo portanto menos esclarecida a sua natureza. Todavia podem-se tecer algumas propriedades em contraposição às observadas na tensão alternada.

#### I — Repartição da tensão aplicada

A tensão contínua  $U$  aplicada ao dieléctrico com uma cavidade reparte-se, em regime forçado, entre a cavidade e o dieléctrico em série segundo a razão inversa das respectivas condutividades.

As permitividades dos meios exercem somente uma escassa influência sobre a constante de tempo durante a variação transitória na aplicação da tensão contínua, até que atinja o seu valor estacionário.

## II — Tensão de inserção

Sob tensão contínua a cavidade apresenta uma tensão de inserção das descargas parciais superior à que se constata na tensão alternada (cerca de dez vezes). Este facto ainda não encontrou justificação quantificada, mas podem-se enunciar razões qualitativas.

O valor da tensão de inserção depende muito do tempo de aplicação da tensão, pois é condicionado pela condutividade superficial das faces longitudinais da cavidade e pela condutividade do volume do dieléctrico sólido, ambas bastante variáveis no tempo em consequência da carga espacial desenvolvida.

Após um determinado tempo de aplicação da tensão constata-se que a tensão de inserção é maior no caso da cavidade adjacente a um dos eléctrodos do que no caso da cavidade interior ao dieléctrico sólido, o que se esclarece pelo facto da carga espacial formada na cavidade exercer acção sobre o valor da tensão de escorvamento do gás contido na cavidade.

## III — Ocorrência de descargas parciais

As descargas parciais aparecem em intervalos de tempo irregulares e muito espaçados, numa ocorrência da ordem de algumas descargas parciais por minuto nas condições de inserção. Esta ocorrência é muito menor que em tensão alternada, porque a ionização da cavidade após uma série de descargas parciais elimina o aparecimento de novos escorvamentos até que, por difusão, os iões positivos e os electrões se recombinem (ou seja, por redução da condutividade superficial da cavidade). Neste processo intervêm fenómenos de adsorção que dificultam as interpretações quantitativas.

Depois da inserção a ocorrência de descargas parciais cresce linearmente com a tensão aplicada, mas depressa começa a declinar para um valor limite por imposição da carga espacial que se mantém na cavidade.

## IV — Intensidade das descargas parciais

Os impulsos detectados no exterior do provete apresentam a mesma forma independentemente do valor da tensão aplicada, mas a carga eléctrica aparente reduz-se no tempo, entre valores relativamente baixos (1pC a 300 pC), por influência do crescimento da condutividade superficial da cavidade.

A intensidade dos impulsos de descargas parciais é praticamente independente da localização da cavidade no dieléctrico, ainda em resultado da carga espacial.

## V — Influência do tempo

A ocorrência de descargas parciais reduz-se ao longo do tempo de aplicação da tensão contínua, porquanto a condutividade superficial na cavidade cresce, provocando uma redução da tensão efectivamente aplicada à cavidade, enquanto a condutividade volumica do dieléctrico se reduz por efeito da carga espacial negativa no material sólido, que constitui uma barreira de potencial crescente na interface anódica.

## VI — Influência da temperatura

As descargas parciais em tensão contínua dependem muito da temperatura, visto que o fenómeno é determinado pela condutividade do isolante, a qual varia bastante com a temperatura.

Quanto mais elevada for a temperatura maior é a condutividade, e portanto maior é a ocorrência de descargas parciais.

## VII — Efeito de polaridade

É notório o efeito de polaridade da tensão contínua aplicada aos eléctrodos. Num dado instante a ocorrência de descargas parciais é menor no caso da cavidade adjacente ao eléctrodo positivo, é maior se a cavidade está junto ao eléctrodo negativo e apresenta valor ainda mais elevado quando a cavidade é interior ao dieléctrico. Estas diferenças de comportamento justificam-se pela formação de carga espacial na cavidade (crescente no decurso do tempo).

Também a tensão de ruptura do dieléctrico é diferente conforme a polaridade dos eléctrodos, em consequência da carga espacial no dieléctrico (igualmente crescente no tempo).

## VIII — Influência da carga espacial na cavidade

Numa cavidade adjacente ao eléctrodo positivo forma-se apenas carga espacial positiva na face oposta, mas intensamente porque não há recombinação sensível dos iões positivos (visto que os electrões livres se escoam rapidamente para o eléctrodo anódico), o que tem como resultado uma grande redução da tensão efectivamente manifestada entre as faces da cavidade.

Com a cavidade adjacente ao eléctrodo negativo forma-se junto ao eléctrodo catódico uma carga espacial positiva reduzida (pois os iões positivos neutralizam-se facilmente pelos electrões libertados do cátodo), enquanto na face oposta da cavidade se aglomera uma carga espacial negativa bastante apreciável (por ser grande o número de electrões libertados pelo metal

catódico), que reduz a tensão realmente aplicada à cavidade mas menos que no caso anterior.

Quando a cavidade é interior ao dieléctrico as faces da cavidade são de material isolante e portanto os electrões livres correspondem às ionizações das avalanchas, pelo que a carga espacial positiva cresce mais rapidamente que no último caso (porque há menos neutralizações de iões positivos), e por sua vez a carga espacial negativa é inferior ao valor do mesmo caso, resultando assim uma menor diminuição da tensão da cavidade.

#### IX — Influência da carga espacial no dieléctrico

Com a cavidade adjacente ao eléctrodo positivo não se forma obviamente carga espacial negativa na cavidade nem no dieléctrico.

Mas se a cavidade se localizar contiguamente ao eléctrodo negativo parte dos electrões libertados nas descargas parciais penetram no dieléctrico, constituindo na interface uma carga espacial negativa, e do mesmo modo quando a cavidade é interior ao dieléctrico. Origina-se então uma intensificação do campo eléctrico nas interfaces.

#### X — Influência da localização da cavidade

As descargas parciais em tensão contínua dependem da localização da cavidade entre os eléctrodos por causa do efeito de polaridade imposto pela carga espacial.

A tensão de inserção, para um dado tempo de aplicação da tensão, é menor se a cavidade está no interior do dieléctrico do que se se encontra adjacente a qualquer dos eléctrodos, pois é grande a carga espacial positiva e há ainda uma importante carga espacial negativa na cavidade, abaixando ambas a tensão de escorvamento da cavidade (mais uma razão para que se verifique uma maior ocorrência de descargas parciais).

#### XI — Influência das descargas parciais na disrupção do dieléctrico

Em consequência do efeito de polaridade consequente da carga espacial no dieléctrico prevê-se que, para uma dada temperatura, a tensão de disrupção do dieléctrico seja maior quando a cavidade está junto do eléctrodo negativo e mais ou menos igual nos restantes dois casos analisados.

Combinando o efeito da carga espacial no dieléctrico com o aumento da condutividade superficial na cavidade é de esperar que as condições de disrupção

intrínseca local do dieléctrico se atinjam no canto da cavidade (que não se exige no caso da tensão alternada, onde a repartição da tensão é consequente da permissividade em vez da condutividade).

#### XII — Influência das descargas parciais na duração de vida do dieléctrico

Embora possa exercer uma certa diminuição da duração de vida dos materiais isolantes, o fenómeno de descargas parciais em tensão contínua não se revela tão grave como na tensão alternada, dado que a ocorrência é muito inferior e as respectivas cargas eléctricas são mais reduzidas.

A disrupção dos sólidos sob tensão contínua justifica-se sobretudo pela carga espacial negativa no dieléctrico, quer junto da cavidade, quer próximo do eléctrodo catódico (por injeção catódica).

#### 4. Conclusões

Feita a análise física do fenómeno de descargas parciais nos dieléctricos sólidos sob alta tensão alternada e em alta tensão contínua conclui-se que os seus efeitos nos materiais isolantes, em particular os isolantes poliméricos (até porque as confirmações experimentais das relações descritas se efectuaram no polietileno), são menos funestas no caso da tensão contínua. Este resultado constitui uma valiosa vantagem na adopção dos sistemas de alta tensão contínua na transmissão de energia eléctrica.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi subsidiado pela DAAD — Deutsche Akademischer Austauschdienst, a quem se agradece, durante a estada, em 1975, como Gast-Professor, no Schering-Institut da Universidade de Hanover.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. DUARTE-RAMOS: *Quantificação do fenómeno de descargas parciais em dieléctricos sólidos*; Técnica 410 (1971) p. 533-540.
- [2] H. DUARTE-RAMOS: *Contribuição para a análise e interpretação física de descargas parciais em dieléctricos sólidos*; Memória EL-4 da U. L. (1972).
- [3] K.-B. MUELLER: *Teilentladungen bei hohen Gleichspannungen in extrudierten Polyäthylen*; ETZ-A 93 (1972) p. 153-156.
- [4] S. SHIAHAB: *Teilentladungen in Hohlräumen von polymeren Isolierstoffen bei hoher Gleichspannung*; Dissertation T. U. Braunschweig (1972).