

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 179

**ESTUDOS DE PROTETORES HÍBRIDOS CONTRA  
TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS PARA APLICAÇÃO  
EM LINHAS DE TELECOMUNICAÇÕES**

*Ronaldo Kascher Moreira*

DATA DA DEFESA: 31.10.97

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDOS DE PROTETORES HÍBRIDOS CONTRA  
TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS PARA APLICAÇÃO EM LINHAS DE  
TELECOMUNICAÇÕES

AUTOR: RONALDO KASCHER MOREIRA

ORIENTADOR: PROF. JOSÉ OSVALDO SALDANHA PAULINO

Belo Horizonte, 1997

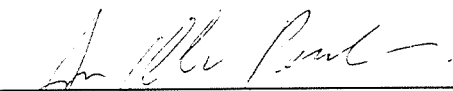
**“Estudos de Protetores Híbridos contra Transitórios Elétricos para Aplicação em Linhas de Telecomunicações”**

*Ronaldo Kascher Moreira*

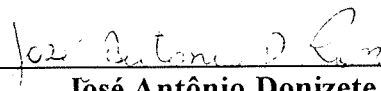
Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 31 de outubro de 1997.

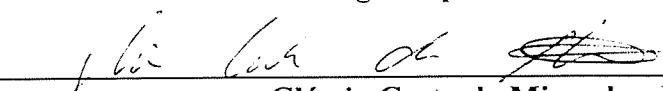
Por:



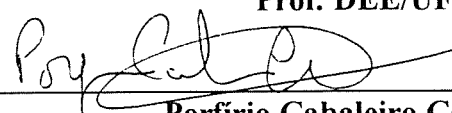
\_\_\_\_\_  
**José Osvaldo Saldanha Paulino - Dr.**  
**Prof. DEE/UFMG - Orientador**



\_\_\_\_\_  
**José Antônio Donizete Rossi - Dr.**  
**Eng. CPqD/TELEBRÁS**



\_\_\_\_\_  
**Glássio Costa de Miranda - Dr.**  
**Prof. DEE/UFMG**



\_\_\_\_\_  
**Porfírio Cabaleiro Cortizo - Dr.**  
**Prof. DELT/UFMG**

## AGRADECIMENTOS

À minha esposa Dina e filhos Herculano, Gabriela e Ronaldo, pela compreensão e apoio às atividades necessárias à realização do presente trabalho.

Aos meus pais Victorino e Gabriela, pelo exemplo que me guia.

Ao Prof. José Osvaldo, orientador deste trabalho, que consegue de forma simples agregar os conhecimentos teóricos de um pesquisador às ações práticas de um engenheiro.

Aos profissionais do "LEAT", e em especial ao Prof. Glássio, ao Eng. José Luiz e ao Tec. Alisson, pela paciência e apoio durante as incontáveis horas de laboratório necessárias à conclusão deste trabalho.

Finalizo este estudo na certeza de que os conhecimentos aqui transcritos representam uma ínfima parte do vasto acêrvo técnico por mim adquirido durante estes anos de convivência com os professores do "CPGEE" da UFMG.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta os resultados de testes realizados em componentes e circuitos híbridos utilizados para proteção de equipamentos de telecomunicação contra transitórios elétricos acoplados nas linhas de comunicação de dados. Para tal foram montados geradores de surtos de tensão com formas de onda de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  e  $10 \times 700 \mu\text{s}$  e analisados os diferentes resultados obtidos para vários componentes e circuitos híbridos. São apresentadas as otimizações realizadas nos geradores de surtos sugeridos pelas normas, de forma a apresentarem formas de onda de tensão e corrente sem oscilações e descontinuidades. Os comentários sobre os diversos oscilogramas obtidos são apresentados ao longo do trabalho, e ao fim é apresentada uma síntese das conclusões finais. Foram propostas algumas novas configurações para protetores híbridos que, após serem testadas, foram consideradas satisfatórias

## ABSTRATC

This thesis presents the test results of electrical transients protectors and hybrid circuits for telecommunication lines applications. For tuis purpose, 1,2 x 50  $\mu$ s and 10 x 700  $\mu$ s surge generators were built up and later improved to deliver voltage and currents standard impulses whithout distortions and discontinuitys. New types of hibrid protectors are proposed and the test results shows their satisfactory performance.

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>001</b>
<b>2 - A MONTAGEM DOS GERADORES.....</b>	<b>012</b>
<b>2.1 - GERADOR DE 1,2 x 50<math>\mu</math>s.....</b>	<b>012</b>
<b>2.2 - GERADOR DE 10<math>\mu</math>s x 700<math>\mu</math>s.....</b>	<b>017</b>
<b>3 - OS TESTES REALIZADOS.....</b>	<b>020</b>
<b>3.1 Testes Utilizando o Gerador de 1,2 x 50 <math>\mu</math>s.....</b>	<b>021</b>
<b>3.1.1 - Centelhador a Gás 250 V / 10 kA.....</b>	<b>021</b>
<b>3.1.2 - Varistores de Óxido Metálico.....</b>	<b>025</b>
<b>3.1.3 - Diodos de Avalanche Rápidos.....</b>	<b>033</b>
<b>3.1.4 - Configurações Híbridas.....</b>	<b>036</b>
<b>3.1.4.1 - Associação em Paralelo de Diodo                     Centelhador a Gás.....</b>	<b>038</b>
<b>3.1.4.2 - Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados                     por Resistor.....</b>	<b>042</b>
<b>3.1.4.3 - Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados                     por Resistor e Indutor em Série.....</b>	<b>047</b>
<b>3.1.4.4 - Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados                     por Resistor.....</b>	<b>052</b>
<b>3.1.4.5 - Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados                     por Resistor em Série com Indutor.....</b>	<b>056</b>
<b>3.2 Testes Utilizando o Gerador de 10 x 700 <math>\mu</math>s.....</b>	<b>060</b>
<b>3.2.1 - Centelhador a Gás 250 V / 10 kA.....</b>	<b>060</b>
<b>3.2.2 - Varistores de Óxido Metálico.....</b>	<b>063</b>
<b>3.2.3 - Diodos de Avalanche Rápidos.....</b>	<b>070</b>

3.2.4 - Configurações Híbridas.....	073
3.2.4.1 - Associação em Paralelo de Diodo e Centelhador a Gás.....	074
3.2.4.2 - Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor.....	078
3.2.4.3 - Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor e Indutor em Série.....	081
3.2.4.4 - Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor.....	085
3.2.4.5 - Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor em Série com Indutor.....	088
4 - SÍNTESE DAS ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	092
4.1 - Centelhadores a Gás 250 V /10 kA.....	092
4.2 - Varistores de Óxido Metálico.....	093
4.3 - Diodos de Avalanche Rápidos.....	095
4.4 - Associação em Paralelo de Diodo e Centelhador a Gás.....	095
4.5 - Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor.....	096
4.6 - Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor e Indutor em Série.....	097
4.7 - Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor.....	098
4.8 - Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor em Série com Indutor.....	099
5 - CONCLUSÃO.....	101
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103



# 1 - INTRODUÇÃO

As instalações elétricas e de telecomunicações sempre sofreram interferências eletromagnéticas provenientes das mais diversas fontes.

Os avanços tecnológicos do "hardware" (informática e telecomunicação) observados nos últimos anos, principalmente os verificados nos componentes eletrônicos utilizados em sua fabricação, tem acarretado a diminuição de sua suportabilidade a transitórios elétricos acoplados em suas linhas de sinal (redes digitais) bem como em suas linhas elétricas (alimentação).

Das fontes naturais de interferências, sem dúvida alguma, a descarga atmosférica é mais agressiva em termos de grandezas elétricas impostas aos equipamentos [1, 2]. Enfocando o aspecto econômico, as descargas atmosféricas laterais são as que mais causam prejuízos às instalações eletrônicas uma vez que os campos eletromagnéticos produzidos por elas, induzem mesmo a grandes distâncias nos cabos de alimentação (circuitos de distribuição das concessionárias) e de comunicações (cabos telefônicos aéreos) tensões elétricas impulsivas de valores apreciáveis e incompatíveis com a suportabilidade dos sistemas eletrônicos [3].

A conseqüência imediata deste fato, é a diminuição do tempo médio entre falhas (MTBF) dos equipamentos, produzindo prejuízos incalculáveis, contabilizados não só pelos custos de manutenção mas, principalmente, pela indisponibilidade dos sistemas, e

suas conseqüências, acarretando lucros cessantes, perda de clientes, danificação de máquinas (controle de processos), dentre outras.

A este cenário, soma-se a insignificante evolução verificada nas técnicas de engenharia aplicadas à infra-estrutura necessária ao bom funcionamento dos sistemas eletrônicos avançados, não se constatando diferenças significativas das técnicas recomendadas hoje e as de 15 anos atrás [4].

Fazendo-se uma breve retrospectiva histórica das tecnologias utilizadas para a proteção elétrica de circuitos de telecomunicações [5], podemos colocar os “Gaps” como os componentes precursores adotados para esta finalidade. Nestes componentes, um arco elétrico se forma entre dois eletrodos com dielétrico a ar, aterrando a linha de telecomunicações atingida pelo transitório. Esta técnica como vantagem apresenta uma alta impedância linha/terra e praticamente nenhuma atenuação do sinal eletrônico, e, como desvantagem, tempos de resposta muito longos e tensões de grampeamento muito elevadas, tendo sido muito utilizada no passado para a proteção de equipamentos eletromecânicos de alta suportabilidade a transitórios, estando atualmente em desuso para esta aplicação.

Como evolução natural surgiram no início da década de 60, os centelhadores a gás, basicamente compostos por um “Gap” encapsulado em uma ampola preenchida com gás raro. Estes dispositivos são largamente utilizados até hoje, possuindo como vantagem basicamente as mesmas do “Gap” à ar aliada à grande capacidade de dreno de corrente transitória e tensões de grampeamento menores, e, como desvantagem também as mesmas do “Gap” a ar, a saber, seus tempos de resposta longos e tensões de

grampeamento muito elevadas (ainda que muito menores que as obtidas no "GAP" a ar). Este trabalho analisa o centelhador a gás.

Os varistores de óxido metálico, também analisados neste trabalho, foram desenvolvidos posteriormente (nos fins da década de 70) e possuem como vantagem tempos de resposta pequenos e possibilidade de apresentarem tensões de grampeamento baixas. Como desvantagem em comparação com o centelhador, apresentam baixa impedância em regime normal de operação e alta capacitância parasita, constituindo-se em um filtro tipo "passa-baixa", degradando assim os sinais de alta frequência das linhas de telecomunicações [6].

Como alternativa técnica para a proteção das linhas eletrônicas, também foram utilizadas no passado diodos "zenner" e, mais recentemente, os diodos de avalanche rápidos especialmente desenvolvidos para suportarem transitórios de amplitudes mais elevadas. Estes últimos componentes também foram ensaiados neste trabalho.

Por fim, de forma a se conseguir capacidade de condução de corrente aliada a tempo de resposta satisfatório e tensões de grampeamento condizentes com o estágio atual das tecnologias eletrônicas utilizadas em equipamentos de telecomunicações, foram testadas várias combinações híbridas utilizando-se componentes coordenados.

A necessidade de coordenação entre diversos componentes para se otimizar os protetores aplicados a equipamentos sensíveis já foi constatada há muitos anos, tendo sido objeto de trabalho publicado em 1980 [4]. Este trabalho, apesar de focar a proteção de linhas de alimentação elétrica em baixa tensão, enfatiza a conexão em "cascata" de dispositivos coordenados através de impedância em série entre os mesmos.

Apesar de existirem no mercado brasileiro vários fabricantes de protetores, estes produtos normalmente não são ensaiados pois não temos normalização nacional sobre o assunto. A Telecomunicações Brasileiras S.A. - TELEBRÁS tem normalização própria e laboratórios próprios para a realização de testes nos protetores que são instalados nas centrais telefônicas. Os protetores que são utilizados pelos consumidores não são testados, em sua grande maioria, e em boa parte deles não se conhece nem o princípio de funcionamento, existindo muitas dúvidas sobre a real eficiência desses dispositivos [3].

Recentemente tem sido pesquisadas novas técnicas de proteção de sistemas sensíveis enfatizando os dispositivos de bloqueio [5] que, ao contrário dos dispositivos convencionais, que são instalados em paralelo com a linha e que são objeto do presente trabalho, agem inserindo uma alta impedância série, isolando o equipamento protegido em caso da ocorrência de transitórios. Estes dispositivos, entretanto, em seus atuais níveis de desenvolvimento, normalmente são instalados como complemento das proteções convencionais.

Objetiva o presente trabalho, apresentar os resultados obtidos, em testes de componentes não lineares, sozinhos ou em configurações híbridas utilizados como protetores de equipamentos eletrônicos contra transitórios elétricos acoplados nas linhas de telecomunicações. Para tal, foram montados dois geradores de surtos, de tensão máxima de crista de 4 kV, que produzem respectivamente transitórios de tensão de  $1,2 \mu\text{s} \times 50 \mu\text{s}$  e de  $10 \mu\text{s} \times 700 \mu\text{s}$ , em conformidade com as recomendações K-21 e K-22 do ITU / CCITT [8 e 9].

Foram coletados oscilogramas de tensão e corrente e os resultados obtidos são analisados.

## 2 - A MONTAGEM DOS GERADORES

Abaixo apresentamos os diagramas elétricos dos geradores utilizados, com algumas observações relativas às suas montagens e ajustes.

Os geradores utilizados são os propostos nas referências [7, 8 e 9]. As formas de onda recomendadas para os testes ( $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  e  $10 \times 700 \mu\text{s}$ ) foram normalizadas a partir de resultados experimentais obtidos em uma série de medições realizadas em vários países ao redor do mundo. Estas medições indicam que tais formas de onda são bastante representativas das sobretensões que aparecem nas linhas de comunicação [9].

### 2.1 - GERADOR DE $1,2 \times 50 \mu\text{s}$

O circuito do gerador sugerido pela do recomendação [9] está representado no diagrama abaixo:

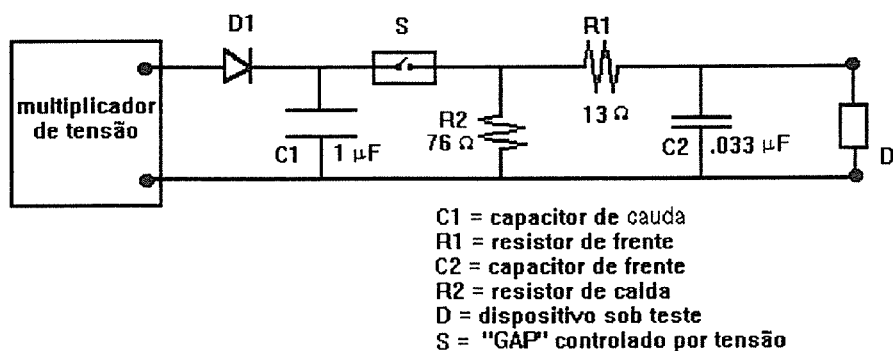


Fig1 - Gerador de Impulso  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  - Diagrama Esquemático

Sua montagem foi realizada utilizando-se capacitores de poliéster em arranjo série / paralelo, de forma a se obter a capacitância especificada para uma tensão máxima de carga de 5 kV.

Visando não saturar a ponta de prova, as correntes foram medidas através do arranjo divisor de corrente apresentado na figura 2 abaixo:

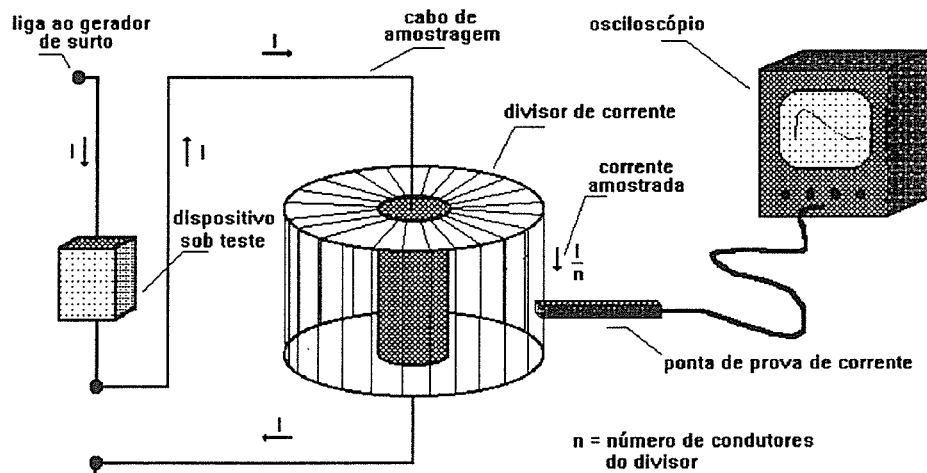
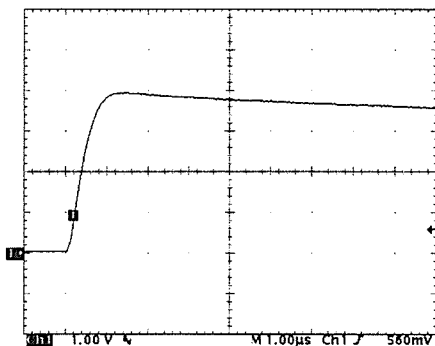
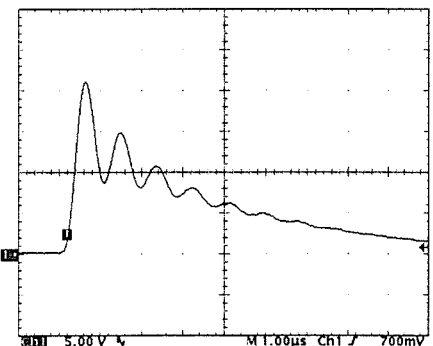


Fig 2 - Arranjo para medição de corrente

Calibrando-se em aberto o gerador para 4 kV, foi obtido o oscilograma 1 de tensão. Com os terminais do gerador em curto-circuito, foi obtido o oscilograma 2 de corrente, conforme abaixo:



Oscilograma 1-gerador 1,2 x 50  $\mu\text{s}$  conforme norma - tensão de saída em aberto 4kV ( 1kV / div ).



Oscilograma 2-gerador 1,2 x 50  $\mu\text{s}$  conforme norma - corrente de saída em curto - 210 A ( 50 A / div ) - gerador calibrado para 4kV em aberto.

Conforme previsto, o oscilograma de tensão se apresentou estável e com tempos de crista e de meia-onda bem definidos. O mesmo não ocorreu com o oscilograma de corrente, que apresentou oscilação senoidal amortecida acentuada que prejudicaria as avaliações técnicas dos dispositivos testados.

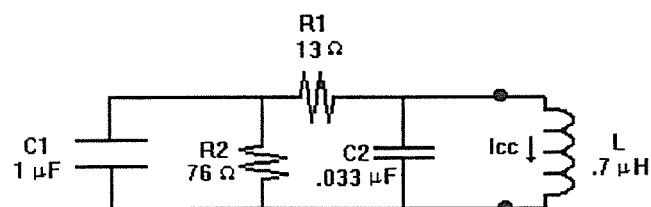
O período da oscilação foi de aproximadamente 1,1 MHz, sugerindo como primeira hipótese para o fato, a ressonância do capacitor de frente (0,33 $\mu$ F) com uma indutância de aproximadamente 0,7  $\mu$ H, conforme desenvolvimento abaixo:

$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{1}{4\pi^2 F_r^2 C}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \times (1,1 \times 10^6)^2 \times 0,03 \times 10^{-6}} = 0,7 \mu\text{H}$$

Esta indutância parasita é proporcionada, principalmente, pelos cabos de amostragem de corrente, que possuem comprimentos apreciáveis devido ao arranjo físico da bancada de testes.

Para avaliação desta possibilidade, foi simulado o circuito equivalente abaixo, através do programa "MICROTRAN" [10].

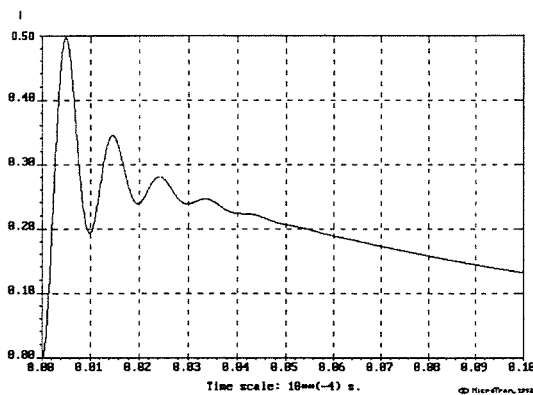


C1 = capacitor de cauda  
 R1 = resistor de frente  
 C2 = capacitor de frente  
 R2 = resistor de calda  
 L = indutância dos cabos de amostragem

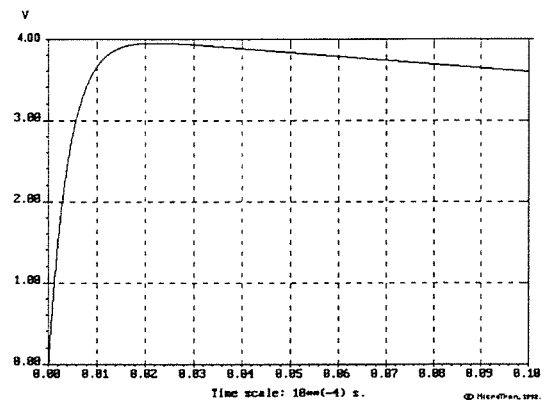
Fig 3 - Gerador de Impulso 1,2  $\times$  50  $\mu$ s em curto - Circuito Equivalente



Abaixo apresentamos os oscilogramas simulados de tensão e corrente obtidos:



Oscilograma 3-gerador  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$   
- simulação - forma de onda de  
corrente de saída em curto.



Oscilograma 4-gerador  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$   
- simulação - forma de onda de  
tensão de saída em aberto.

Conforme podemos verificar, os oscilogramas 2 e 3 são bastantes semelhantes, comprovando a nossa suposição.

Objetivando eliminar ou atenuar esta oscilação de corrente foi simulado, através do mesmo programa ("MICROTRAN"), o seguinte circuito alternativo:

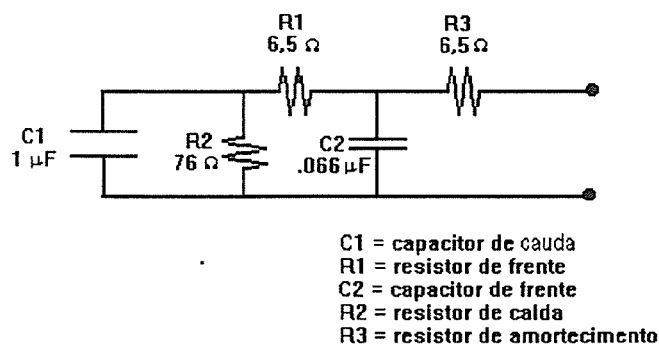
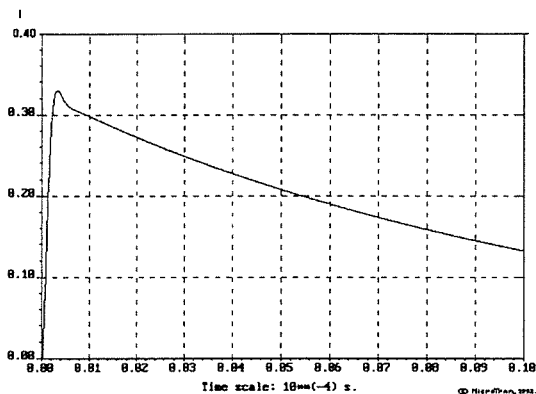


Fig 4 - Gerador de Impulso  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  - Circuito Modificado  
com inserção de resistor de amortecimento

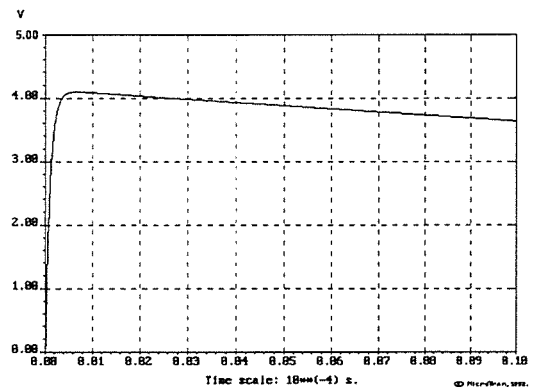
Conforme pode ser verificado, foi inserido um resistor de amortecimento em série com a saída do gerador, visando a atenuação das oscilações das correntes de curto-circuito, mantendo-se entretanto o produto  $R_1 \times C_2$  e consequentemente o tempo de frente. Desta forma, o valor do resistor  $R_1$  foi reduzido à metade ( $6,5\Omega$ ) e o capacitor de

frente teve o seu valor dobrado ( $0,066\mu\text{F}$ ) mantendo-se o tempo de crista e a impedância série entre capacitor de calda e a carga, preservando-se o nível de corrente de curto-circuito.

Os resultados das simulações encontram-se nos oscilogramas 5 e 6 abaixo, que indicam ter sido eliminada a oscilação com o gerador em curto, mantendo-se suas características de tensão em aberto.

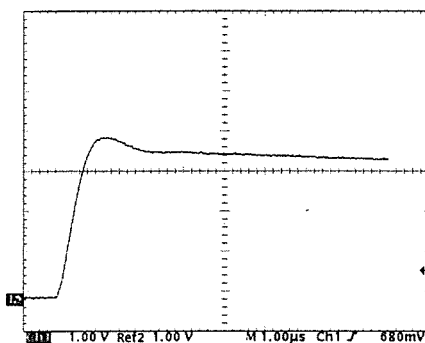


Oscilograma 5-gerador  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  modificado - simulação - forma de onda de corrente de saída em curto.

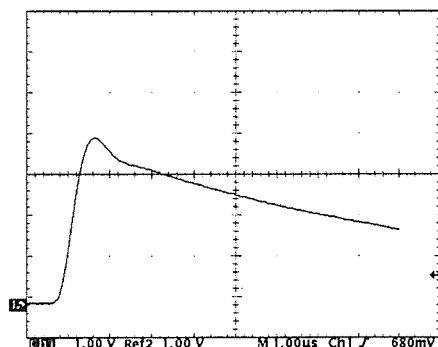


Oscilograma 6-gerador  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  modificado - simulação - forma de onda de tensão de saída em aberto.

O novo circuito foi montado, obtendo-se os oscilogramas 7 e 8 abaixo:



Oscilograma 7-gerador  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  modificado - tensão de saída em aberto  $4\text{kV}$  ( $1\text{kV} / \text{div}$ )



Oscilograma 8-gerador  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  modificado - corrente de saída em curto -  $200\text{ A}$  ( $50\text{ A} / \text{div}$ ) -gerador calibrado para  $4\text{kV}$  em aberto

Estes oscilogramas comprovam a eficiência da modificação do circuito do gerador, tendo sido esta modificação incorporada ao gerador utilizado nos testes detalhados neste documento.

Nestes testes especificamente, foi utilizado a ponta de corrente já ajustada para atenuar em 10 vezes acoplada a divisor de corrente com redução de 10 vezes, totalizando um fator de redução de 100 vezes. Este arranjo de medição de corrente foi aferido utilizando-se uma ponta de prova modelo AM 503 + A6 302 da "Tectronix".

## 2.2 - GERADOR DE $10\mu\text{s} \times 700\mu\text{s}$

O gerador recomendado pela norma está representado no diagrama abaixo:

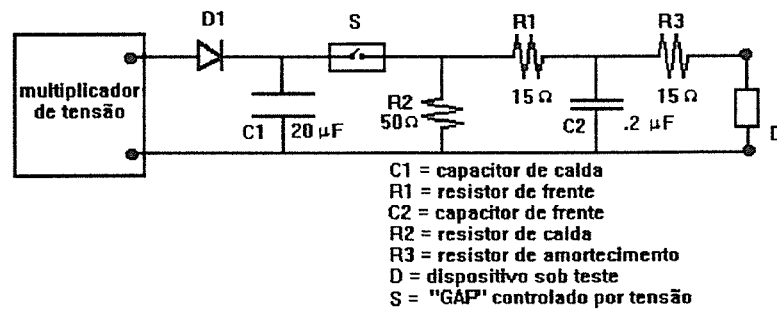
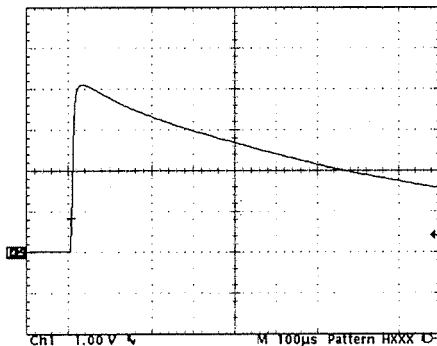


Fig5 - Gerador de Impulso  $10 \times 700 \mu\text{s}$  - Diagrama Esquemático

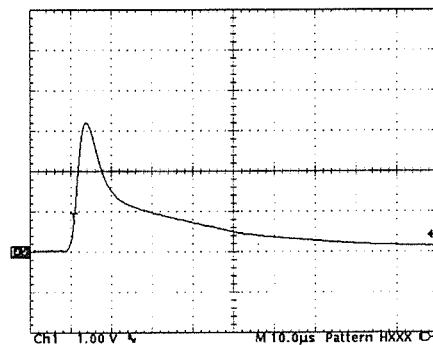
Sua montagem foi realizada utilizando-se como capacitor de cauda, capacitores eletrolíticos em arranjo série / paralelo, de forma a se obter a capacitância especificada para uma tensão de carga de 5 kV.

A utilização de capacitores eletrolíticos visou basicamente a diminuição de custos e dimensões físicas, pois as alternativas possíveis (capacitores de poliéster ou mica) nos níveis requeridos de tensão e capacitância onerariam em cerca de cinco vezes o custo total do gerador e incorporaria considerável aumento do espaço físico necessário para a montagem, face à grande relação capacitância/volume conseguida com o tipo de capacitor utilizado. Os testes comprovaram o bom funcionamento destes componentes alternativos.

Calibrando-se em aberto o gerador para 4 kV, foi obtido o oscilograma 9 de tensão. Curtocircuitando-se os terminais do gerador, foi obtido o oscilograma 10 de corrente, conforme abaixo:



Oscilograma 9-gerador 10 x 700  $\mu$ s conforme norma - tensão de saída em aberto 4kV ( 1kV / div ).



Oscilograma 10-gerador 10 x 700  $\mu$ s conforme norma - corrente de saída em curto - 64 A ( 20 A / div ) -gerador calibrado para 4kV em aberto.

Ambos os oscilogramas (de tensão e de corrente) se apresentaram estáveis e com tempos de crista e de meia-onda bem definidos. Podemos observar que o circuito do gerador de impulso de 10 x 700  $\mu$ s, sugerido na recomendação já incorpora um resistor de amortecimento de 15  $\Omega$ , ao contrário do circuito sugerido para o gerador de 1,2 x 50  $\mu$ s.

Nestes testes especificamente, foi utilizado a ponta de corrente sem atenuação acoplada a divisor de corrente com redução de 20 vezes, totalizando um fator de redução de 20 vezes.

### 3 - OS TESTES REALIZADOS

Os testes realizados compreenderam a aplicação de ondas de tensão de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  e de  $10 \times 700 \mu\text{s}$  com tensões de crista variáveis de 1 kV a 4 kV.

Estas formas de onda são sugeridas nas recomendações K-21 e K-22 do ITU / CCITT, sendo representativas dos distúrbios elétricos normalmente acoplados nas linhas de telecomunicações e de controle.

Os dispositivos testados foram componentes não lineares e configurações híbridas utilizando associação de dois ou mais dispositivos em "cascata" coordenados por tensões de disparo diferenciadas ou por redes resistivas e indutivas.

As definições das expressões qualificadoras utilizadas neste estudo foram as seguintes:

a) Sobretensão Residual

Valor máximo verificado da tensão de saída do dispositivo sob teste antes de transcorrido o tempo de resposta.

b) Tensão de Grampeamento

Valor verificado da tensão de saída do dispositivo sob teste depois de transcorrido o tempo de resposta.

### c) Tensão Final de Grampeamento

Valor estável verificado da tensão de saída do dispositivo sob teste após a ocorrência da tensão de grampeamento.

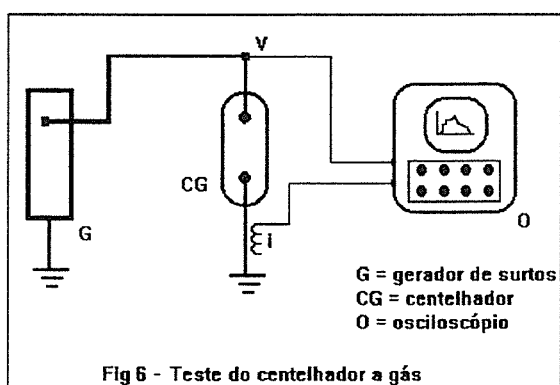
### d) Tempo de Resposta

Tempo de duração da sobretensão residual contado a partir do instante em que seu valor passa pelo valor da tensão de grampeamento, até o instante em que o dispositivo garanta que a tensão de saída não ultrapasse mais o valor da tensão de grampeamento.

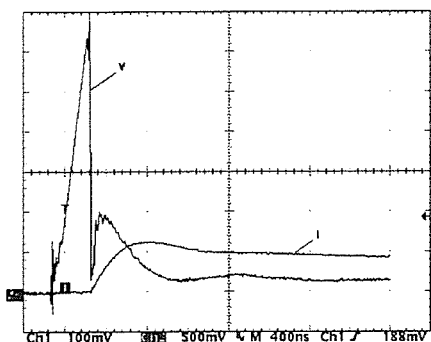
## 3.1 Testes Utilizando o Gerador de 1,2 x 50 $\mu$ s

### 3.1.1 Centelhador a Gás 250 V / 10 KA

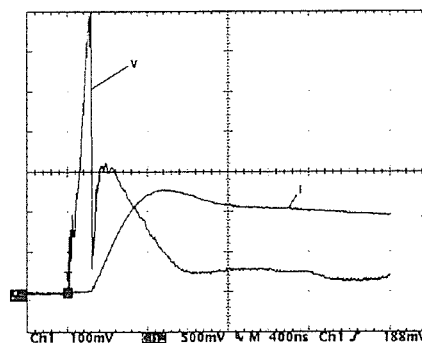
Foi montado o circuito de testes abaixo. A base de tempo do osciloscópio foi calibrada em 0,4  $\mu$ s / divisão. As escalas verticais são apresentadas na legenda de cada oscilograma.



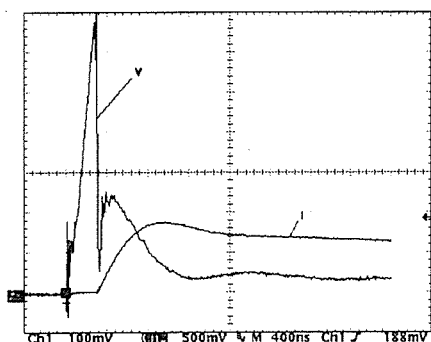
Abaixo apresentamos os oscilogramas obtidos, com o gerador calibrado para tensões a vazio de 1,5 kV , 2 kV, 3 kV e 4 kV.



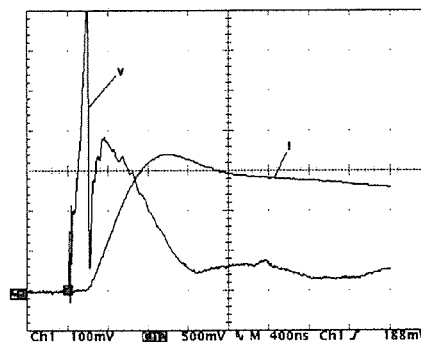
Oscilograma 11-centelhador a gás 250 V - gerador 1,5 kV - 680 v (100V / div) - 60 A ( 50 A / div )



Oscilograma 12-centelhador a gás 250 V - gerador 3 kV - 700 v (100V / div) - 130 A ( 50 A / div )



Oscilograma 13-centelhador a gás 250 V - gerador 2 kV - 690 v (100V / div) - 90 A ( 50 A / div )



Oscilograma 14-centelhador a gás 250 V - gerador 4 kV - 700 v (100V / div)- 170 A ( 50 A / div )

Como característica geral destes quatro oscilogramas podemos observar que independentemente das tensões aplicadas, este dispositivo apresenta uma grande sobretensão residual antes de entrar em operação. O ponto de início da operação é bem claro em todos os oscilogramas, representando uma brusca queda de impedância com o respectivo crescimento da corrente. Após este ponto a tensão de saída se eleva rapidamente até atingir a tensão de grampeamento, sendo em seguida atenuada até



atingir a tensão final de arco ( tensão final de grampeamento ) que apresenta valor bastante reduzido.

A tabela 1 abaixo apresenta uma síntese dos parâmetros mais relevantes obtidos a partir destes oscilogramas.

**Tabela 1**  
**Centelhador à Gás 250 V      Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tempo de Resposta ( $\mu$ s)	0,32	0,24	0,15	0,11
Sobre Tensão Residual (V)	680	690	700	700
Tensão de Grampeamento (V)	200	250	320	390
Tensão Final de Grampeamento (V)	40	50	60	60
Valor máximo da Corrente (A)	60,0	90,0	130,0	170,0
Valor máximo da Corrente ocorrido após o estabelecimento da Tensão Final de Grampeamento (A)	50,0	75,0	120,0	160,0
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de grampeamento (Obs. 1) ( $\Omega$ )	0,80	0,67	0,50	0,38
Fator de "Clamping" (obs. 2)	3,4	2,8	2,2	1,8

obs. 1 : calculada como o quociente entre a tensão final de grampeamento e o valor máximo da corrente ocorrido após o estabelecimento da tensão final de grampeamento.

obs. 2 : quociente entre a sobretensão residual e a tensão de grampeamento

Podemos portanto evidenciar as seguintes conclusões relevantes:

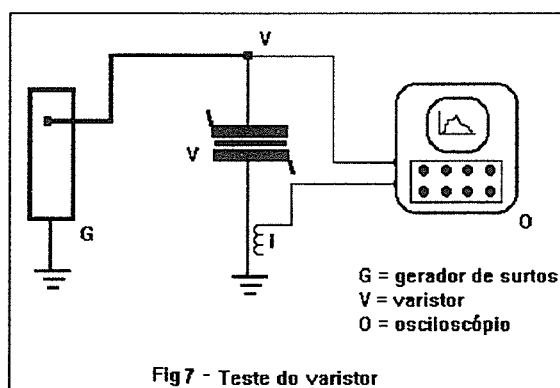
Este dispositivo, apesar de apresentar tensão de grampeamento de 250 V em rampa lenta, apresenta sobretensões residuais muito elevadas quando em operação em transitórios rápidos, atingindo valor de crista de 700 V com o gerador calibrado em 4 kV. Estas sobretensões são aplicadas ao equipamento protegido, podendo danificá-los.

Podemos também verificar, através dos oscilogramas, os tempos de respostas relativamente longos ( $0,32 \mu\text{s}$  a  $0,11 \mu\text{s}$ ) e variáveis com a tensão do gerador, característica esta limitadora destes dispositivos em transitórios rápidos.

Podemos ainda observar que a tensão de grampeamento para esta rampa elétrica, se subdivide em duas partes distintas e consecutivas, denominadas neste trabalho de “tensão de grampeamento” e de “tensão final de grampeamento” respectivamente. A “tensão de grampeamento” é maior que a “tensão final de grampeamento”. O dispositivo atingiu as “tensões finais de grampeamento”, que variaram de 40 V a 60 V, independentemente das tensões de calibração do gerador, depois de transcorridos  $1,2 \mu\text{s}$ .

### 3.1.2 Varistores de Óxido Metálico

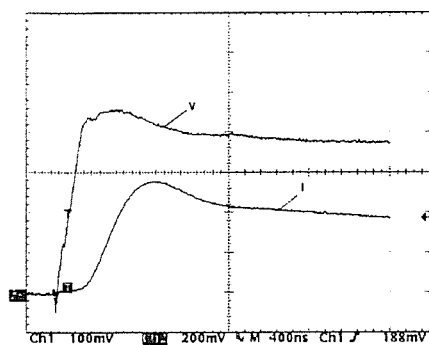
Foi montado o circuito de testes abaixo:



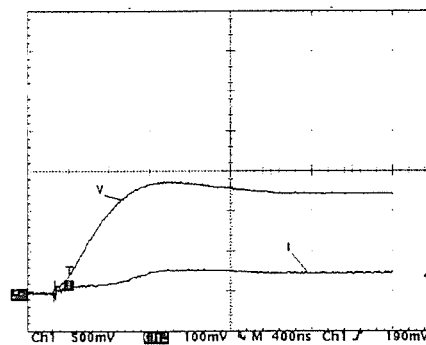
Foram testados três modelos específicos de varistores de baixa capacidade, que amostram os mais utilizados em aplicações eletrônicas a saber:

- Varistor 150 K20 com tensão nominal de 150 V (rms) e pastilha de diâmetro igual a 20 mm;
- Varistor 250 K20 com tensão nominal de 250 V (rms) e pastilha de diâmetro igual a 20 mm;
- Varistor 250 K14 com tensão nominal de 250 V (rms) e pastilha de diâmetro igual a 14 mm

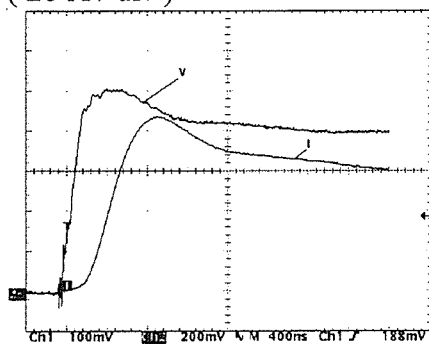
Abaixo apresentamos os resultados obtidos com o gerador calibrado para tensões a vazio de 1 kV , 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV :



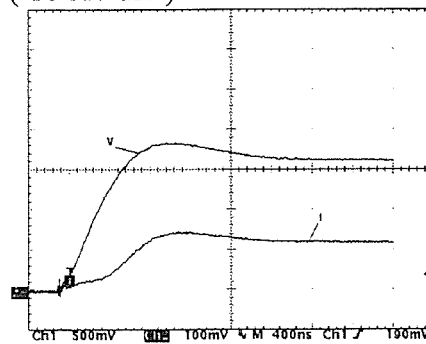
Oscilograma 15-varistor 150k20 - gerador  
1,5 kV - 460 v (100V / div) - 56 A  
(20 A / div)



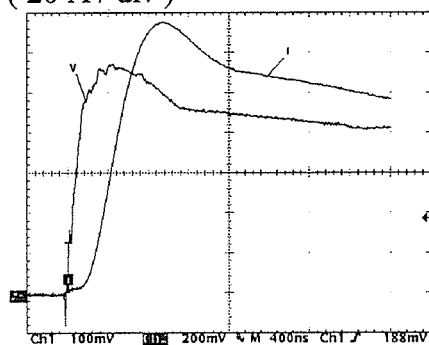
Oscilograma 19-varistor 250k20 - gerador  
1,5 kV - 1,35 kV (500V / div) - 5 A  
(10 A / div)



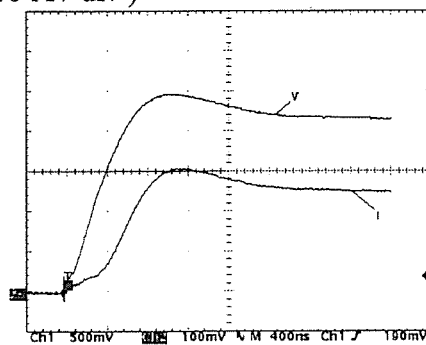
Oscilograma 16-varistor 150k20 - gerador  
2 kV - 500 v (100V / div) - 85 A  
(20 A / div)



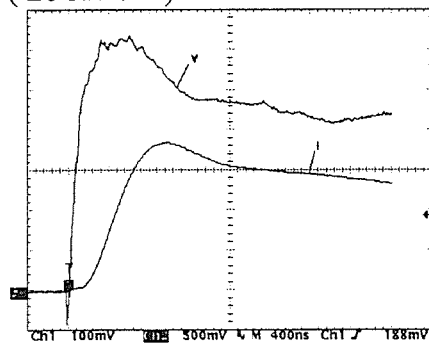
Oscilograma 20-varistor 250k20 - gerador 2  
kV - 1,8 kV (500V / div) - 12 A  
(10 A / div)



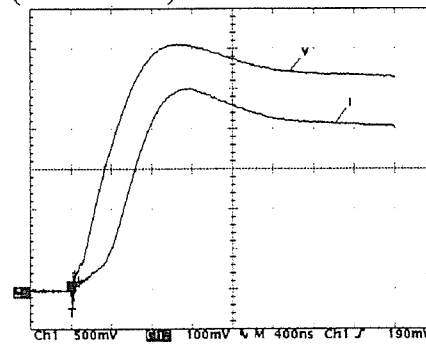
Oscilograma 17-varistor 150k20 - gerador  
3 kV - 560 v (100V / div) - 136 A  
(20 A / div)



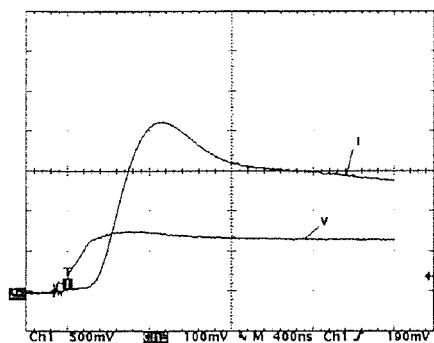
Oscilograma 21-varistor 250k20 - gerador  
3 kV - 2,45 kV (500V / div) - 31 A  
(10 A / div)



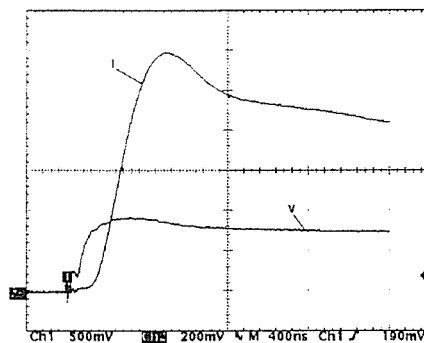
Oscilograma 18-varistor 150k20 - gerador  
4 kV - 620 v (100V / div) - 180 A  
(50 A / div)



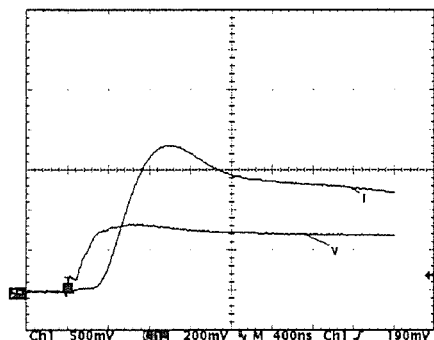
Oscilograma 22-varistor 250k20 - gerador  
4 kV - 3,1 kV (500V / div) - 50 A  
(10 A / div)



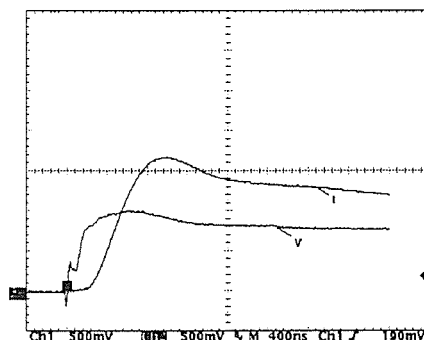
Oscilograma 23-varistor 250k14 - gerador  
1,5 kV - 730 v (500V / div) - 43 A  
(10 A / div)



Oscilograma 25-varistor 250k14 - gerador  
3 kV - 900 v (500V / div) - 120 A  
(10 A / div)



Oscilograma 24-varistor 250k14 - gerador  
2 kV - 800 v (500V / div) - 72 A  
(20 A / div)



Oscilograma 26-varistor 250k14 - gerador  
4 kV - 1 kV (500V / div) - 170 A  
(50 A / div)

Como característica geral destes 12 oscilogramas, podemos verificar que tanto a dinâmica das tensões como a das correntes, se apresentaram sem descontinuidades ou oscilações, como as verificadas nos testes dos centelhadores a gás.

Podemos elaborar as três tabelas seguintes que sintetizam parâmetros mais relevantes destes oscilogramas :

**Tabela 2**  
**Varistor 150 K20                      Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tempo de Resposta ( obs. 1)	—	—	—	—
Tensão de Grampeamento (V)	460	500	560	620
Tensão Final de Grampeamento (V)	400	420	460	480
Valor Máximo da Corrente (A)	56,0	85,0	136,0	180,0
Valor da Corrente no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de Grampeamento (A)	50,0	84,0	132,0	175,0
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de Grampeamento (obs 2) ( $\Omega$ )	8,0	5,0	3,5	2,7

obs 1 : imperceptível nestes testes ( tempo de resposta muito rápido )

obs2 : calculada como o quociente entre a tensão final de grampeamento e a corrente no ponto do estabelecimento da tensão final de grampeamento

**Tabela 3**  
**Varistor 250 K20                      Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tempo de Resposta (obs 1)	—	—	—	—
Tensão de Grampeamento (kV)	1,35	1,80	2,45	3,10
Tensão Final de Grampeamento (kV)	1,25	1,65	2,25	2,75
Valor máximo da Corrente (A)	5,0	12,0	31,0	50,0
Valor da Corrente no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de Grampeamento (A)	5,0	11,0	26,0	41,0
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de Grampeamento (obs 2) ( $\Omega$ )	250,0	150,0	86,0	67,1

obs 1 : imperceptível nestes testes ( tempo de resposta muito rápido )

obs2 : calculada como o quociente entre a tensão final de grampeamento e a corrente no ponto do estabelecimento da tensão final de grampeamento

**Tabela 4**  
**Varistor 250 K14                      Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tempo de Resposta (os 1)	—	—	—	—
Tensão de Grampeamento (V)	730	800	900	1000
Tensão Final de Grampeamento (V)	670	710	800	810
Valor máximo da Corrente (A)	43,0	72,0	120,0	170,0
Valor da Corrente no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de Grampeamento (A)	32,0	55,0	110,0	160,0
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de grampeamento (obs 2) ( $\Omega$ )	27,6	12,9	7,3	5,1

obs. 1 : imperceptível nestes testes ( tempo de resposta muito rápido )

obs. 2 : calculada como o quociente entre a tensão final de grampeamento e a corrente no ponto do estabelecimento da tensão final de grampeamento

A partir da análise dos oscilogramas e comparação dos valores transcritos nas tabelas 2, 3 e 4 podemos sintetizar as seguintes conclusões:

Todos os três varistores testados apresentaram tensões de grampeamento e tensões finais de grampeamento muito acima dos valores especificados pelo fabricante, devido à limitação de corrente de curto-circuito do gerador (aproximadamente 200 A, quando calibrado em aberto para 4 KV) e às características "V x I" destes componentes. Assim, conforme "Tabela 2" o varistor "150 K20", apropriado para operar em linhas de alimentação em corrente alternada com tensão eficaz de 150 V, ou de 213 V de crista,



operou com tensões de grampeamento de 460 V, 500 V, 560 V e 620 V respectivamente para impulsos de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV.

Os valores de tensão de grampeamento cresceram ainda em valores absolutos e relativos com os testes aplicados ao varistor “250 K20”, que passaram a ser, conforme “Tabela 3” de 1,35 kV, 1,8 kV, 2,45 kV e 3,1 kV respectivamente para impulso de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV. Este componente é utilizado em linhas de alimentação com tensão eficaz de 250 V ou de 355 V de crista.

Mudando-se o varistor para o modelo “250 K14”, conforme dados apresentados na “Tabela 4”, encontramos tensões de grampeamento de 730 V, 800 V, 900 V e 1 kV para as mesmas tensões de impulso do gerador. Este componente, possui tensão de trabalho, idêntica à do modelo 250 K20, já analisado, mudando apenas o diâmetro da pastilha e conseqüentemente a corrente máxima permitida de condução. Comparando este parâmetro destes dois últimos componentes temos a “Tabela 5” abaixo:

**Tabela 5**  
**COMPARAÇÃO DAS TENSÕES DE GRAMPEAMENTO**

Varistor	Tensão do Gerador (kV)			
	1,5	2	3	4
250 K20 (kV)	1,35	1,80	2,45	3,10
250 K14 (V)	730 (46%)*	800 (56%)*	900 (63%)*	1000 (68%)*

\* - percentual de decréscimo das tensões de grampeamento

A tabela mostra que mesmo mantendo-se a tensão nominal do varistor, o aumento de sua capacidade de condução de corrente ( diâmetro da pastilha ) afeta sensivelmente sua tensão de grampeamento .

Esta tendência pode também ser verificada ao analisarmos os parâmetros “impedância no ponto do estabelecimento da tensão de grampeamento ou da tensão final de grampeamento”, transpostos para a “Tabela 6”, abaixo:

**Tabela 6**  
**COMPARAÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS NOS PONTOS DO ESTABELECIMENTO DAS TENSÕES FINAIS DE GRAMPEAMENTO**

Varistor	Tensão do Gerador (kV)			
	1,5	2	3	4
250 K20 ( $\Omega$ )	250,0	150,0	86,0	67,1
250 K14 ( $\Omega$ )	27,6 (89%)*	12,9 (91%)*	7,3 (92%)*	5,1 (92%)*

\* - percentual de decréscimo das impedâncias

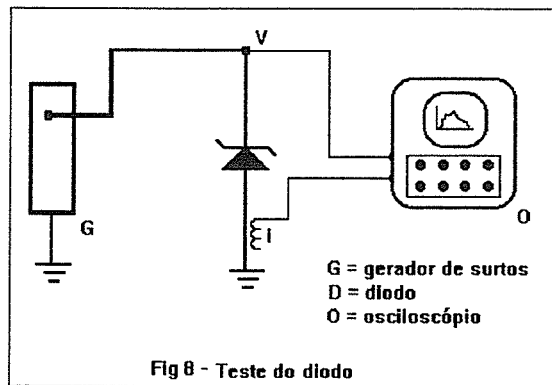
Analisando-se as potências de crista máxima a que são submetidas estes componentes neste teste, com base no oscilograma 26 (varistor 250 K14 e gerador calibrado em 4 KV) verificamos que a função potência ( $V \times I$ ) terá seu máximo em 800 ns e será de aproximadamente de “1 kV x 160 A = 160 kW”.

Quanto à energia total típica dissipada pelo varistor neste teste, utilizando-se o mesmo oscilograma e considerando-se uma potência média de “800 V x 100 A = 80 kW” durante

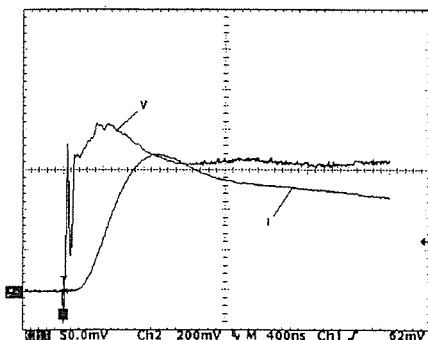
um período de condução do componente de aproximadamente  $80 \mu\text{s}$ , teremos uma energia total dissipada " $80 \text{ KW} \times 80 \mu\text{S} = 6,4 \text{ J}$ ", muito pequena se comparada com a capacidade da pastilha.

### 3.1.3 Diodos de Avalanche Rápidos

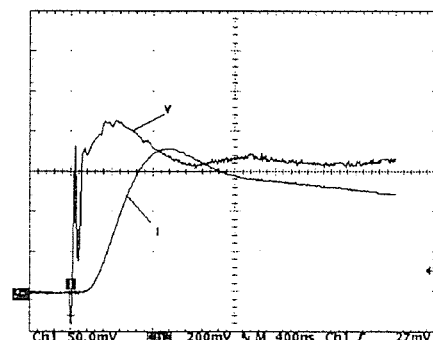
Foi montado o circuito de testes abaixo:



Foi testado o diodo "transzorb" da GSI modelo 1,5 KE 130 CA, obtendo-se curvas de tensão e corrente. O dispositivo suportou tensão máxima de 2 kV de crista ( entrou em curto em testes acima de 2 kV ), apresentando os oscilogramas 27 e 28 abaixo:



Oscilograma 27-diodo 1,5 KE 130 CA - gerador 1,5 kV - 210v (50V / div) - 68 A ( 20 A / div )



Oscilograma 28-diodo 1,5 KE 130 CA - gerador 2 kV - 215v (50V / div) - 74 A ( 20 A / div )

Como característica geral destes oscilogramas podemos verificar na forma de onda da tensão uma pequena oscilação no início, que coincide com o início da condução do componente, oscilação esta cujo valor de crista não ultrapassou a "tensão de grampeamento". A forma de onda de corrente é totalmente regular e sem descontinuidades.

A "Tabela 7" abaixo sintetiza os principais parâmetros retirados dos oscilogramas:

**Tabela 7**  
**Diodo de Avalanche GSI 1,5 KE 130 CA**  
**Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2
Tempo de Resposta (obs 1)	—	—
Tensão de Grampeamento (V)	210	215
Tensão Final de Grampeamento (V)	160	160
Valor máximo da Corrente (A)	68	74
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de Grampeamento (obs 2) ( $\Omega$ )	2,5	2,4

obs. 1 : imperceptível nestes testes ( tempo de resposta muito rápido )

obs. 2 : : calculada como o quociente entre a tensão final de grampeamento e o valor máximo da corrente.

Dos dados apresentados, podemos concluir o seguinte:

O dispositivo não apresenta tempo de resposta visível devido à baixa taxa de crescimento do impulso se comparado aos cerca de 1 ns necessários para operação do diodo.

Verificamos também uma pequena variação na tensão de grampeamento ( 5 V ) quando mudamos a tensão do gerador de 1,5 KV para 2 KV, e nenhuma mudança na tensão final de grampeamento, que ficou estabilizada em 160 V. Pela especificação deste componente, esta tensão deveria ser de 130 V. O acréscimo de 30 V se deve à impedância interna do diodo em condução e à baixa impedância do gerador de impulsos que apresenta corrente de curto-circuito, quando calibrado em 4 KV, de 200 A de crista.

As impedâncias internas, obtidas pelos quocientes entre valores de tensão final de grampeamento e corrente apresentados nos oscilogramas foram de 2,5  $\Omega$  e 2,4  $\Omega$  respectivamente para 1,5 kV e 2 kV de tensão em aberto do gerador, muito menores que as obtidas no varistor 250 K14 ( ver tabela 6 ), mostrando ser este dispositivo mais apropriado para aplicações em transitórios com valores limitados de corrente, como os que ocorrem nos fenômenos de indução em linhas longas, onde as impedâncias características próprias das linhas participam totalmente ou parcialmente na condução do fenômeno.

A potência máxima suportada pelo dispositivo testado, pode ser avaliada através do oscilograma 28, no tempo de 800 ns, que seria de "170 V x 74 A = 12,6 kW".

Considerando-se uma tensão média de grampeamento de 150 V e uma corrente média de condução de aproximadamente 40 A, e, conseqüentemente uma potência média de

“ $150\text{ V} \times 40\text{ A} = 6\text{ kW}$ ”, e um período de condução de  $80\ \mu\text{S}$ , teremos uma energia total dissipada de “ $6\text{ kW} \times 80\ \mu\text{S} = 0,48\text{ J}$ ”.

### **3.1.4 Configurações Híbridas**

Analisando-se os resultados obtidos nos testes dos componentes de forma isolada podemos montar a tabela 8 abaixo que apresenta as principais características boas e ruins de cada um.

**Tabela 8**  
**Comparação entre Componentes**

	Centelhador a Gás 250 V Tensão Gerador = 4 KV	Varistor 250 K14 Tensão Gerador = 4 KV	Diodo 1,5 KE 130 CA Tensão do Gerador = 2 kV
Tempo de Resposta ( $\mu$ s)	<u>Ruim</u> 0,11	<u>Bom</u> Imperceptível	<u>Bom</u> Imperceptível
Tensão de Grampeamento (V)	<u>Bom</u> 390	<u>Ruim</u> 810	<u>Bom</u> 160
Sobretensão Residual (V)	<u>Ruim</u> 700	<u>Bom</u> Imperceptível	<u>Bom</u> Imperceptível
Relação Sobretensão Residual/ Tensão Grampeamento	<u>Ruim</u> $\frac{700}{390} = 1,8$	<u>Bom</u> $\frac{810}{810} = 1$	<u>Bom</u> $\frac{215}{215} = 1$
Relação Tensão de Grampeamento /Tensão Final de Grampeamento	<u>Ruim</u> $\frac{390}{60} = 6,5$	<u>Bom</u> $\frac{1000}{810} = 1,23$	<u>Bom</u> $\frac{215}{160} = 1,34$
Máxima Tensão Suportada de Calibração do Gerador (obs 1) (kV)	<u>Bom</u> 4	<u>Bom</u> 4	<u>Ruim</u> 2

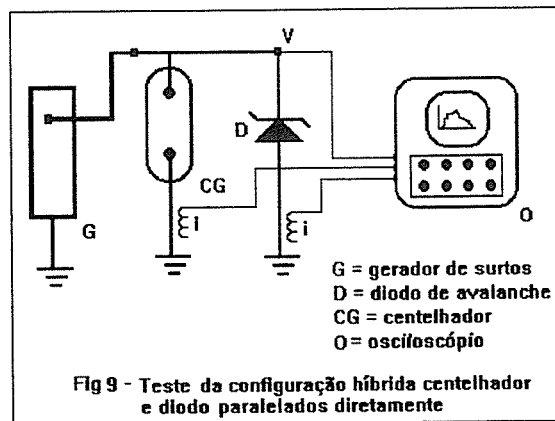
obs. 1 : limitada pela máxima tensão do gerador de testes (4kV).

À exceção do parâmetro “máxima tensão suportada de calibração do gerador”, o diodo foi o componente que no conjunto apresentou os melhores resultados.

O ideal portanto seria um dispositivo de proteção que possuísse todas as características do diodo, somadas às capacidades energéticas e de condução de corrente dos dispositivos centelhadores a gás ou varistores, ensejando a utilização de protetores híbridos, conforme configurações abaixo testadas:

### 3.1.4.1 Associação em Paralelo de Diodo e Centelhador a Gás

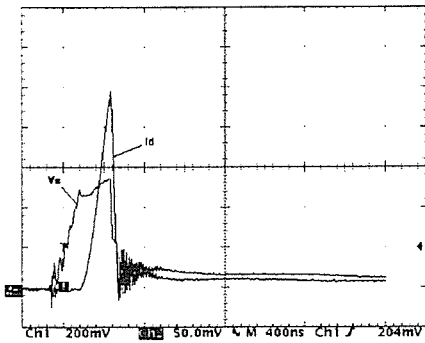
Foi montado o circuito de testes abaixo:



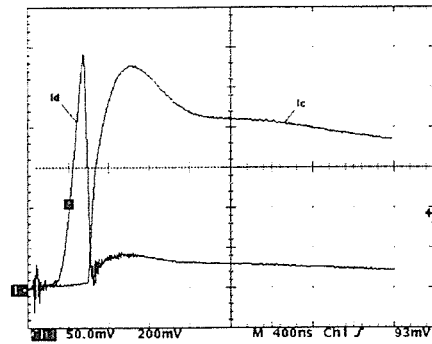
A tensão impulsiva necessária para se iniciar a condução do centelhador a gás (sobretensão residual) é muito alta, motivo pelo qual a tensão de operação do diodo deverá, para esta configuração ser suficiente grande para não inibir a operação do centelhador.

Foram utilizados para estes testes a configuração em paralelo do diodo 1,5 KE 400 CA (tensão nominal de grampeamento de 400 v) e do centelhador a gás de 250 V, obtendo-se os oscilogramas abaixo:

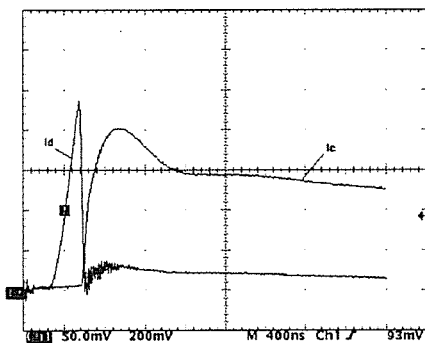




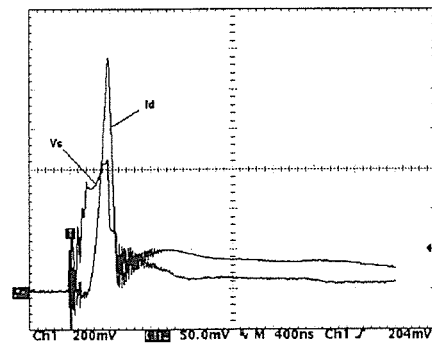
Oscilograma 29-centelhador 250 v em paralelo com diodo 1,5 KE 400 CA - gerador 1,5 kV - tensão de saída 550v (200V / div) - corrente no diodo 25 A (5 A / div)



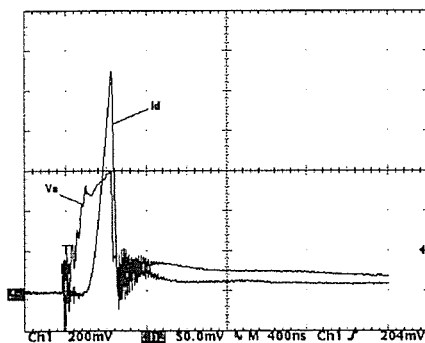
Oscilograma 32-centelhador 250 v em paralelo com diodo 1,5 KE 400 CA - gerador 2 kV - corrente no centelhador 110 A (20A / div) - corrente no diodo 29 A (5 A / div)



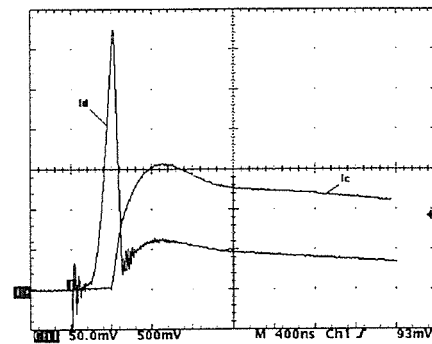
Oscilograma 30-centelhador 250 v em paralelo com diodo 1,5 KE 400 CA - gerador 1,5 kV - corrente no centelhador 79 A (20A / div) - corrente no diodo 24 A (5 A / div)



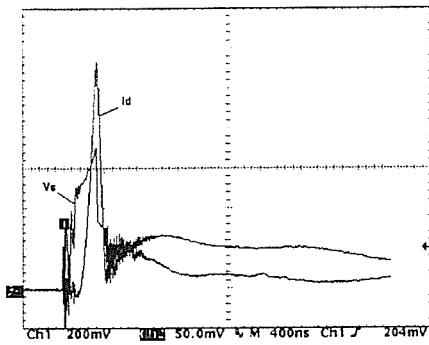
Oscilograma 33-centelhador 250 v em paralelo com diodo 1,5 KE 400 CA - gerador 3 kV - tensão de saída 640v (200V / div) - corrente no diodo 29 A (5 A / div)



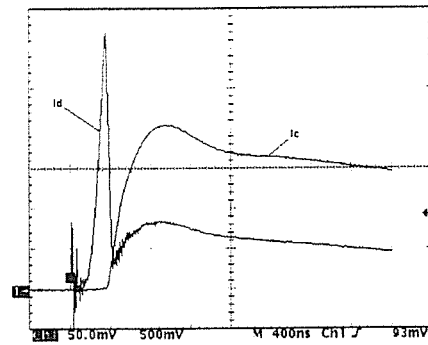
Oscilograma 31-centelhador 250 v em paralelo com diodo 1,5 KE 400 CA - gerador 2 kV - tensão de saída 600v (200V / div) - corrente no diodo 27 A (5 A / div)



Oscilograma 34-centelhador 250 v em paralelo com diodo 1,5 KE 400 CA - gerador 3 kV - corrente no centelhador 160 A (50A / div) - corrente no diodo 32 A (5 A / div)



Oscilograma 35-centelhador 2500 v em paralelo com diodo 1,5 KE 400 CA - gerador 4 kV - tensão de saída 690v (200V / div) - corrente no diodo 29 A (5 A / div)



Oscilograma 36-centelhador 250 v em paralelo com diodo 1,5 KE 400 CA - gerador 4 kV - corrente no centelhador 200 A (50A / div) - corrente no diodo 32 A (5 A / div)

As discrepâncias entre valores de crista das correntes nos diodos verificadas entre os oscilogramas 29 e 30, 31 e 32, 33 e 34 e, 35 e 36 se devem ao processo de “trigger” utilizado nas medições feitas com o osciloscópio. Nestes quatro últimos testes o “trigger” foi obtido a partir do sinal de corrente do centelhador, tendo sido incorporado entre o seu terminal terra e o gerador o arranjo amostrador apresentado no capítulo 2 deste trabalho. Este procedimento acarretou no aumento da impedância da conexão centelhador / terra, e na maior solicitação de corrente no circuito diodo / terra. Portanto, as formas de onda mais fieis de corrente no diodo são as contidas nos oscilogramas 29, 31, 33 e 35. Os outros quatro oscilogramas obtidos são úteis para se verificar a coordenação de condução entre os 2 estágios.

Analisando estes oscilogramas, podemos sintetizar os principais parâmetros na tabela 9 abaixo:

**Tabela 9**  
**Configuração Híbrida - Centelhador 250 V/Diodo 1,5 KE 400 CA**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	550	600	640	690
Tensão Final de Grampeamento (V)	40	40	44	60
Valor máximo de Corrente no Diodo (A)	24	27	29	29
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	79	110	160	200
Potência Máxima Dissipada pelo Diodo (kW)	13,2	16,2	18,6	20,0

Podemos tirar as seguintes conclusões:

As tensões de grampeamento variaram na faixa de 550 V a 690, garantidas pelo diodo (segundo estágio).

As tensões finais de grampeamento, que variam de 40 V a 60 V foram garantidas pelo centelhador a gás (primeiro estágio).

A entrada em operação do centelhador garantiu correntes máximas nos diodos de 24 A a 29 A (mantendo este último valor invariável para gerador calibrado em 3 kV e 4 kV).

A potência de pico máxima no diodo foi de 20 kW para tensão de impulso de 4 kV.

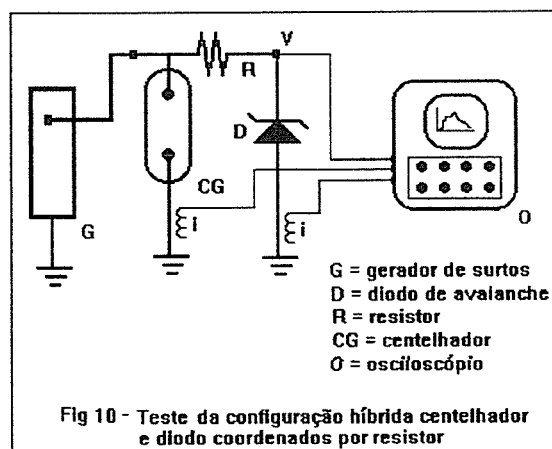
Podemos também verificar que a corrente máxima do centelhador a gás, obtida com o gerador calibrado para 4 KV, foi praticamente a corrente de curto circuito do gerador (200 A).

Analisando-se os oscilogramas de corrente do centelhador e diodo ( oscilogramas 30, 32, 34 e 36 ) podemos verificar a coordenação de condução dos mesmos.

Os retardos entre o instante do início da condução do centelhador a gás e diodo foram de aproximadamente 400 ns, 380 ns, 240 ns e 200 ns respectivamente para 1,5 KV , 2 KV, 3 KV e 4 KV. Este fato ocorreu devido à aceleração do processo de disrupção do centelhador em função da maior taxa de crescimento de tensão do gerador.

### 3.1.4.2 Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor

Foi montado o circuito de testes abaixo:



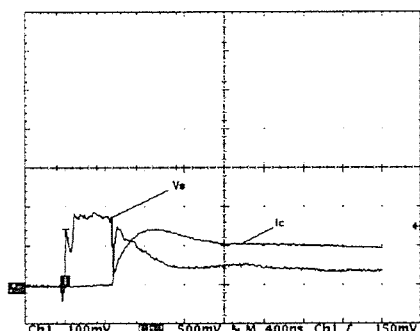
Como vimos no item 3.1.4.1 deste trabalho, o paralelismo direto de diodo e centelhador limita a tensão de grampeamento a valores relativamente altos, devido às características do centelhador a gás. Desta forma, para conseguirmos tensões de grampeamento menores, torna-se necessário a introdução de uma rede de coordenação entre os dispositivos, sendo a mais simples delas, a rede resistiva.

Os oscilogramas seguintes, apresentam os resultados dos testes em que foram coordenados, através de resistor de  $18 \Omega$ , centelhador a gás de 250 V / 10 kA e diodo 1,5 KE 130 CA com tensão de grampeamento de 130 V.

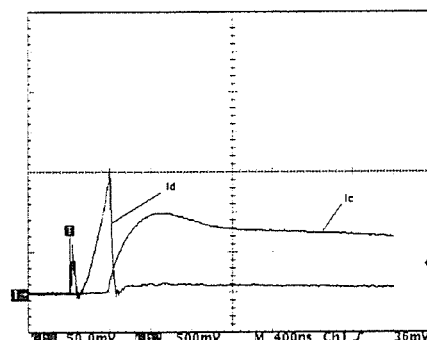
A escolha para esta configuração de um diodo de tensão de grampeamento de 130 V, se deve à existência, em grande quantidade dos circuitos telefônicos, de “tensões de ring”, com função de sinalização, de até 120 Vpp em 20 Hz. Este sinal de “Ring” não deverá acionar o dispositivo protetor, o que ocorreria caso a tensão de grampeamento deste dispositivo fosse menor que este valor.

Quando ao resistor de coordenação, o critério adotado foi o de se utilizar um cujo valor que fosse grande o suficiente para limitar efetivamente a corrente no diodo e baixo o suficiente para não introduzir atenuações significativas no sinal telefônico ou de dados. Optou-se então pelo valor de  $18 \Omega$ , para fins de aplicação dos testes.

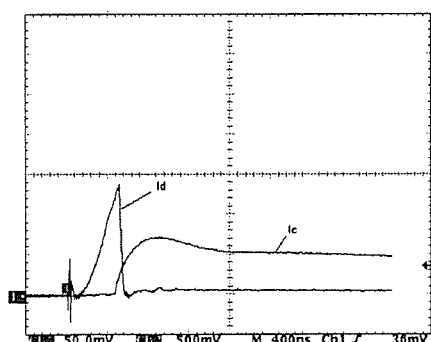
Foram obtidos os oscilogramas abaixo:



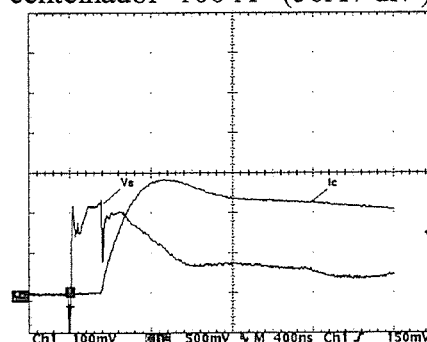
Oscilograma 37-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 1,5 kV - tensão de saída 180 V ( 100 V / div ) - corrente no centelhador 70 A ( 50A / div )



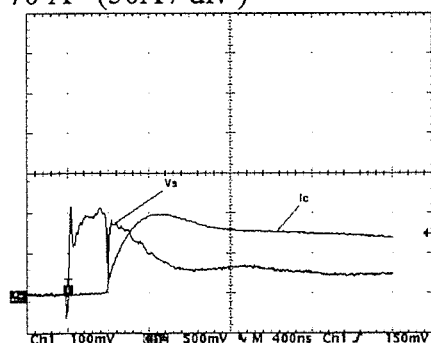
Oscilograma 40-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 2 kV - corrente no diodo 15A ( 5A / div )- corrente no centelhador 100 A ( 50A / div )



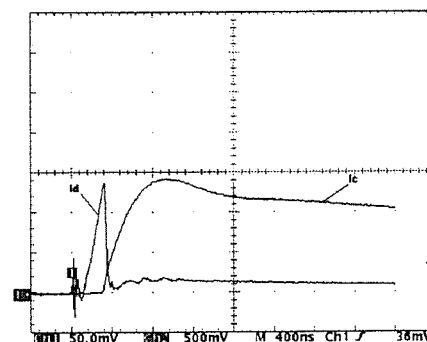
Oscilograma 38-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 1,5 corrente no diodo 14A ( 5A / div )- corrente no centelhador 70 A ( 50A / div )



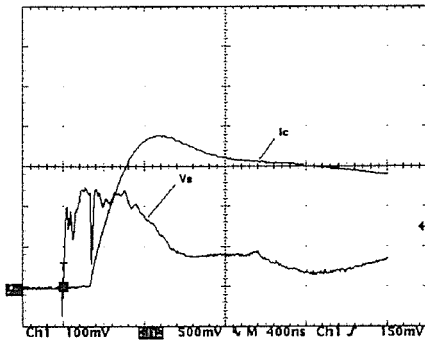
Oscilograma 41-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 3 kV - tensão de saída 230 V ( 100 V / div ) - corrente no centelhador 140 A ( 50A / div )



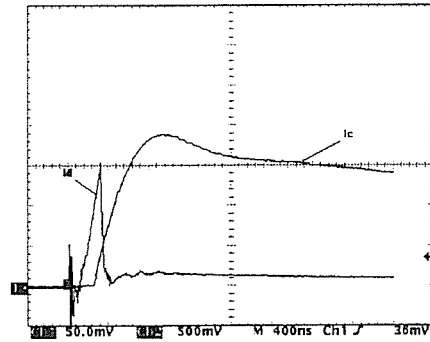
Oscilograma 39-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 2 kV - tensão de saída 210 V ( 100 V / div ) - corrente no centelhador 100 A ( 50A / div )



Oscilograma 42-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 3 kV - corrente no diodo 14A ( 5A / div )- corrente no centelhador 140 A ( 50A / div )



Oscilograma 43-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 4 kV - tensão de saída 250 V ( 100 V / div ) - corrente no centelhador 190 A ( 50A / div )



Oscilograma 44-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 4 kV - corrente no diodo 15A ( 5A / div )- corrente no centelhador 190 A ( 50A / div )

A tabela 10 abaixo sintetiza os principais parâmetros retirados destes oscilogramas:

**Tabela 10**  
**Configuração Híbrida - Centelhador 250 V/Diodo 1,5 KE 130 CA**  
**Coordenados por Resistor de  $18\Omega$**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	180	210	230	250
Tensão Final de Grampeamento (V)	40	40	40	60
Valor máximo de Corrente no Diodo (A)	14	15	14	15
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	70	100	140	190
Potência Máxima Dissipada pelo Diodo (KW)	2,5	3,2	3,2	3,8

Podemos formular as seguintes observações sobre os dados obtidos:

As tensões de grampeamento obtidas variaram de 180 V a 250 V, valores substancialmente menores que as obtidas na configuração estudada em “3.1.4.1” (diodo e centelhador em paralelo direto).

Mais uma vez a baixa tensão de arco do centelhador garantiu valores muito baixos de tensões finais de grampeamento.

A coordenação entre os estágios, garantiu praticamente a mesma corrente de crista circulando pelo diodo (valores de 14 A e 15 A) mesmo com a variação da tensão em aberto do gerador, em função da impedância “shunt” muito baixa inserida pelo centelhador, após o seu disparo. Dito de outra forma, o centelhador “protegeu” o diodo de forma conveniente.

Este fato, garantiu potências de pico no diodo relativamente baixas e sem grandes variações ( potências de 2,5 kW, 3,2 kW, 3,2 kW e 3,8 kW respectivamente para tensões em aberto do gerador de 1,5 kV , 2 kV , 3 kV e 4 kV .

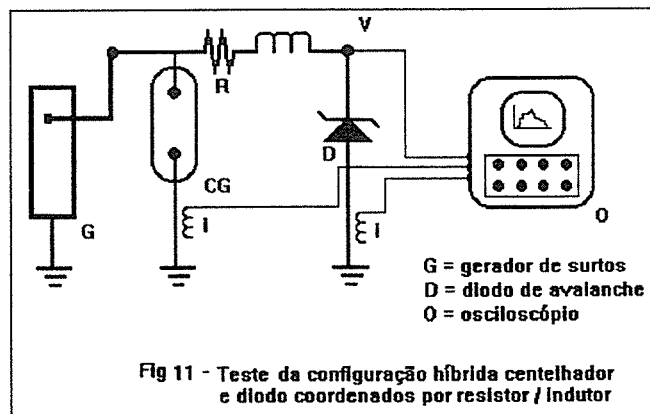
Analisando a forma de onda da tensão de grampeamento, podemos notar duas fases distintas, sendo a primeira estável no nível da tensão de grampeamento, proporcionada pelo diodo, com uma brusca queda no instante do início da condução do centelhador a gás e a segunda, com o centelhador em plena condução, proporcionando uma forma estável e decrescente até atingir a tensão final de grampeamento.



Observando-se os oscilogramas de corrente no centelhador e diodo ( oscilogramas 38, 40, 42 e 44) verificamos claramente o início imediato de condução do diodo, tão logo a tensão do gerador atinge aproximadamente 130 V e o crescimento desta corrente, que atinge o valor de crista no exato instante do início de condução do centelhador. A partir deste ponto a corrente no diodo decresce rapidamente, podendo ser notado um período de tempo muito pequeno (em torno de 80 ns, para todas as tensões de teste) em que os dois dispositivos conduzem simultaneamente.

### 3.1.4.3 Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor e Indutor em Série

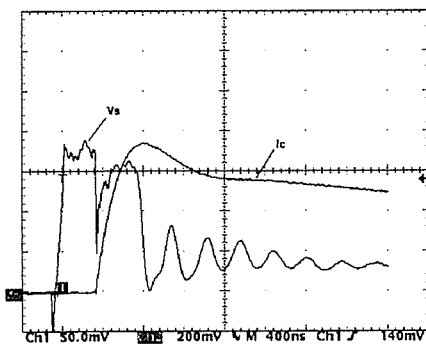
Foi montado o circuito de testes abaixo:



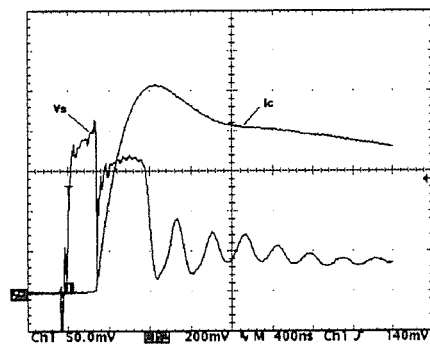
Dadas às altas taxas de crescimento de tensões e correntes providas por este gerador, foi introduzido para fins de comparação dos resultados com os obtidos na topologia descrita no item “3.1.4.2” deste trabalho, um indutor de 10  $\mu\text{H}$  em série com o resistor de 18  $\Omega$ .

Como desvantagem funcional, este procedimento limita consideravelmente a “banda de frequências passante” do dispositivo, criando-se um filtro do tipo “passa baixa” formado pelo indutor introduzido e pela capacitância parasita do diodo. Entretanto, para linhas telefônicas convencionais de banda passante limitada (4 kHz) ou mesmo para linhas de dados de baixa velocidade, esta degradação não inviabiliza o meio de transmissão, podendo esta configuração ser utilizada, caso a introdução deste indutor traga melhorias apreciáveis no desempenho da nova configuração testada.

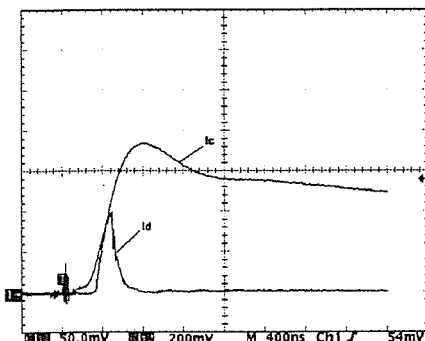
Abaixo apresentamos os oscilogramas obtidos:



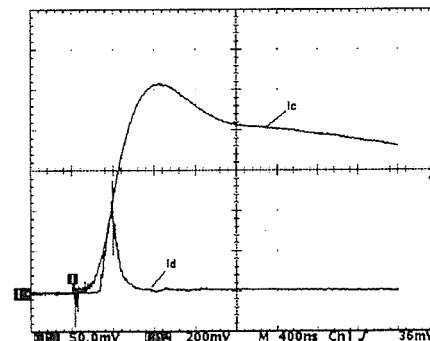
Oscilograma 45-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 1,5 kV - tensão de saída 185 V ( 50 V / div ) - corrente no centelhador 76 A ( 20A / div )



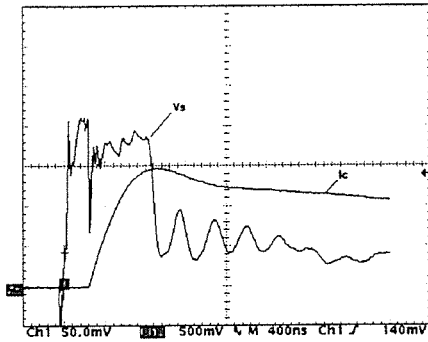
Oscilograma 47-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 2 kV - tensão de saída 210 V ( 50 V / div ) - corrente no centelhador 104 A ( 20A / div )



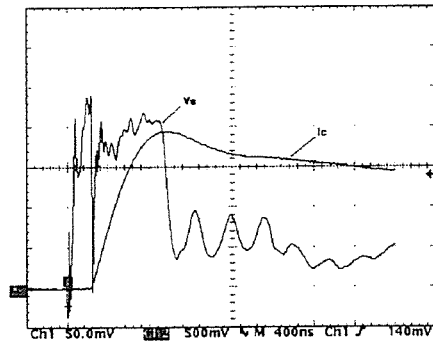
Oscilograma 46-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 1,5 kV - corrente no diodo 10A ( 5A / div )- corrente no centelhador 76 A ( 20A / div )



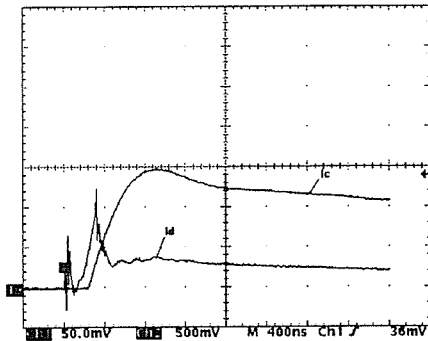
Oscilograma 48-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 2 kV - corrente no diodo 10A ( 5A / div )- corrente no centelhador 104 A ( 20A / div )



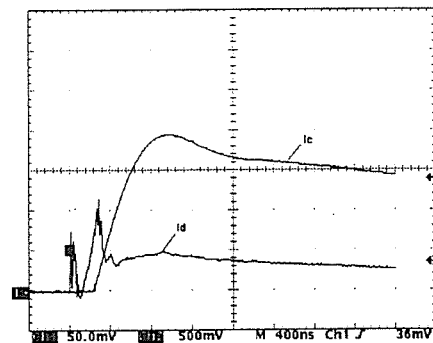
Oscilograma 49-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 3 kV - tensão de saída 215 V ( 50 V / div ) - corrente no centelhador 145 A ( 50A / div )



Oscilograma 51-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 4 kV - tensão de saída 240 V ( 50 V / div ) - corrente no centelhador 190 A ( 50A / div )



Oscilograma 50-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 3 kV - corrente no diodo 12A ( 5A / div )- corrente no centelhador 145 A ( 50A / div )



Oscilograma 52-centelhador 250 v e diodo 1,5 KE 130 CA coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 4 kV - corrente no diodo 11A ( 5A / div )- corrente no centelhador 190 A ( 50A / div )

Podemos tabelar os resultados obtidos conforme abaixo:

**Tabela 11**  
**Configuração Híbrida - Centelhador 250 V/Diodo 1,5 KE 130 CA**  
**Coordenados por Resistor de 18  $\Omega$  e Indutor de 10  $\mu$ H**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	185	210	215	240
Tensão Final de Grampeamento (V)	40	40	40	50
Valor máximo de Corrente no Diodo (A)	10	10	12	11
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	76	104	145	195
Potência Máxima Dissipada pelo Diodo (kW)	1,7	1,7	2,1	2,2

Comparando-se os dados da tabela 11 com os da tabela 10 ( mesma configuração, porem sem o indutor série ), podemos concluir o seguinte.

As tensões de grampeamento ficaram praticamente inalteradas, notando-se para uma tensão de gerador a vazio de 4 KV uma redução de 10 V (250 V - 240 V), ou de 4%, sobre a tensão obtida na configuração sem indutor.

As tensões finais de grampeamento permaneceram também praticamente inalteradas.

Podemos notar ainda a ocorrência de tensão oscilatória senoidal amortecida, de freqüência aproximada de 2,8 MHz no intervalo de tempo entre o fim da tensão de grampeamento e o estabelecimento da tensão final de grampeamento devido à ressonância da indutância incorporada com as capacitâncias parasitas do circuito.

Entretanto, os valores de crista destas oscilações, que atingiram 75 V, 80 V, 100 V e 100 V, respectivamente para tensões de gerador de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV, não são considerados críticos na avaliação da proteção pois eles só ocorrem após o “stress” provocado no equipamento protegido pela tensão de grampeamento, de valor consideravelmente maior.

Os valores máximos de corrente no diodo sofreram reduções consideráveis sendo esta redução de 4 A ou 29% para tensão de gerador calibrado para 1,5 KV e de 4 A ou de 27% para tensão de gerador calibrado para 4 KV, fenômeno este explicável devido ao amortecimento causado pelo indutor.

Quanto às correntes máximas no centelhador, esta configuração provocou um ligeiro acréscimo de valores, sendo de 6 A ou 9% para gerador calibrado em 4 KV, fato este causado pelo aumento da impedância em série com o diodo causado pelo mesmo indutor.

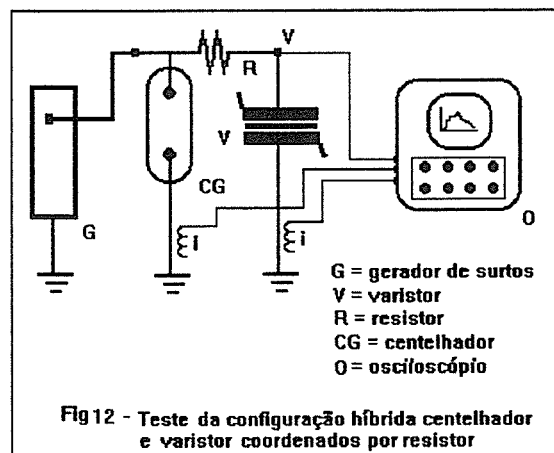
Como consequência da colocação do indutor, houve considerável redução das potências de crista dissipadas pelo diodo, a saber : 800 W ou 32% para gerador calibrado para 1,5 KV, 1500 W ou 47% para gerador calibrado para 2 KV, 1100 W ou 34% para gerador calibrado para 3 KV e 1600 W ou 42% para gerador calibrado para 4 KV.

Estas significativas reduções de potências de crista, mostram sem nenhuma dúvida o aumento da capacidade do dispositivo híbrido para manipulação transitórios de grandes intensidades proporcionado pela utilização do indutor, indicando benefício pelo seu uso. Entretanto, para o teste executado (com tensão de gerador limitada a 4 kV), e

tomando-se por base os resultados descritos no item 3.1.3, no qual o diodo testado de forma isolada suportou uma potência de crista de aproximadamente 12,6 KW, não se torna mandatória a sua utilização, evitando-se a já comentada limitação de banda passante.

#### 3.1.4.4 Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor

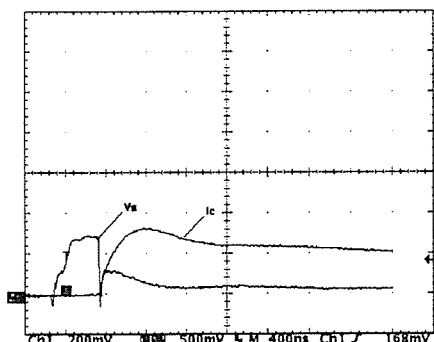
Foi montado o circuito de testes abaixo:



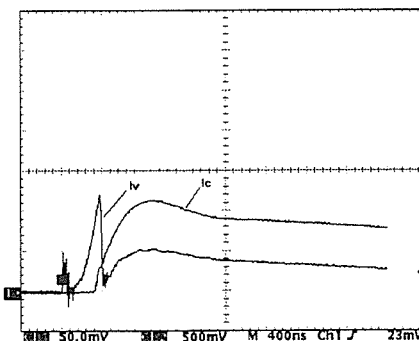
Nesta topologia, o diodo da configuração descrita no item 3.1.4.2 foi substituído pelo varistor 95 K10 de pequena capacidade.

Esta configuração, trás de imediato duas degradações, quando comparada à do item 3.1.4.2, a saber: limitação da banda passante ocasionada pela grande capacitância parasita do varistor e introdução de ruído elétrico degradando o sinal útil devido à corrente fuga do varistor ocasionada pela tensão de 48 Vcc normalmente presente entre os condutores das linhas telefônicas.

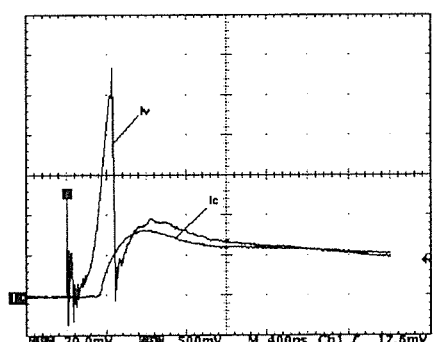
Entretanto, face a redução de custos conseguida com a substituição dos componentes ( varistor x centelhador a gás ), esta topologia pode se mostrar atraente. Abaixo apresentamos os oscilogramas conseguidos nos testes realizados:



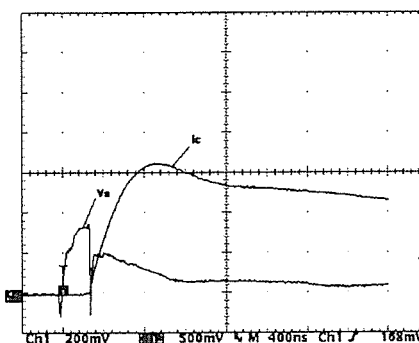
Oscilograma 53-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 1,5 kV - tensão de saída 280 V ( 200 V / div ) - corrente no centelhador 80A ( 50A / div )



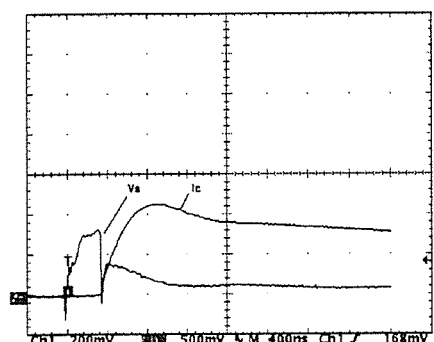
Oscilograma 56-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 2 kV - corrente no varistor 12A ( 5A / div )- corrente no centelhador 120 A ( 50A / div )



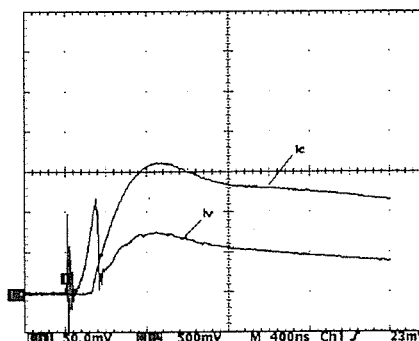
Oscilograma 54-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 1,5 kV - corrente no varistor 11A ( 2A / div )- corrente no centelhador 80 A ( 50A / div )



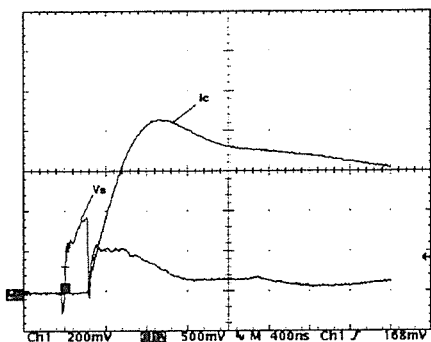
Oscilograma 57-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 3 kV - tensão de saída 320 V ( 200 V / div ) - corrente no centelhador 160A ( 50A / div )



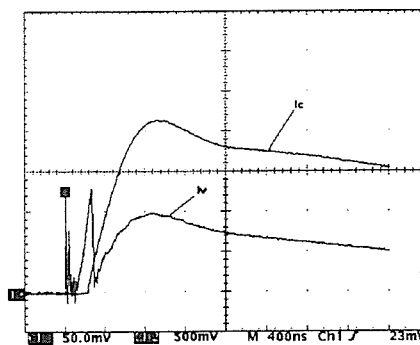
Oscilograma 55-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 2 kV - tensão de saída 320 V ( 200 V / div ) - corrente no centelhador 115A ( 50A / div )



Oscilograma 58-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 3 kV - corrente no varistor 12A ( 5A / div )- corrente no centelhador 165 A ( 50A / div )



Oscilograma 59-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 4 kV - tensão de saída 360 V ( 200 V / div ) - corrente no centelhador 215A (50A / div)



Oscilograma 60-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  - gerador 4 kV - corrente no varistor 13A ( 5A / div )- corrente no centelhador 215 A (50A / div)

Apresentamos na tabela 10 a síntese dos resultados obtidos:

**Tabela 12**  
**Configuração Híbrida - Varistor 95 K10/Centelhador 150 V**  
**Coordenados por Resistor de  $18\Omega$**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	280	320	320	360
Tensão Final de Grampeamento (V)	40	40	45	50
Valor máximo de Corrente no Díodo (A)	11	12	12	13
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	80	120	165	215
Potência Máxima Dissipada do Varistor (kW)	3,1	3,8	3,8	4,6

Podemos formular os seguintes comentários sobre os dados obtidos:



As tensões de grampeamento, comparadas com as obtidas no item 3.1.4.2 ( centelhador a gás / diodo ) sofreram aumento significativo, mesmo utilizando-se varistor de pequenas capacidade e tensão de grampeamento, como por exemplo, de 100 V ou de 56 % para gerador calibrado para 1,5 KV em vazio e de 100 V ou de 40% para gerador calibrado para 4 KV. Isto se explica pela característica "V x I " do varistor e à limitação de corrente do gerador utilizado.

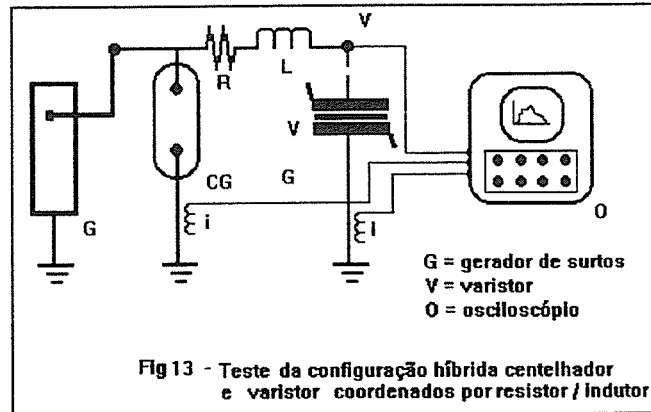
Quanto às tensões finais de grampeamento, os valores foram semelhantes aos obtidos nos testes descritos no item 3.1.4.2.

As correntes máximas nos varistores foram menores que as obtidas no teste anterior (diferenças de 3 A ou de 21% para teste em 4 kV), ocorrendo o contrário, como era de se esperar relativamente às correntes nos centelhadores que cresceram em 10 A ou 14% para gerador calibrado para 1,5 kV e em 25 A ou 13% para gerador calibrado em 4 KV.

As potências de crista dissipadas pelo varistor não ultrapassaram a 3,8 kW, valor este obtido no teste em 4 kV, mostrando que este componente trabalha com folga neste quesito.

### 3.1.4.5 Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor em Série com Indutor

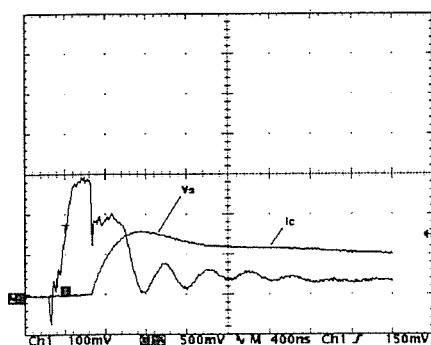
Foi montado o circuito de testes abaixo:



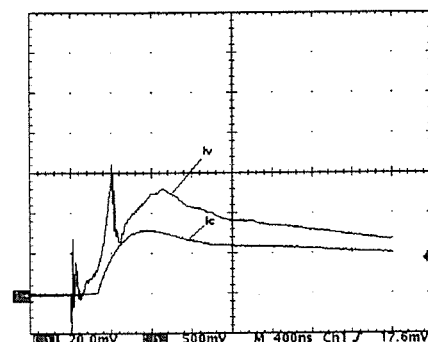
A configuração agora testada é basicamente a mesma apresentada no item 3.1.4.4, utilizando os mesmos componentes, porém com a inserção de um indutor de  $10\ \mu\text{H}$  em série com o resistor de  $18\ \Omega$ , perfazendo um circuito de coordenação resistivo/indutivo.

A ponderação feita no item anterior, quanto à limitação banda passante, agora é agravada com a inserção do indutor em série, configurando o nosso circuito em um filtro em " $\pi$ " composto pela elevada capacitância parasita do varistor interligada pelo indutor.

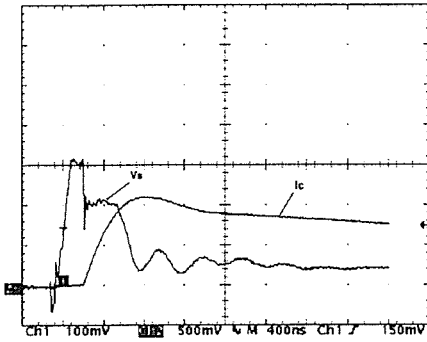
Os oscilogramas obtidos foram os seguintes:



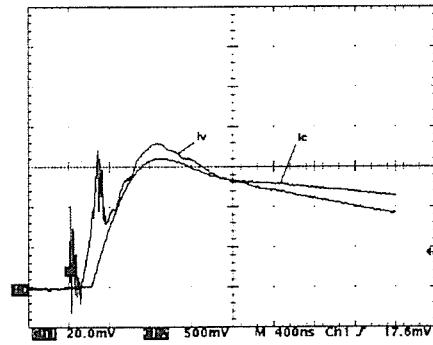
Oscilograma 61-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\ \Omega$  em série com indutor de  $10\ \mu\text{H}$  - gerador 1,5 kV - tensão de saída 290 V ( 100 V / div ) - corrente no centelhador 75 A ( 50A / div )



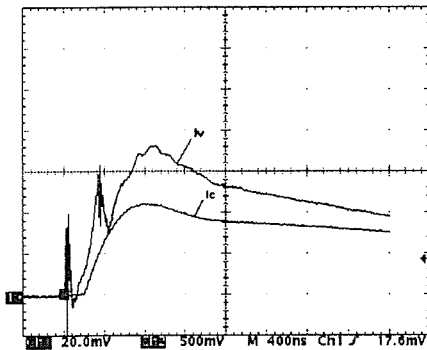
Oscilograma 62-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\ \Omega$  em série com indutor de  $10\ \mu\text{H}$  - gerador 1,5 kV - corrente no varistor 6,1A ( 2A / div )- corrente no centelhador 75 A ( 50A / div )



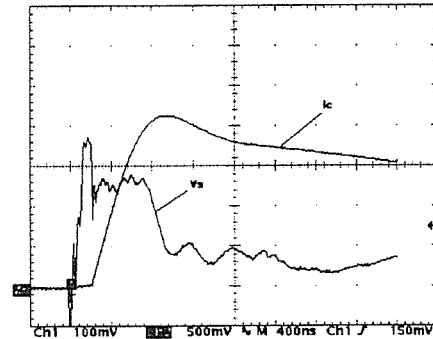
Oscilograma 63-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 2 kV - tensão de saída 310 V ( 100 V / div ) - corrente no centelhador 110 A ( 50A / div )



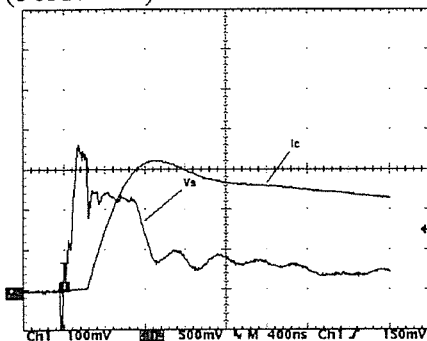
Oscilograma 66-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 3 kV - corrente no varistor 7,2A ( 2A / div )- corrente no centelhador 165 A ( 50A / div )



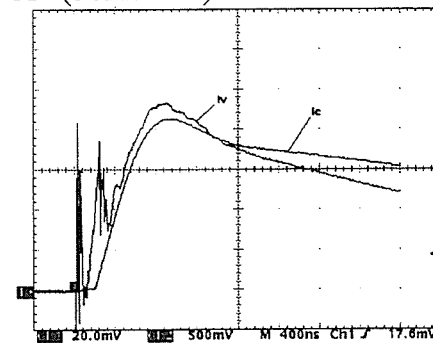
Oscilograma 64-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 2 kV - corrente no varistor 7,2A ( 2A / div )- corrente no centelhador 110 A ( 50A / div )



Oscilograma 67-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 4 kV - tensão de saída 370 V ( 100 V / div ) - corrente no centelhador 215 A ( 50A / div )



Oscilograma 65-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 3 kV - tensão de saída 360 V ( 100 V / div ) - corrente no centelhador 165 A ( 50A / div )



Oscilograma 68-centelhador 250 v e varistor 95k10 coordenados por resistor de  $18\Omega$  em série com indutor de  $10\mu\text{H}$  - gerador 4 kV - corrente no varistor 9,3A ( 2A / div )- corrente no centelhador 210 A ( 50A / div )

Podemos sintetizar os resultados obtidos na tabela 13 abaixo:

**Tabela 13**  
**Configuração Híbrida - Varistor 95 K 10 /Centelhador 150 V**  
**Coordenados por Resistor de 18  $\Omega$  em Série com Indutor de 10  $\mu$ H**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	200	310	360	370
Tensão Final de Grampeamento (V)	40	40	40	40
Valor máximo de Corrente no Varistor (A)	6,1	7,2	7,2	9,3
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	75	110	165	215
Potência Máxima Dissipada pelo Varistor (kW)	1,2	1,6	1,7	2,4

Comparando-se estes resultados com os obtidos na tabela 12 (mesma configuração, porém sem o indutor de amortecimento), podemos observar:

Para tensões de gerador de 1,5 kV e 2 kV, o indutor diminuiu as tensões de grampeamento em 80 V e 10 V, respectivamente. Já para tensões de gerador de 3 kV e 4 kV, houve um acréscimo da tensão de grampeamento de 40 V e 20 V, respectivamente, mostrando que o indutor é eficaz, para otimização deste parâmetro (tensão de grampeamento) apenas para tensões pequenas de gerador. Este fenômeno se explica pela limitação de corrente no varistor provida pelo indutor e pelas já citadas características “V x I” deste componente.

As tensões finais de grampeamento foram praticamente as mesmas obtidas nos testes anteriores e foram providas pelo centelhador.

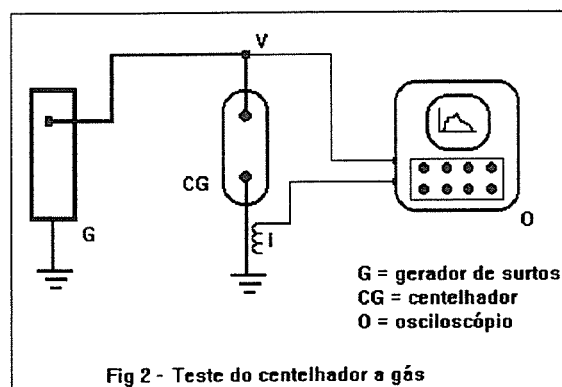
As correntes de crista no varistor nesta configuração foram bem melhores que as obtidas na configuração sem indutor, a saber, redução de 4,9 A com gerador em 1,5 KV ou de 44 %, de 4,8 A com gerador em 2 kV e 3 kV ou de 40 % e de 3,7 A com gerador em 4 KV, ou de 28%.

A introdução do indutor também ocasionou reduções nas potências de crista dissipadas pelo varistor, a saber de 2,9 KW com gerador em 1,5 kV ou de 94%, de 2,2 kW, com gerador em 2 kV, ou de 57%, de 2,1 kW com gerador em 3 kV, ou de 55% e de 2,2 kW com gerador em 4 kV, ou de 47%.

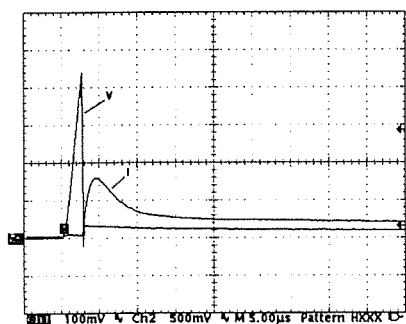
## 3.2 Testes Utilizando Gerador de 10 x 700 $\mu$ S

### 3.2.1 Centelhador a Gás 250 V / 10 kA

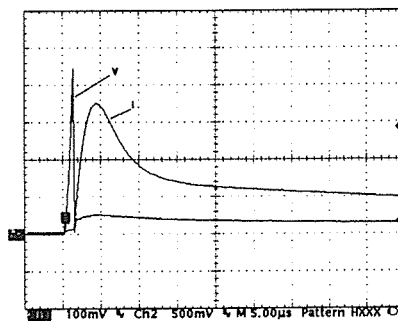
Foi montado o circuito de testes abaixo:



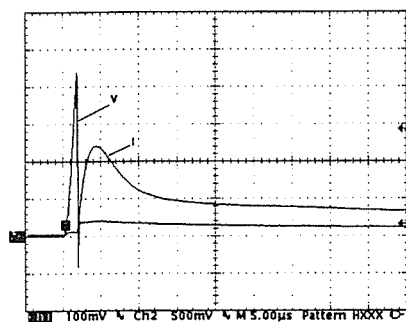
Os oscilogramas abaixo foram obtidos com o gerador calibrado para tensões a vazio de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV. A base de tempo do osciloscópio foi calibrado em 5  $\mu$ s / divisão. As escalas verticais são apresentadas na legenda de cada oscilograma.



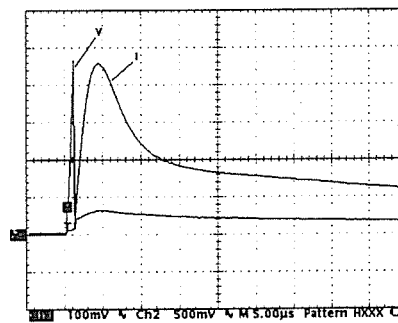
Oscilograma 69-centelhador a gás 250 V-gerador 1,5 kV-440 V (100V/div) - 16 A (10A/div)



Oscilograma 71-centelhador a gás 250 V-gerador 3 kV-440 V (100V/div) - 35 A (10A/div)



Oscilograma 70-centelhador a gás 250 V-gerador 2 kV-440 V (100V/div) - 24 A (10A/div)



Oscilograma 72-centelhador a gás 250 V-gerador 4 kV-460 V (100V/div) - 46 A (10A/div)

Todos os oscilogramas apresentam altas sobretensões residuais se bem que de valores menores que as apresentadas nos testes de impulso  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ . O ponto de operação (início da condução) é bem claro em todos os oscilogramas e a forma de onda após a operação apresenta, ao contrário dos oscilogramas do gerador  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ , uma grande estabilidade, atingindo praticamente a tensão final de grampeamento.

Os parâmetros mais relevantes extraídos destes oscilogramas são apresentados na tabela 14 abaixo:

**Tabela 14**  
**Centelhador à Gás 250 V      Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tempo de Resposta ( $\mu\text{s}$ )	1,8	1,5	1,3	1
Sobretensão Residual (V)	440	440	440	460
Tensão de Grampeamento (V)	30	40	55	60
Tensão Final de Grampeamento	30	30	30	40
Valor máximo da Corrente (A)	16	24	35	46
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão Final de Grampeamento (obs. 1) ( $\Omega$ )	1,9	1,7	1,6	1,3
Fator de "Clamping" (obs. 2)	14,7	11,0	8,0	7,7

obs. 1 : calculada como o quociente entre a tensão final de grampeamento e o valor máximo da corrente ocorrido após o estabelecimento da tensão final de grampeamento.

obs. 2 : quociente entre a sobretensão residual e a tensão de grampeamento

Da tabela 14 podemos extrair as seguintes observações:

Os testes mostraram que as sobretensões residuais atingiram valores altos (460 V com o gerador calibrado em 4 kV), ainda que menores, se comparadas às obtidas na rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{S}$  (700 V). Já as tensões de grampeamento obtidas (60 V com o gerador calibrado em 4 kV) foram muito menores que as obtidas nos testes anteriores (390 V com o gerador calibrado em 4 kV).

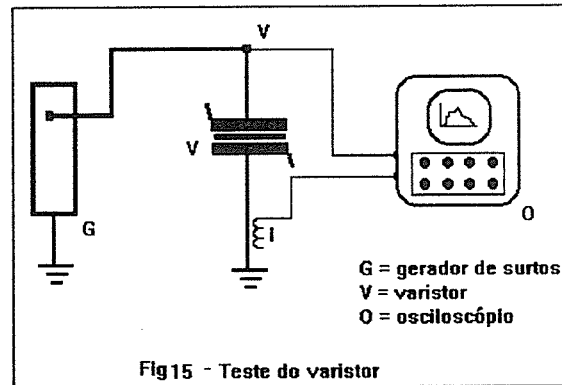
Os fatores de grampeamento ( como por exemplo 7,7 com o gerador calibrado em 4 kV), atingiram valores muito acima dos obtidos nos testes em rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  (1,8 com o gerador calibrado em 4 kV). Isto se deve ao fato de praticamente os valores das tensões finais de grampeamento ficarem muito próximas das tensões de grampeamento (idênticas para teste de 1,5 kV e ligeiramente inferiores para os testes de 2, 3 e 4 kV). Ou seja, praticamente, quando ignitado, o dispositivo centelhador mantém constante a tensão entre seus terminais, tendo em vista tratar-se de uma forma de onda mais lenta.

Quanto aos tempos de resposta, os valores obtidos ficaram muito acima dos verificados nos testes de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ , devido à proximidade entre as tensões de grampeamento e as tensões finais de grampeamento. Os valores obtidos de 1,8  $\mu\text{s}$ , 1,5  $\mu\text{s}$ , 1,3  $\mu\text{s}$  e 1  $\mu\text{s}$ , respectivamente para tensões de gerador de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV, se aproximam dos valores obtidos na primeira série de teste (rampa de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ ), no caso de se computar para o cálculo do tempo de resposta, a tensão final de grampeamento (1,2  $\mu\text{s}$ ), para todas as tensões de gerador aplicadas (1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV).



### 3.2.2 Varistores de Óxido Metálico

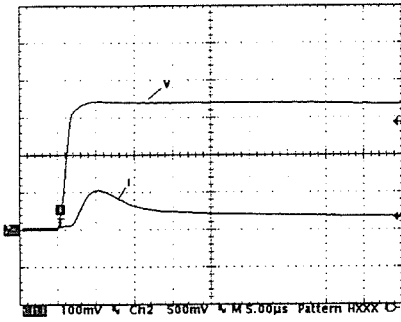
Foi montado o circuito de testes abaixo:



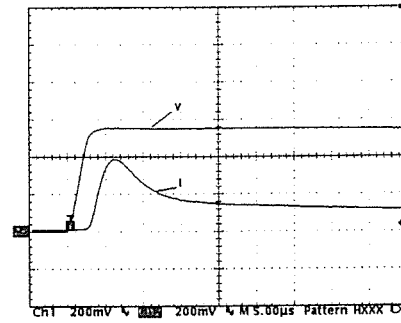
Os testes de  $10 \times 700 \mu\text{S}$  foram aplicados aos mesmos varistores testados em rampa de  $1,2 \times 50 \mu\text{S}$ , a saber :

- Varistor 150 K20 com tensão nominal de 150 V (RMS) e pastilha de diâmetro igual a 20 mm;
- Varistor 250 K20 com tensão nominal de 250 V (RMS) e pastilha de diâmetro igual a 20 mm;
- Varistor 250 K14 com tensão nominal de 250 V (RMS) e pastilha de diâmetro igual a 14 mm

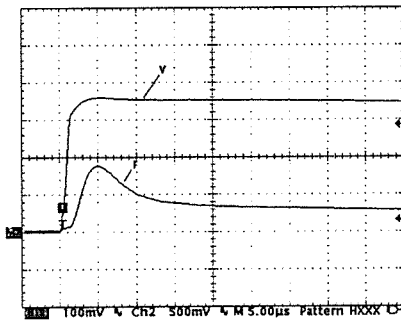
Os oscilogramas obtidos, com tensões de gerador a vazio de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV, se encontram abaixo:



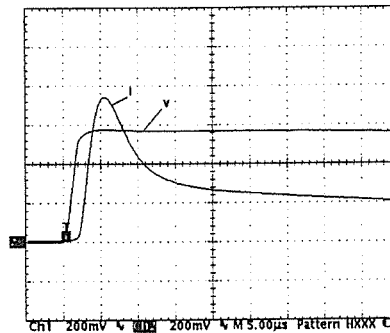
Oscilograma 73-varistor 150k20-gerador 1,5 kV-340 V (100V/div) - 10 A (10A/div)



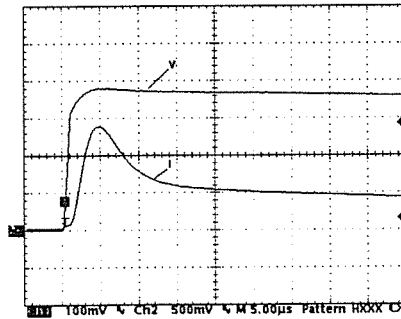
Oscilograma 77-varistor 250k20-gerador 1,5 kV-560 V (200V/div) - 7,9 A (4A/div)



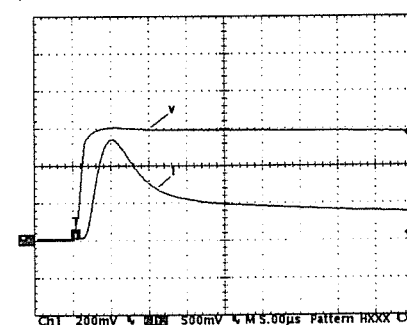
Oscilograma 74-varistor 150k20-gerador 2 kV-360 V (100V/div) - 18 A (10A/div)



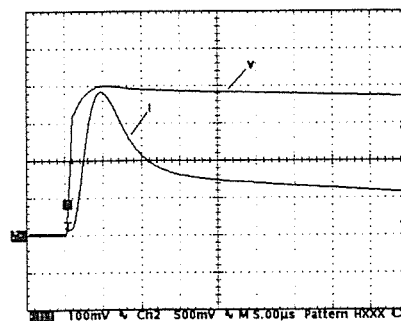
Oscilograma 78-varistor 250k20-gerador 2 kV-570 V (200V/div) - 14,8A (4A/div)



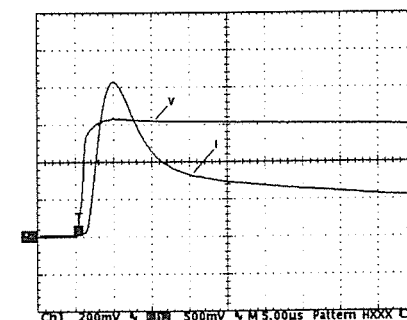
Oscilograma 75-varistor 150k20-gerador 3 kV-380 V (100V/div) - 28 A (10A/div)



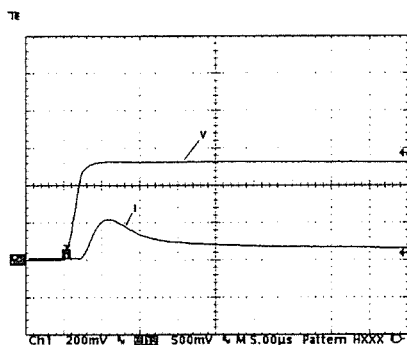
Oscilograma 79-varistor 250k20-gerador 3 kV-600 V (200V/div) - 27 A (10A/div)



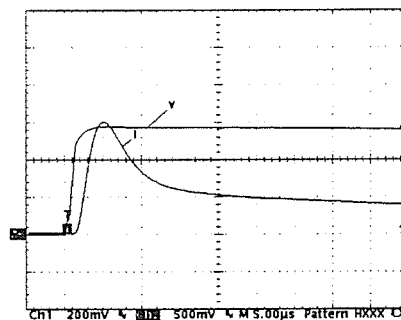
Oscilograma 76-varistor 150k20-gerador 4 kV-400 V (100V/div) - 38 A (10A/div)



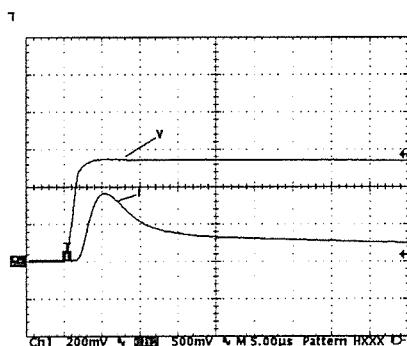
Oscilograma 80-varistor 250k20-gerador 4 kV-640 V (200V/div) - 42A (10A/div)



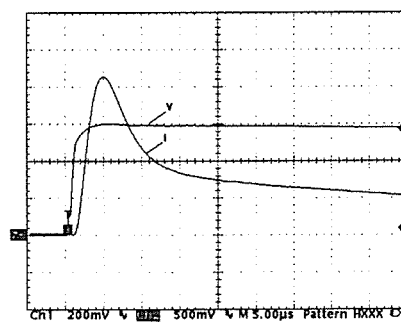
Oscilograma 81-varistor 250k14-gerador 1,5 kV-520 V (200V/div) - 11A (10A/div)



Oscilograma 83-varistor 250k14-gerador 3 kV-570 V (200V/div) - 30A (10A/div)



Oscilograma 82-varistor 250k14-gerador 2 kV-550 V (200V/div) - 18A (10A/div)



Oscilograma 84-varistor 250k14-gerador 4 kV-600 V (200V/div) - 43A (10A/div)

Da mesma forma que nos testes anteriores (em rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ ) estes dispositivos apresentaram oscilogramas sem descontinuidades, ao contrário dos obtidos nos testes dos centelhadores a gás. Além disto, as tensões de grampeamento permanecem praticamente constantes durante a condução do dispositivo, eliminando-se da análise o parâmetro “tensão final de grampeamento”.

As tabelas 15, 16 e 17 resumem os parâmetros mais relevantes extraídos dos oscilogramas:

**Tabela 15**  
**Varistor 150 K20**                      **Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tempo de Resposta (Obs 1)	—	—	—	—
Tensão de Grampeamento (V)	340	360	380	400
Valor máximo da Corrente (A)	10,0	18,0	28,0	38,0
Valor da Corrente no Ponto do Estabelecimento da Tensão de Grampeamento (A)	10,0	18,0	28,0	38,0
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão de Grampeamento (Obs 2) ( $\Omega$ )	34,0	20,0	13,6	10,5

Obs 1 : Imperceptível neste teste.

Obs 2.: Calculada como o quociente entre a tensão de grampeamento e a corrente no ponto do estabelecimento da tensão de grampeamento.

**Tabela 16**  
**Varistor 250 K20**                      **Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tempo de Resposta (Obs 1)	—	—	—	—
Tensão de Grampeamento (V)	560	570	600	640
Valor máximo da Corrente (A)	7,9	14,8	27,0	42,0
Valor da Corrente no Ponto do Estabelecimento da Tensão de Grampeamento (A)	7,9	14,8	27,0	42,0
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão de Grampeamento (Obs. 2) ( $\Omega$ )	70,9	38,5	22,2	15,2

Obs 1 : Imperceptível neste teste.

Obs 2.: Calculada como o quociente entre a tensão de grampeamento e a corrente no ponto do estabelecimento da tensão de grampeamento.

**Tabela 17**  
**Varistor 250 K14**                      **Parâmetros Relevantes**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tempo de Resposta Obs. 1	—	—	—	—
Tensão de Grampeamento (V)	520	550	570	600
Valor máximo da Corrente (A)	11,0	18,0	30,0	43,0
Valor da Corrente no Ponto do Estabelecimento da Tensão de Grampeamento (A)	11,0	18,0	30,0	43,0
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão de Grampeamento (Obs. 1) ( $\Omega$ )	47,3	30,6	19,0	14,0

Obs 1 : Imperceptível neste teste.

Obs 2.: Calculada como o quociente entre a tensão de grampeamento e a corrente no ponto do estabelecimento da tensão de grampeamento.

Analisando-se os valores das tabelas 15, 16 e 17, podemos formular as seguintes conclusões:

Repetindo a tendência obtida na primeira sequência de testes, todos os valores de tensões de grampeamento superaram significativamente os valores das tensões especificados pelo fabricante, devido às características "V x I" destes componentes.

Como exemplo, o varistor 150 K20 (tabela 15), especificado para aplicação em linhas

elétricas de 150 V rms, apresentou uma tensão de grampeamento de 340 V, 360 V, 380 V e 400 V respectivamente para impulsos de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV.

Esta tendência também foi potencializada com o teste do varistor 250 k20 (tabela 16) que apresentou tensões de 560 V, 570 V, 600 V e 640 V para impulsos de respectivamente 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV, sendo que este componente é apropriado para aplicações em linhas de alimentação elétrica energizadas em 220 V rms.

Mudando-se o diâmetro da pastilha e mantendo-se a tensão nominal ( 250 V rms), os resultados são mostrados dos testes aplicados ao varistor 250 K14. Para as mesmas tensões aplicadas, obtivemos tensões de 520 V, 550 V, 570 V e 600 V, apontando a mesma tendência, ainda em menor escala, obtida nos testes anteriores, conforme mostra a tabela 18 abaixo que compara as tensões de grampeamento entre os dois varistores para os diversas tensões de gerador aplicadas.

**Tabela 18**  
**VARISTORES “250 K20” E “250 K14” - COMPARAÇÃO DAS TENSÕES DE GRAMPEAMENTO**

Varistor	Tensão do Gerador (kV)			
	1,5	2	3	4
250 K20 (V)	560	570	600	640
250 K14	520 (7,1%)	550 (3,5%)	570 (5,0%)	600 (6,3%)

Obs.: Percentual de decréscimo das tensões de grampeamento.

Fica evidente a mesma tendência notada na primeira série de testes porém com percentuais de acréscimos bem inferiores.

Analisando-se o parâmetro “Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão de Grampeamento”, obtemos a tabela 19 abaixo:

**Tabela 19**  
**COMPARAÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS NOS PONTOS DO**  
**ESTABELECIMENTO DAS TENSÕES DE GRAMPEAMENTO**

Varistor	Tensão do Gerador (kV)			
	1,5	2	3	4
250 K20 ( $\Omega$ )	70,9	38,5	22,2	15,2
250 K14 ( $\Omega$ )	47,3 (33,3%)	30,6 (20,5%)	19,0 (14,4%)	14,0 (7,9%)

Obs.: Percentual de decréscimo das impedâncias

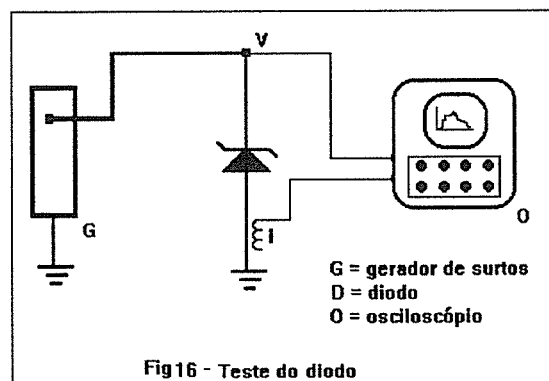
A mesma tendência observada nos testes em rampa de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  de diminuição das impedâncias com a diminuição dos diâmetros das pastilhas também foi observada, porém com percentuais de decréscimo menores.

Quanto às potências de crista máximas dissipadas pelos varistores nestes testes, considerando o oscilograma 84 (gerador calibrado em 4 kV aplicado ao varistor 250 K14), observamos que o máximo da função  $V \times I$ , ocorreu no ponto  $5 \mu\text{S}$  (considerando  $0 \mu\text{S}$  no início do crescimento de “V”) e foi de aproximadamente “ $600 \text{ V} \times 43 \text{ A} = 25,8 \text{ kW}$ ”, potência esta inferior à calculada no teste anterior (mesmo componente, porém gerador de  $1,2 \times 50 \mu\text{S}$ ).

Considerando-se uma potência média de “400 V x 10 A = 4 kW” durante um período estimado de condução de 1100  $\mu$ S, teremos uma energia total conduzida pelo varistor de “4 kW x 1100  $\mu$ S = 4,4 J, energia esta que, se bem que maior que a obtida no teste anterior, é ainda muito pequena se comparada com a capacidade energética da pastilha (20 J).

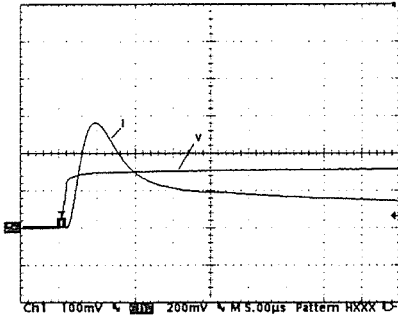
### 3.2.3 Diodos de Avalanche Rápidos

Foi montado o circuito de testes abaixo:

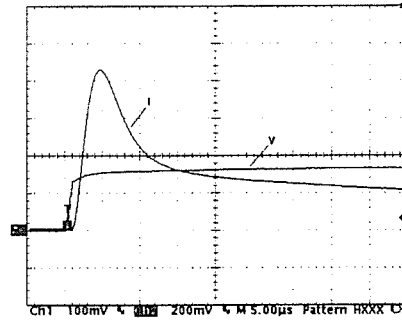


Como representante destes componentes, também foi submetido a testes o diodo “Transzorb” da GSI, modelo 1,5 KE 130 CA com o gerador calibrado em 1 kV e 1,5 kV, obtendo-se os oscilogramas 85 e 86 apresentados abaixo. A tensão de 1,5 kV de crista foi a máxima suportada pelo dispositivo. A tensão de crista de 1 kV foi aplicada excepcionalmente neste caso, para fins de análise de resultados.





Oscilograma 85-diodo 1,5KE 130 ca-gerador  
1 kV-150 V (100V/div) - 7,2A (4A/div)



Oscilograma 86-diodo 1,5KE 130 ca-gerador  
1,5 kV-150 V (100V/div) - 17A (4A/div)

Ambos os oscilogramas apresentam formas de onda regulares sem apresentarem as oscilações verificadas nos testes em rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{S}$ .

Na tabela 20 abaixo são apresentados os principais parâmetros retirados dos oscilogramas:

**Tabela 20**  
**DIODO DE AVALANCHE GSI 1,5 KE 130 CA**  
**PARÂMETROS RELEVANTES**

Tensão do Gerador (kV)	1	1,5
Tempo de Resposta (Obs 1)	—	—
Tensão de Grampeamento (V)	150	150
Valor máximo da Corrente (A)	7,2	17,0
Impedância no Ponto do Estabelecimento da Tensão de Grampeamento (Obs. 2) ( $\Omega$ )	20,8	8,8

Obs 1 : Imperceptível neste teste.

Obs 2.: Calculada como o quociente entre a tensão de grampeamento e a corrente no ponto do estabelecimento da tensão de grampeamento.

Podemos extrair dos testes as seguintes conclusões:

O tempo de resposta, que já era imperceptível nos testes de  $1,2 \times 50 \mu\text{S}$ , continuou sendo nesta sequência de experimentos, como era de se esperar.

A tensão de grampeamento manteve-se estável para as duas tensões de gerador aplicados o que não ocorreu nos testes anteriores (rampa de  $1,2 \times 50 \mu\text{S}$ ). Isto se deve à maior limitações de corrente do gerador  $10 \times 700 \mu\text{S}$ , o que acaba limitando também a queda de tensão interna do diodo.

Para o impulso de 1,5 kV, a impedância interna do dispositivo atingiu  $8,8 \Omega$ , bem inferior à obtida, com o mesmo impulso, no teste do varistor 250 k14 que atingiu  $47,3 \Omega$  (ver tabela 19) reforçando a observação já feita da superioridade do diodo sobre o varistor, sob este aspecto, em fenômenos em transitórios com limitações de corrente.

A potência máxima suportada por este dispositivo neste teste que ocorreu com o gerador calibrado para 1,5 kV, pode ser avaliada através do oscilograma 86 no tempo  $10 \mu\text{S}$  que seria de " $150 \text{ V} \times 17 \text{ A} = 2,6 \text{ kW}$ ."

Ainda no oscilograma 86, considerando-se uma tensão de grampeamento de 150 V e uma corrente média de 4 A e conseqüentemente uma potência média de " $150 \text{ V} \times 4 \text{ A} = 600 \text{ W}$ ", e um período de condução de  $1000 \mu\text{S}$ , teremos uma energia toda dissipada de " $600 \text{ W} \times 1000 \mu\text{S} = 0,6 \text{ J}$ ".

### 3.2.4 Configurações Híbridas

Montando-se a “tabela 21” , análoga à “tabela 8” apresentada no capítulo de testes 1,2 x 50  $\mu$ S, para alguns componentes testados sob a rampa 10 x 700  $\mu$ S, teremos:

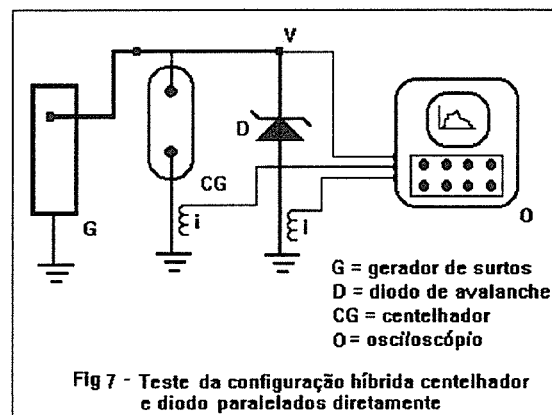
**Tabela 21 - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS**

	Centelhador a Gás - 250 V Tensão Gerador = 4 kV	Varistor 250 K14 Tensão Gerador = 4 kV	Diodo 1,5 KE 130 CA Tensão do Gerador = 1,5 kV
Tempo de Resposta ( $\mu$ s)	<u>Ruim</u> 1,0	<u>Bom</u> Imperceptível	<u>Bom</u> Imperceptível
Tensão de Grampeamento (V)	<u>Bom</u> 40	<u>Ruim</u> 600	<u>Bom</u> 150
Sobretensão Residual (V)	<u>Ruim</u> 460	<u>Bom</u> Imperceptível	<u>Bom</u> Imperceptível
Relação Sobretensão Residual/ Tensão Grampeamento	<u>Ruim</u> $\frac{460}{60} = 7,7$	não aplicável	não aplicável
Relação Tensão de Grampeamento /Tensão Final de Grampeamento	<u>Bom</u> $\frac{60}{40} = 1,5$	não aplicável	não aplicável
Máxima Tensão Suportada de Calibração do Gerador (kV)	<u>Bom</u> 4	<u>Bom</u> 4	<u>Ruim</u> 1,5

Pelo mesmo motivo exposto nos testes anteriores a única deficiência do diodo (máxima tensão suportada) deve ser compensada, através de um dispositivo híbrido que às qualidades do diodo, agregue capacidade de suportar maiores tensões transitórias. Os resultados dos testes e destas configurações híbridas são apresentados abaixo:

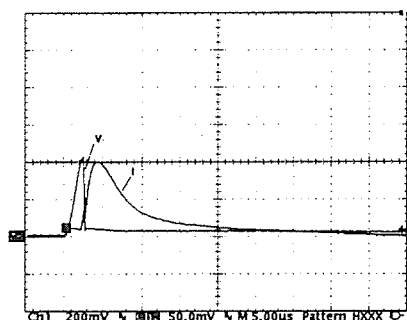
### 3.2.4.1 Associação em Paralelo de Diodo e Centelhador a Gás

Foi montado o circuito de testes abaixo:

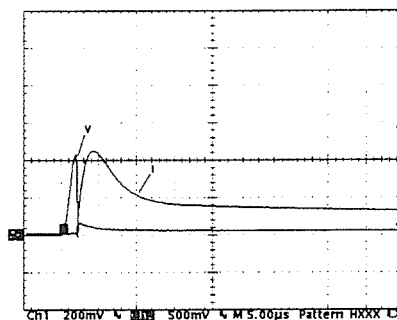


Foi inicialmente testado o paralelismo do diodo 1,5 KE 400 CA (tensão nominal de 400 V) e do centelhador a gás de 250 V. Conforme já observado, a escolha do diodo de 400 V foi necessária para que o mesmo não inibisse a operação do centelhador. Foram obtidos os oscilogramas abaixo:

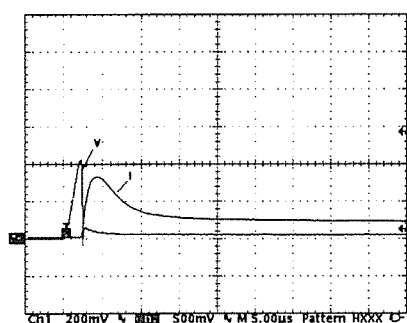
Os resultados obtidos estão apresentados nos oscilogramas abaixo:



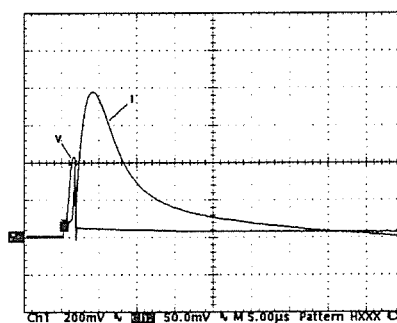
Oscilograma 87-centelhador 250 V em paralelo com diodo 1,5KE 400 ca-gerador 1,5 kV-tensão de saída 440 V (200V/div) - corrente no diodo 2A (1A/div)



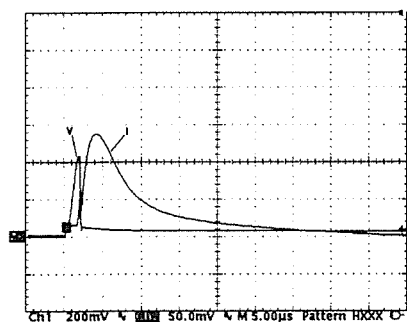
Oscilograma 90-centelhador 250 V em paralelo com diodo 1,5KE 400 ca-gerador 2 kV-tensão de saída 440 V (200V/div) - corrente no centelhador 22A (10A/div)



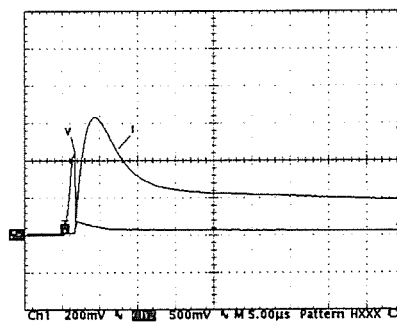
Oscilograma 88-centelhador 250 V em paralelo com diodo 1,5KE 400 ca-gerador 1,5 kV-tensão de saída 440 V (200V/div) - corrente no centelhador 17A (10A/div)



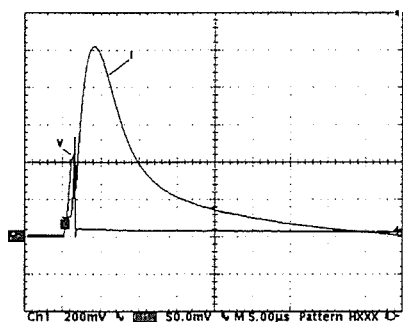
Oscilograma 91-centelhador 250 V em paralelo com diodo 1,5KE 400 ca-gerador 3 kV-tensão de saída 440 V (200V/div) - corrente no diodo 3,9A (1A/div)



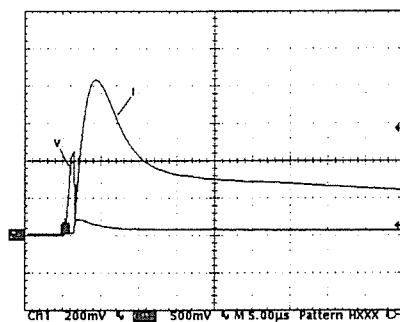
Oscilograma 89-centelhador 250 V em paralelo com diodo 1,5KE 400 ca-gerador 2 kV-tensão de saída 440 V (200V/div) - corrente no diodo 2,8A (1A/div)



Oscilograma 92-centelhador 250 V em paralelo com diodo 1,5KE 400 ca-gerador 3 kV-tensão de saída 440 V (200V/div) - corrente no centelhador 32A (10A/div)



Oscilograma 93-centelhador 250 V em paralelo com diodo 1,5KE 400 ca-gerador 4 kV-tensão de saída 440 V (200V/div) - corrente no diodo 5,1A (1A/div)



Oscilograma 94-centelhador 250 V em paralelo com diodo 1,5KE 400 ca-gerador 4 kV-tensão de saída 440 V (200V/div) - corrente no centelhador 42A (10A/div)

Podemos portanto montar a tabela 22 abaixo que resume os resultados obtidos:

**Tabela 22**  
**Configuração Híbrida - Centelhador 250 V/Diodo 1,5 KE 400 CA**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	440	440	440	440
Tensão Final de Grampeamento (V)	30	30	35	40
Valor máximo de Corrente no Diodo (A)	2,0	2,8	3,9	5,1
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	17,0	22,0	32,0	42,0
Potência Máxima Dissipada pelo Diodo (W)	220	440	530	660

Podemos sintetizar as seguintes conclusões:

As tensões de grampeamento permanecem constantes (440 V) para todas as tensões calibradas do gerador.

As tensões finais de grampeamento variam de 30 V a 40 V, ocorrendo logo após a entrada em operação do centelhador a gás.

As correntes de crista do diodo foram bem menores que as verificadas no teste anterior (rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ ), não ultrapassando a 5,1 A, no teste em 4 kV. As potências de pico dissipadas pelo diodo foram bem inferiores às verificadas nos teste anteriores, não ultrapassando a 660 W na rampa de 4 kV.

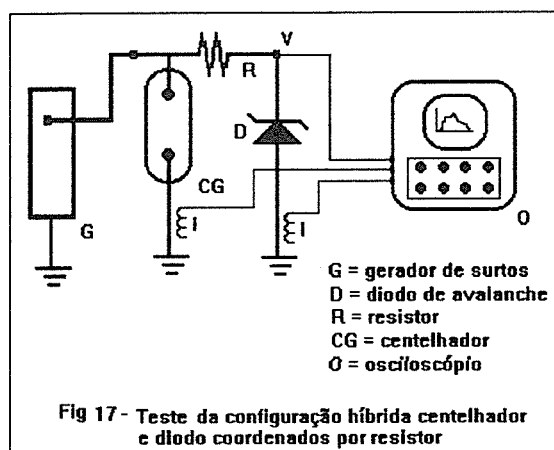
É interessante verificar que o máximo de corrente no diodo, ocorre com a tensão do conjunto já limitada à tensão de grampeamento final do centelhador diminuindo bastante portanto a potência máxima dissipada no semicondutor.

A corrente máxima obtida no centelhador, com o gerador calibrado em 4 kV foi de 42 A (oscilograma 94), sendo que a corrente de curto circuito do gerador, quando calibrado em aberto em 4 kV, foi de 64 A (oscilograma 10).

Ao contrário dos resultados obtidos no primeiro teste (rampa de  $1,2 \times 50 \mu\text{S}$ ), apesar do ponto de início de condução do diodo se apresentar adiantado em relação ao do centelhador, as correntes de crista se apresentaram em fase. Os retardos entre o início de condução dos dois componentes foram de aproximadamente  $2,5 \mu\text{S}$ ,  $1,8 \mu\text{S}$ ,  $1 \mu\text{S}$  e  $0,8 \mu\text{S}$  respectivamente para 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV de impulso. O motivo da diminuição dos retardos é o mesmo exposto na primeira série de testes.

### 3.2.4.2 Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor

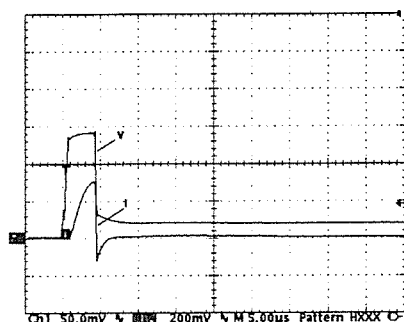
Foi montado o circuito de testes abaixo:



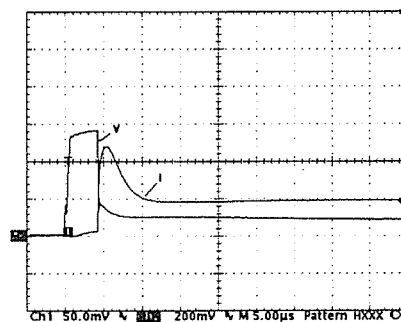
Foi submetido a testes o circuito híbrido utilizando centelhador a gás 250 V no primeiro estágio e diodo 1,5 kE 130 CA no segundo coordenados por resistor de 18  $\Omega$ .

Os motivos da escolha dos valores de tensão do diodo e do resistor de coordenação já foram explanados no item 3.1.4.2 deste trabalho.

Os seguintes oscilogramas foram obtidos:

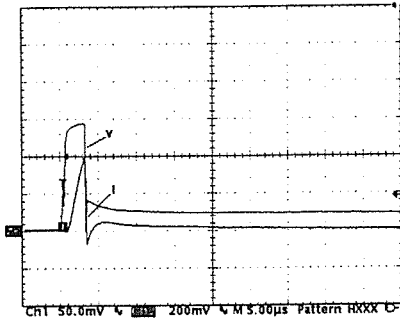


Oscilograma 95-centelhador 250 V, resistor de 18  $\Omega$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 1,5 kV-tensão de saída 140 V (50V/div) - corrente no diodo 6A (4A/div)

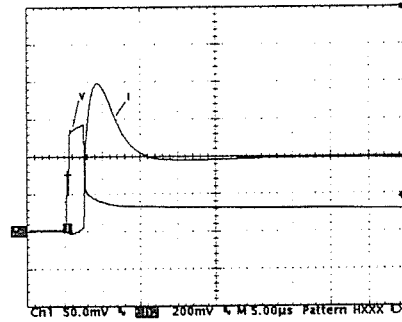


Oscilograma 96-centelhador 250 V, resistor de 18  $\Omega$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 1,5 kV-tensão de saída 140 V (50V/div) - corrente no centelhador 9,6A (4A/div)

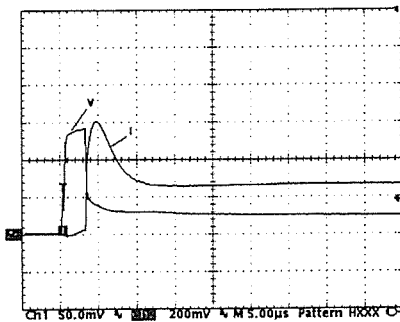




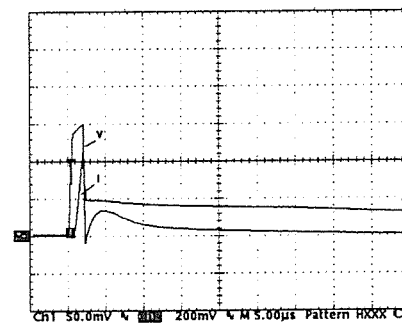
Oscilograma 97-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 2 kV-tensão de saída 145 V (50V/div) - corrente no diodo 7,6A (4A/div)



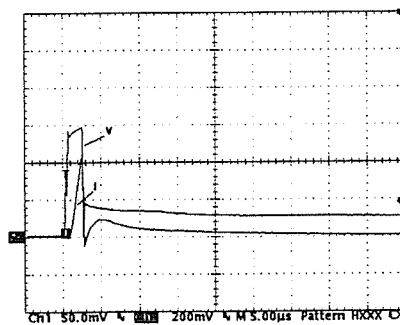
Oscilograma 100-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 3 kV-tensão de saída 140 V (50V/div) - corrente no centelhador 16A (4A/div)



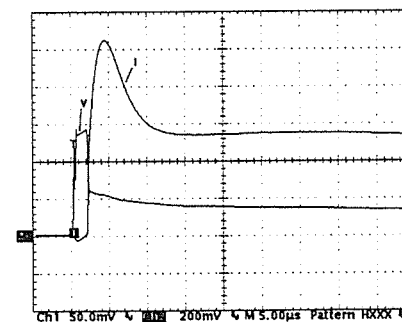
Oscilograma 98-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 2 kV-tensão de saída 140 V (50V/div) - corrente no centelhador 12A (4A/div)



Oscilograma 101-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 4 kV-tensão de saída 150 V (50V/div) - corrente no diodo 9A (4A/div)



Oscilograma 99-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 3 kV-tensão de saída 147 V (50V/div) - corrente no diodo 8,8A (4A/div)



Oscilograma 102-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 4 kV-tensão de saída 140 V (50V/div) - corrente no centelhador 21A (4A/div)

A tabela 23 abaixo apresenta os principais parâmetros tirados dos oscilogramas:

**Tabela 23**  
**Configuração Híbrida - Centelhador 250 V/Diodo 1,5 KE 130 CA**  
**Coordenados por Resistor de 18  $\Omega$**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	140	145	147	150
Tensão Final de Grampeamento (V)	20	24	28	40
Valor máximo de Corrente no Diodo (A)	6,0	7,6	8,8	9,0
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	9,6	12,0	16,0	21,0
Potência Máxima Dissipada pelo Diodo (W)	840	1100	1300	1400

Da “tabela 23” podemos tirar as seguintes observações.

As tensões de grampeamento variaram de 140 V a 150 V, para impulsos de 1,5 kV a 4 kV. Estas mesmas tensões na configuração o centelhador e diodo sem resistor de coordenação (item 3.2.4.1 deste documento) ficaram estáveis em 440 V.

As tensões finais de grampeamento (que variaram de 20 V a 40 V) foram garantidas pelo centelhador a gás.

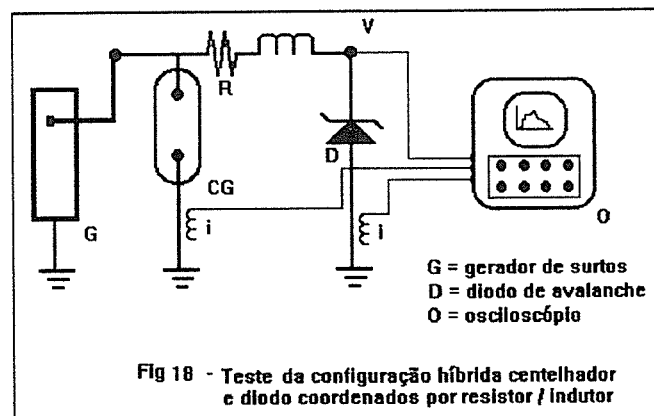
Analisando-se as correntes máximas no diodo e no centelhador, vimos que a coordenação entre ambos garantiu mais uma vez a “proteção” do diodo cuja corrente máxima não ultrapassou a 9A, garantindo potências de pico no semicondutor de 840 KW, 1,1 KW, 1,3 KW e 1,4 KW respectivamente para tensões de gerador de 1,5 kV, 2 KV, 3 KV e 4 KV.

Avaliando-se a forma de onda de tensão de saída ficam claras duas fases distintas, sendo a primeira, de forma quadrada, representando a condução do diodo com durações de aproximadamente  $4 \mu\text{S}$ ,  $2,5 \mu\text{S}$ ,  $2 \mu\text{S}$  e  $1,5 \mu\text{S}$  respectivamente para tensões de gerador de  $1,5 \text{ kV}$ ,  $2 \text{ kV}$ ,  $3 \text{ kV}$  e  $4 \text{ kV}$ . Após esta fase, a tensão de saída cai abruptamente, no ponto de início de condução do centelhador, que acaba por garantir a tensão final de grampeamento.

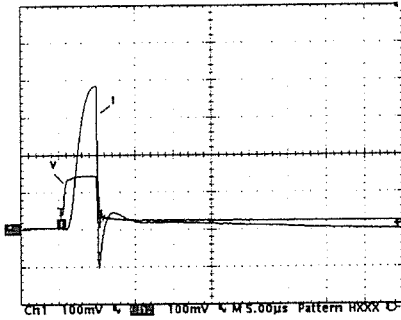
Os oscilogramas mostram de forma clara a perfeita coordenação entre o diodo e o centelhador, não sendo notada simultaneidade de condução entre os dois componentes..

### 3.2.4.3 Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor e Indutor em Série

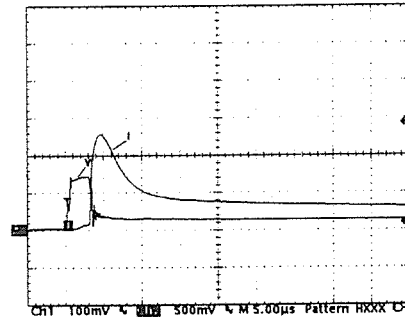
Foi montado o circuito de testes abaixo:



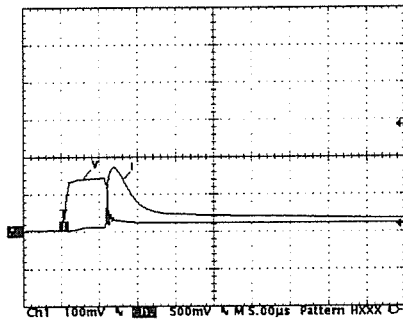
Da mesma forma que a descrita no item 3.1.4.3 deste documento, o objetivo da introdução do indutor de  $10 \mu\text{H}$  foi a verificação de sua influência na condução do diodo. Todas as considerações contidas na introdução do item anterior, se aplicam integralmente neste item. Os oscilogramas obtidos foram os seguintes:



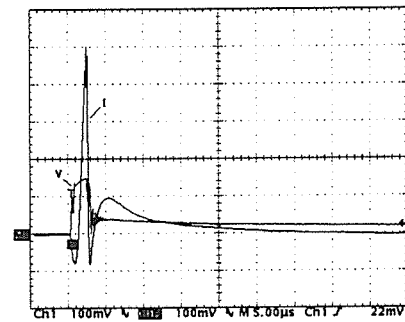
Oscilograma 103-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 1,5 kV-tensão de saída 140 V (100V/div) - corrente no diodo 7,6A (2A/div)



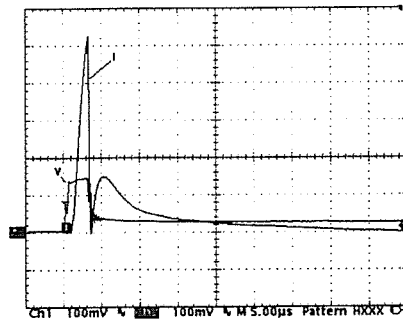
Oscilograma 106-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 2 kV-tensão de saída 140 V (100V/div) - corrente no centelhador 26A (10A/div)



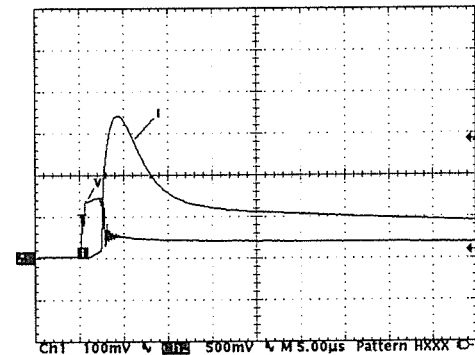
Oscilograma 104-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 1,5 kV-tensão de saída 140 V (100V/div) - corrente no centelhador 17A (10A/div)



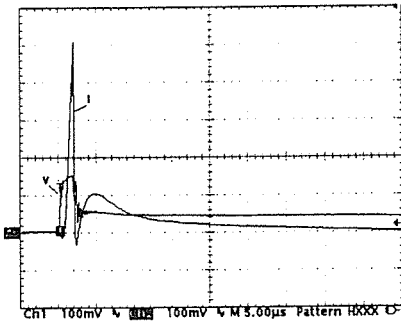
Oscilograma 107-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 3 kV-tensão de saída 150 V (100V/div) - corrente no diodo 12A (2A/div)



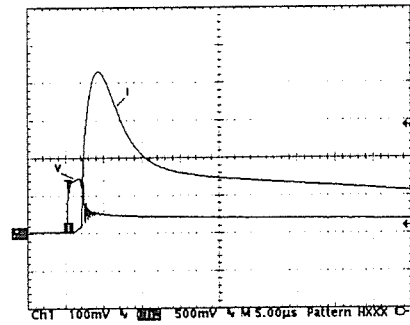
Oscilograma 105-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 2 kV-tensão de saída 140 V (100V/div) - corrente no diodo 10,5A (2A/div)



Oscilograma 108-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 3 kV-tensão de saída 140 V (100V/div) - corrente no centelhador 34A (10A/div)



Oscilograma 109-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 4 kV-tensão de saída 150 V (100V/div) - corrente no diodo 10,2A (2A/div)



Oscilograma 110-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e diodo 1,5KE 130 ca-gerador 4 kV-tensão de saída 140 V (100V/div) - corrente no centelhador 43A (10A/div)

A “tabela 24” abaixo apresenta os parâmetros mais relevantes retirados destes oscilogramas:

**Tabela 24**  
**Configuração Híbrida - Centelhador 250 V/Diodo 1,5 KE 130 CA**  
**Coordenados por Resistor de  $18 \Omega$  e Indutor de  $10 \mu\text{H}$**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	140	140	150	150
Tensão Final de Grampeamento (v)	20	22	38	41
Valor máximo de Corrente no Diodo (A)	7,6	10,5	10,0	10,2
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	17,0	26,0	34,0	43,0
Potência Máxima Dissipada pelo Diodo (kW)	1,1	1,5	1,5	1,5

Comparando-se os dados da tabela 24 com os da tabela 23, (mesma configuração porém sem indutor), podemos concluir o seguinte :

Assim como nos testes anteriores (sem o indutor) não houveram significativas mudanças nas tensões de grampeamento que permaneceram também semelhantes em valores absolutos.

O mesmo aconteceu com as tensões finais de grampeamento.

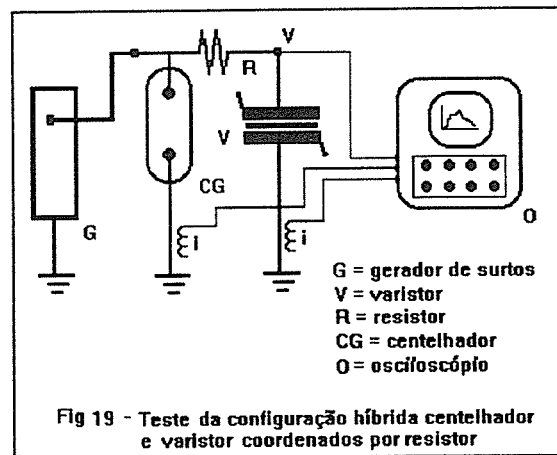
Os valores de crista de corrente no diodo, que eram de 6A, 7,6 A, 8,8 A e 9 A na configuração sem indutor, passaram a ser de 7,6 A, 10,5 A, 10 A e 10,2 A respectivamente para tensões de gerador de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV, ou seja, o indutor piorou as condições de funcionamento do diodo, o que também pode ser verificado pelos potências de pico dissipadas pelo diodo que cresceram de 840 W, 1,1 kW, 1,3 kW e 1,4 kW para 1,1 kW, 1,5 kW, 1,5 kW e 1,5 kW para a mesma sequência de tensões aplicadas.

O uso do indutor fez também com que as correntes de pico do centelhador passassem de 9,6 A, 12 A, 16 A e 21 A para 17 A, 26 A, 34 A e 43 A respectivamente para tensões de gerador de 1,5 kV, 2 kV, 3 kV e 4 kV, que no caso do gerador em 4 kV, representa um acréscimo de corrente de cerca de 100%.

Concluindo, para a rampa de  $10 \times 700 \mu\text{S}$ , o acréscimo do indutor ao circuito resistivo de coordenação piorou o desempenho dinâmico do dispositivo, além de acrescentar problemas funcionais, ligados à limitação da banda de frequências passante, conforme já comentado no item 3.1.4.3.

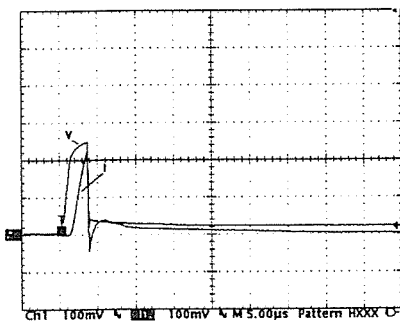
### 3.2.4.4 Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor

Foi montado o circuito de testes abaixo:

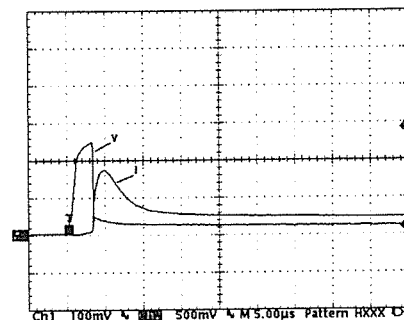


Foi utilizado na montagem centelhador de 250 V e varistor 95 k10, de tensã nominal de 95 V e com pastilha com diâmetro de 10 mm coordenados por resistor de 18  $\Omega$ . Esta topologia trás de imediato degradações funcionais, relacionadas à resposta de frequências, conforme já comentado no item 3.1.4.4 deste documento.

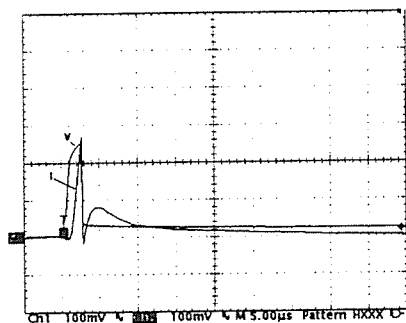
Os resultados dos testes são apresentados a seguir:



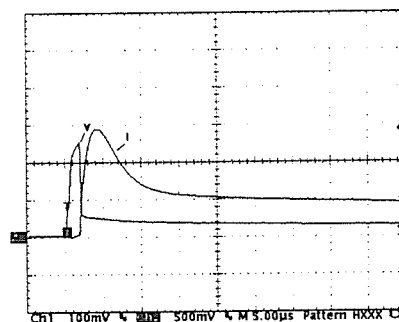
Oscilograma 111-centelhador 250 V, resistor de 18  $\Omega$  e varistor 95 k10-gerador 1,5 kV-tensão de saída 250 V (100V/div) - corrente no varistor 4,5A (2A/div)



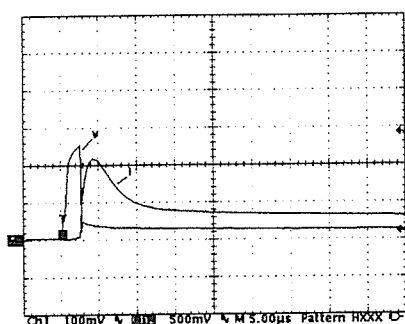
Oscilograma 112-centelhador 250 V, resistor de 18  $\Omega$  e varistor 95 k10-gerador 1,5 kV-tensão de saída 250 V (100V/div) - corrente no centelhador 17A (10A/div)



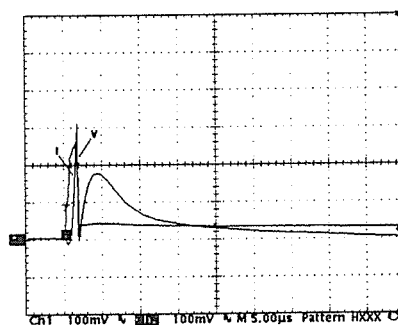
Oscilograma 113-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e varistor 95 k10-gerador 2 kV-tensão de saída 260 V (100V/div) - corrente no varistor 5,3A (2A/div)



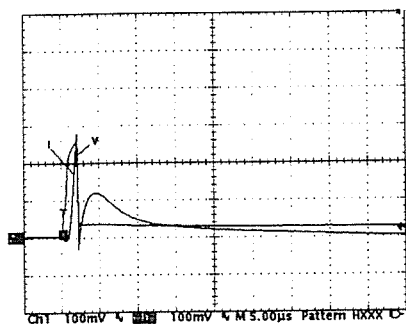
Oscilograma 116-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e varistor k10-gerador 3 kV-tensão de saída 260 V (100V/div) - corrente no centelhador 29A (10A/div)



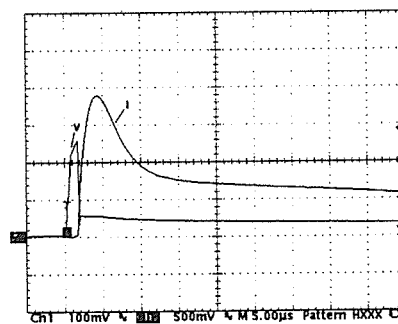
Oscilograma 114-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e varistor 95 k10-gerador 2 kV-tensão de saída 260 V (100V/div) - corrente no centelhador 22A (10A/div)



Oscilograma 117-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e varistor 95 k10-gerador 4 kV-tensão de saída 260 V (100V/div) - corrente no varistor 6A (2A/div)



Oscilograma 115-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e varistor 95 k10-gerador 3 kV-tensão de saída 260 V (100V/div) - corrente no varistor 5,6A (2A/div)



Oscilograma 118-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  e varistor 95 k10-gerador 4 kV-tensão de saída 260 V (100V/div) - corrente no centelhador 38A (10A/div)

A tabela 25 apresenta a síntese dos resultados obtidos:



**Tabela 25**  
**Configuração Híbrida - Varistor 95 K10/Centelhador 250 V**  
**Coordenados por Resistor de 18  $\Omega$**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	250	260	260	260
Tensão Final de Grampeamento (V)	30	30	30	40
Valor máximo de Corrente no varistor (A)	4,5	5,3	5,6	6
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	17	22	29	38
Potência Máxima Dissipada do Varistor (kW)	1,1	1,4	1,5	1,6

Seguem alguns comentários sobre os dados obtidos

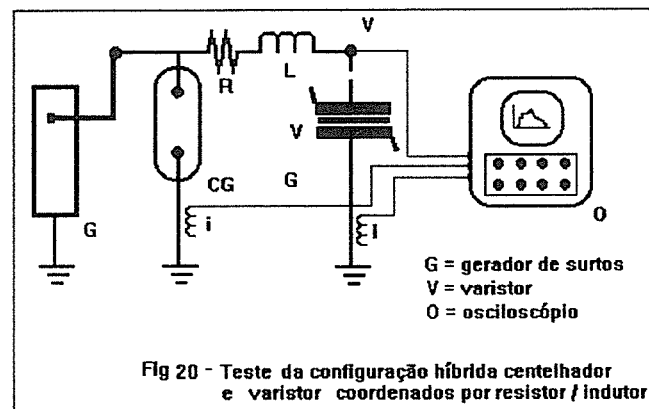
Comparando-se esta topologia com a testada no item 3.2.4.2 deste documento (centelhador e diodo coordenados por resistor), verificamos que as tensões de grampeamento, da mesma forma que as obtidas nos testes anteriores de 1,2 x 50  $\mu$ S, sofreram significantes aumentos, tais como, para o teste em 1,5 kV, de 140 V para 250 V.

Não houveram mudanças significativas nas tensões finais de grampeamento, comparando-se com a topologia que utiliza diodo, pois estas tensões são providas pelo centelhador a gás.

As correntes de pico dos varistores, comparadas com as do diodo foram também significativamente menores (diferença de 3A ou de 33% para o teste em 4 kV). Ocorreu no entanto um acréscimo considerável no valor de pico da corrente no centelhador ( diferença de 17 A ou de 80% para o teste em 4 kV), obedecendo a tendência da configuração testado no item 3.2.4.2. Quanto à solicitação de potência do varistor, cujo valor máximo alcançou 1,6 kW (4 kV), esta configuração o fez trabalhar com folga não sendo este considerado um parâmetro crítico.

### 3.2.4.5 Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor em Série com Indutor

Foi montado o circuito de testes abaixo:

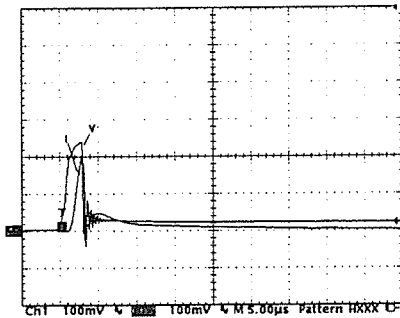


Os componentes centelhador e varistor foram os mesmos utilizados nos testes anteriores (item 3.2.4.4 deste documento).

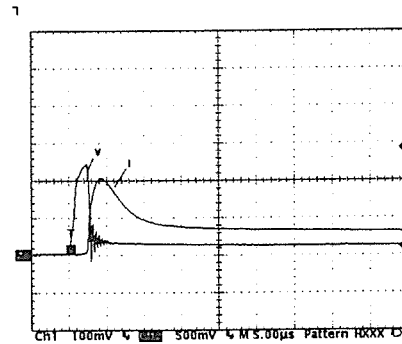
Funcionalmente esta configuração limita ainda mais a banda passante de frequências conforme já comentado no item 3.1.4.4 deste documento.

O principal objetivo desta sequência de testes é a verificação da influência do indutor adicional aos resultados obtidos no item 3.2.4.3.

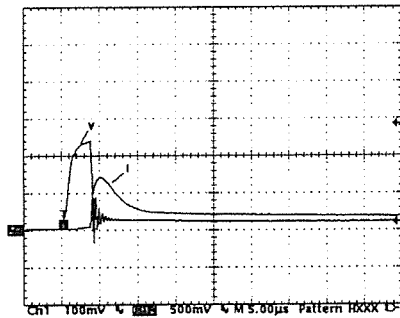
Os oscilogramas obtidos foram os seguintes.



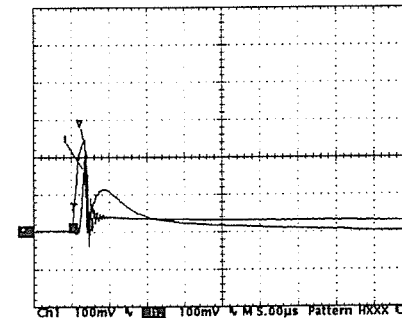
Oscilograma 119-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10\mu\text{H}$  e varistor 95 k10-gerador 1,5 kV-tensão de saída 240 V (100V/div) - corrente no varistor 4A (2A/div)



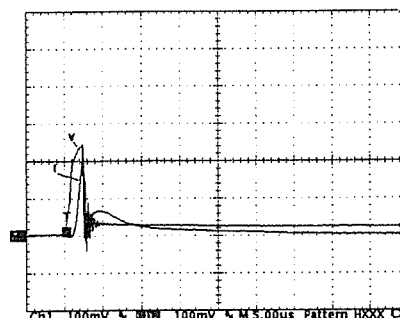
Oscilograma 122-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10\mu\text{H}$  e varistor 95 k10-gerador 2 kV-tensão de saída 240 V (100V/div) - corrente no centelhador 21A (10A/div)



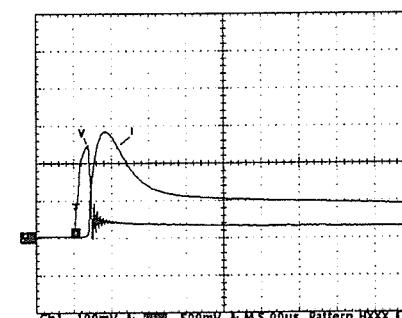
Oscilograma 120-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10\mu\text{H}$  e varistor 95 k10-gerador 1,5 kV-tensão de saída 240 V (100V/div) - corrente no centelhador 14A (10A/div)



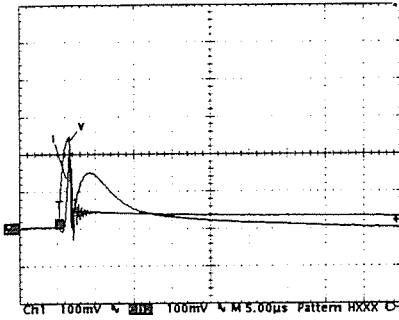
Oscilograma 123-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10\mu\text{H}$  e varistor 95 k10-gerador 3 kV-tensão de saída 240 V (100V/div) - corrente no varistor 4A (2A/div)



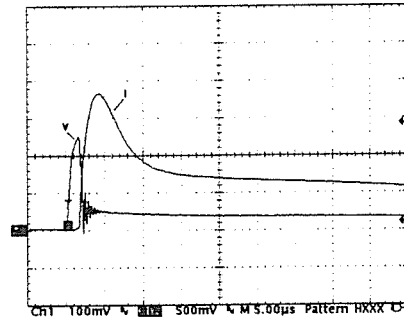
Oscilograma 121-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10\mu\text{H}$  e varistor 95 k10-gerador 2 kV-tensão de saída 240 V (100V/div) - corrente no varistor 4A (2A/div)



Oscilograma 124-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10\mu\text{H}$  e varistor 95 k10-gerador 3 kV-tensão de saída 240 V (100V/div) - corrente no centelhador 28A (10A/div)



Oscilograma 125-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e varistor 95 k10-gerador 4 kV-tensão de saída 250 V (100V/div) - corrente no varistor 4A (2A/div)



Oscilograma 126-centelhador 250 V, resistor de  $18 \Omega$  / indutor  $10 \mu\text{H}$  e varistor 95 k10-gerador 4 kV-tensão de saída 250 V (100V/div) - corrente no centelhador 37A (10A/div)

Podemos montar a tabela abaixo sintetizando as grandezas mais relevantes obtidas nos oscilogramas:

**Tabela 26**  
**Configuração Híbrida - Varistor 95 K 10 /Centelhador 250 V**  
**Coordenados por Resistor de  $18 \Omega$  em Série com Indutor de  $10 \mu\text{H}$**

Tensão do Gerador (kV)	1,5	2	3	4
Tensão de Grampeamento (V)	240	240	240	250
Tensão Final de Grampeamento (V)	25	30	40	40
Valor máximo de Corrente no Varistor (A)	4	4	4	4
Valor Máximo de Corrente no Centelhador (A)	14	21	28	37
Potência Máxima Dissipada pelo Varistor (W)	960	960	960	1000

Comparando-se estes valores com os obtidos no item 3.2.4.3 (mesma topologia, porém sem o indutor de 10  $\mu\text{H}$ ), podemos observar que as tensões de grampeamento nestes testes sofreram pequenas reduções de 250 V, 260 V, 260 V e 260 para 240 V, 240 e 250 V, proporcionando a colocação do indutor uma redução aproximada de 3,8 % no valor deste parâmetro.

Outra observação interessante é a relativa às correntes de crista do varistor, que, nestes testes, se estabilizaram 4 A, para todas as tensões do gerador. Nos testes anteriores, sem o uso do indutor estes valores variaram de 4,5 A a 6 A, para testes em 1,5 kV a 4 kV.

As potências de crista dissipadas pelo varistor apesar de não se constituírem em parâmetro crítico para este teste, foram reduzidas de 1,1 kW, 1,4 kW, 1,5 kW e 1,6 kW para 960 W, 960 W, 960 W e 1 kW, respectivamente mostrado uma influência benéfica da introdução do indutor neste circuito.

## 4 - SÍNTESE DAS ANÁLISES DOS RESULTADOS

No capítulo 3 deste trabalho, na descrição dos testes efetuados, foram apresentados comentários sobre os resultados de cada experimento, comparando-se o desempenho de cada componente individualmente e de cada circuito híbrido.

O presente capítulo apresenta a síntese dos comentários já efetuados, visando, através da melhor ordenação dos dados obtidos, facilitar a análise dos resultados.

Desta forma segue, por componente e circuito testado uma síntese de seus desempenhos.

### 4.1 - Centelhadores a Gás 250 V/10 kA

Podemos evidenciar como pontos fortes sua baixa impedância interna após o disparo, mantendo-se para as duas formas de onda testadas e para todas as tensões de gerador em aberto uma tensão final de grampeamento variando de 30 V a 60 V, aliada a uma alta capacidade de condução de correntes transitórias.

Como pontos fracos deste componente podemos considerar o seu tempo de resposta demasiadamente longo e dependente, nos dois testes realizados, da tensão do gerador. Nos testes em rampa de  $10 \times 700 \mu\text{S}$  este parâmetro variou de  $1,8 \mu\text{s}$  a  $1,0 \mu\text{s}$  para tensões de 1,5 kV a 4 kV, e de  $0,32 \mu\text{s}$  a  $0,11 \mu\text{s}$  nos testes em

rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ , mostrando que a maior taxa de crescimento do impulso acelera a operação do componente.

Outro ponto fraco deste componente é a sobretensão residual, que se mostrou muito elevada em todos os testes. Observou-se que este parâmetro atingiu amplitudes maiores nos testes de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  (de 680 a 700 V para tensões de 1,5 kV a 4 kV) em comparação aos obtidos nos testes de  $10 \times 700 \mu\text{s}$  (de 440 V a 460 V para tensão de 2,5 kV a 4 kV).

Observamos ainda que em rampa rápida ( $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ ), o componente apresentou uma tensão de grampeamento inicial (denominada neste trabalho simplesmente por “tensão de grampeamento”) com valores significativamente maiores que a “tensão final de grampeamento”. Este fenômeno não ocorreu no teste em rampa de  $10 \times 700 \mu\text{s}$ , onde a tensão de grampeamento atingiu praticamente, após o tempo de resposta, a tensão de manutenção de arco do componente.

## **4.2 - Varistores de Óxido Metálico**

Apresentam como pontos fortes a estabilidade da tensão de grampeamento, não desenvolvendo sobretensões residuais como as verificadas nos centelhadores e tempos de resposta muito curtos e portanto imperceptíveis mesmo nos testes de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ .

Quanto às tensões de grampeamento obtidas, podemos verificar que de uma forma geral se apresentaram bem maiores que as tensões nominais dos componentes, variando de 560 V a 640 V para o varistor 250 K20 em rampa de  $10 \times 700 \mu\text{s}$ , com tensões de calibração do gerador variando de 1,5 kV a 4 kV e, de 1,35 kV a 3,1 kV para o mesmo varistor em rampa de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  com a mesma variação de tensões de calibração do gerador.

Mantendo-se a tensão da pastilha mas diminuindo-se o seu diâmetro (varistor 250 K14), os valores obtidos de tensões de grampeamento, passaram a ser menores que os conseguidos com o varistor 250 K20, a saber, de 520 V a 600 V para o varistor em rampa de  $10 \times 700 \mu\text{s}$  com tensões de calibração do gerador variando de 1,5 kV a 4 kV e de 730 V a 1 kV para o mesmo varistor em rampa de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  com a mesma variação de tensões de calibração do gerador .

Como conclusão podemos portanto dizer que as tensões de grampeamento obtidas, além de bem maiores que as especificadas para cada componente variam bastante com a forma de onda do gerador e com o diâmetro da pastilha, parâmetro este responsável pela capacidade de condução de corrente deste componente.



### 4.3 - Diodos de Avalanche Rápidos

Apresentam como pontos fortes a estabilidade de tensão de grampeamento e tempos de resposta muito curtos e imperceptíveis, mesmo nos testes em rampa rápida ( $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ ).

Como ponto fraco verificamos a baixa capacidade de suportar tensões transitórias de valores mais elevados (suportou uma tensão máxima de 2 kV na rampa de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  e de 1 kV na rampa de  $10 \times 700 \mu\text{s}$ ), limitando sua aplicação de forma isolada. O valor limite menor suportado de tensão na rampa  $10 \times 700 \mu\text{s}$  se explica pelo fato desta rampa transferir maior energia à junção semicondutora do diodo.

### 4.4 - Associação em Paralelo de Diodo e Centelhador a

#### Gás.

Esta configuração agrega o tempo de resposta e a tensão de grampeamento do diodo à capacidade de condução de corrente do centelhador. Entretanto, a tensão de grampeamento do diodo deve ser alta o suficiente para permitir a ignição do centelhador, motivo pelo qual se utilizou diodo de 400 V, propiciando tensões de saída de 550 V a 690 V, para gerador de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  com tensões variadas de 1,5 kV

a 4 kV e de 440 V constantes para gerador de 10 x 700  $\mu$ s, com tensões variando na mesma faixa.

Observa-se ainda que nos testes em 4 kV, a corrente de crista no diodo atingiu a 29 A em rampa 1,2 X 50  $\mu$ s e a apenas 5,1 A em rampa 10 X 700  $\mu$ s indicando que o diodo foi mais solicitado nos testes em rampa rápida tendo em vista o grande tempo de resposta do centelhador. Em ambos os testes esta configuração suportou as tensões máximas aplicadas de 4 kV.

#### **4.5 - Associação de Diodo e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor.**

Possui como vantagem a possibilidade da utilização de diodos de menor tensão de operação sem inibir o disparo do centelhador, propiciando menores tensões de grampeamento e conseqüentemente menores solicitações elétricas no equipamento a ser protegido.

As tensões de grampeamento para a topologia testada que utiliza diodo com tensão nominal de grampeamento de 130 V, variaram de 180 V a 250 V para teste em rampa de 1,2 x 50  $\mu$ s com tensões de gerador variando de 1,5 kV a 4 kV e de 140 V a 150 V para teste em rampa de 10 x 700  $\mu$ s com as mesmas variações de tensões de gerador.

As correntes máximas no diodo atingiram, para o teste de 4 kV, 15 A e 9 A respectivamente para os testes em rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  e  $10 \times 700 \mu\text{s}$ , mostrando que, em que pese esta topologia atender aos dois testes, o diodo é menos solicitado na rampa mais lenta. Este fenômeno pode também ser verificado no quesito potência máxima dissipada pelo diodo, que atingiu na rampa  $1,2 \times 50\mu\text{s}$  com gerador calibrado em 4 kV a 3,8 kW e a 1,4 kW no teste em rampa  $10 \times 700 \mu\text{s}$  com gerador calibrado na mesma tensão. Este fato ocorre em função do grande tempo de resposta do centelhador o que acaba sobrecarregando o diodo em rampas mais rápidas.

## **4.6 - Associação de Diodo e Centelhador a Gás**

### **Coordenados por Resistor e Indutor em Série.**

A colocação do indutor de  $10 \mu\text{H}$  em série com o resistor de coordenação acarretou nos testes em rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  significativa diminuição nas correntes e potências dissipadas pelo diodo e pequeno aumento na corrente de crista do centelhador. Como exemplo, com o gerador calibrado para 4 kV, o diodo conduziu correntes de crista de 11 A e 15 A, dissipando potências de crista de 2,2 kW e 3,8 kW respectivamente para circuitos com indutor e sem indutor. Já na rampa de  $10 \times 700 \mu\text{s}$ , a ação do indutor foi bem menos sentida, como pode ser observado com o gerador também calibrado em 4 kV, onde obtivemos potências de crista de 1,4 kW e 1,5 kW dissipados pelo diodo respectivamente para circuito com e sem indutor.

Em resumo, a inserção de indutor em série com o resistor limitador diminuiu a corrente de crista e a potência de pico dissipada pelo diodo, nos testes em transitórios rápidos, otimizando neste caso o circuito protetor. Entretanto, nos limites de tensões testados (4 KV), a inexistência do indutor não impediu a satisfatória operação do conjunto.

## **4.7 - Associação de Varistor e Centelhador a Gás Coordenados por Resistor.**

Nesta montagem foi utilizado varistor 95K14, com tensão nominal de 95 V. As tensões de grampeamento variaram de 280 V a 360 V para gerador de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  calibrado para tensões de 1,5 kV a 4 kV e de 250 V a 260 V para gerador de  $10 \times 700 \mu\text{s}$  calibrado para as mesmas tensões. Quanto às correntes de crista no varistor, obtivemos de 11 A a 13 A para o teste em  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  e de 4,5 A a 6 A para o gerador de  $10 \times 700 \mu\text{s}$ , ficando evidente que as solicitações elétricas (correntes e potências) impostos ao varistor foram maiores para os testes em rampas mais rápidas, devido ao grande tempo de resposta do centelhador à gás.

Comparando-se esta topologia com a que utiliza diodo de avalanche rápido em lugar do varistor (item 4.5), verificamos nestes testes uma degradação geral nas tensões de grampeamento obtidas, conforme pode ser observado, por exemplo, nos

testes em rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ , cuja variação passou de 180 V a 250 V para 280 V a 350 V para gerador calibrado para tensões de 1,5 kV a 4 kV.

## **4.8 - Associação de Varistor e Centelhador a Gás**

### **Coordenados por Resistor em Série com Indutor.**

O mesmo varistor 95K14, com tensão nominal de 95 V foi utilizado nesta montagem. As tensões de grampeamento variaram de 200 V a 370 V para gerador de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  calibrado para tensões de 1,5 kV a 4 kV e de 240 V a 250 V para gerador de  $10 \times 700 \mu\text{s}$  calibrado para as mesmas tensões.

Comparando-se estes resultados com os obtidos nos testes sem o indutor (item 4.7), verificamos que para a rampa mais rápida, o indutor melhorou o desempenho do conjunto apenas em testes com baixas tensões de calibração de gerador. Já nos testes em rampa mais lenta as reduções de tensões de grampeamento providas pelo indutor foram insignificantes.

A inserção do indutor nesta topologia acarreta ainda nos testes em rampa  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  considerável limitação de corrente e potência de pico no varistor, conforme pode ser observado nos testes com gerador de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  calibrado em 4 kV, onde

se obteve 9,3 A e 13 A e, 2,4 kW e 4,6 kW respectivamente correntes de crista e potências de crista no varistor respectivamente com indutor e sem indutor.

Já com os testes em rampa  $10 \times 700 \mu\text{s}$ , no mesmo nível de tensão (4 kV) o uso de indutor acarretou diminuição de 2 A (de 6 A para 4 A) na corrente de crista do varistor e de 600 W (de 1600 W para 1000W) em sua potência de crista.

## 5 - CONCLUSÃO

Uma análise das diversas tabelas com caracterização dos componentes e circuitos testados apresentadas neste trabalho nos mostra grandes diferenças de comportamento entre cada arranjo.

A forma clássica de se caracterizar um elemento de proteção apenas pela sua tensão de disparo pode acarretar danos ao equipamento a ser protegido devido às sobretensões impostas ao mesmo durante o tempo de resposta do dispositivo.

A adoção de circuitos híbridos de proteção, utilizando-se elementos em cascata devidamente coordenados, quando se deseja obter capacidade para drenar correntes transitórias de alto valor, garantindo-se rápido tempo de resposta aliada a baixa tensão de grampeamento, ficou evidenciada como a mais indicada.

O conhecimento exato das características de atuação dos protetores, sejam eles componentes ou circuitos híbridos, se torna cada vez mais importante tendo em vista, conforme já observado na introdução deste trabalho, o constante processo de diminuição de suportabilidade dos equipamentos eletrônicos à medida em que evoluem tecnologicamente.

Ainda como conclusões podemos citar as modificações introduzidas nos geradores de surto (modificação do circuito conformador de onda do gerador  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  e utilização de capacitores eletrolíticos no gerador  $10 \times 700 \mu\text{s}$ ) que permitiram a montagem de

geradores menores, com custos mais reduzidos e com melhores formas de onda de corrente.

Neste contexto, acreditamos que o presente trabalho contribuirá fornecendo um elenco de informações técnicas não disponíveis na literatura clássica, aos profissionais envolvidos com o projeto e manutenção de sistemas eletrônicos interligados, nas áreas de telecomunicações, informática e de controle de processos.

Como continuidade deste trabalho sugere-se a avaliação da “resposta de frequência” de cada componente e circuito híbrido testado visando melhor conhecermos suas limitações de aplicação em linhas em que trafeguem sinais de alta frequência. Sugere-se ainda a aplicação de testes adicionais com geradores de alta corrente em cada componente e circuito avaliado para melhor conhecermos seus desempenhos nestas situações que apesar de menos frequentes na prática, podem apresentar aos profissionais interessados, subsídios importantes para o desenvolvimento de projetos na área. Finalmente, sugere-se a modelagem computacional dos componentes e circuitos testados, com base nos resultados obtidos neste trabalho, para aplicação em programas de simulações de circuitos, incorporando poderosa ferramenta de projeto.



## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Meineri, G.; Pomponi, R.; Lightning Overvoltages and Overcurrents on Telecommunication Subscriber Lines: Measurements Results in Italy. In: Proceedings of the *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, September 13-16, 1994, Rome, Italy, pp.60-65.
- 2 - Djebari, B.; Guérin, L.; Gléone, M.; Conducted E.M. Disturbances on the Telecommunication Terminal Equipment Ports. In: Proceedings of the *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, September 13-16, 1994, Rome, Italy, pp. 54-59.
- 3 - Paulino, J.OS.; Cançado, M.A.; Proteção Elétrica para o Ambiente do Cliente. In: Anais do *XII Seminário Nacional de Redes do Sistema TELEBRÁS*. Agosto, 26-30, 1996, Brasília, Brasil, pp.122-141.
- 4 - Martzloff, F. D.; Coordination of Surges Protectors in Low-Voltage AC Power Circuits. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No 1 jan. / feb. 1980, pp 129-133.
- 5 - Harris, R.A . ; Darveniza,M.; The Transient Blocking Device: A State of Art Development in Protection for Sensitive Electronic Systems. In: International Conference on Electromagnetic Compatibility , April 11-13, Kuala Lumpur, Malaysia.
- 6 - Borgeest, K.; Haseborg, J. L. ; Improvement of Protection Circuits for Signal Lines Using Special Diodes. In: International Symposium on Electromagnetic Compatibility, September 17-20,1996,Rome,Italy.
- 7 - CCITT Recommendation K-20 - *Resistibility of Telecommunication Switching Equipment to Overvoltage and Overcurrents*, Blue Book, Vol. IX, 1984.
- 8 - CCITT Recommendation K-21 - *Resistibility of Subscribers Terminals to Overvoltages and Overcurrents*, Blue Book, Vol. IX, 1984.
- 9 - CCITT Recommendation K-22 - *Overvoltage Resistibility of Equipment Connected to an ISDN T/S BUS* , Blue Book, Vol. IX, 1984.
- 10 - Dommel, H. W. ; EMTP Theory Book. Power System Analysis Corporation, May, 1992, Vancouver, British Columbia.