

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS, COMPONENTES
E SISTEMAS INTELIGENTES

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Rogério Botteon Romano e aprovada pela Comissão Julgadora em 3/7/1989.

*Yoshiaki Doi
24/7/89*

GERADOR DE IMPULSO DE ALTA TENSÃO

PARA SIMULAÇÃO

EM REDES TELEFÔNICAS

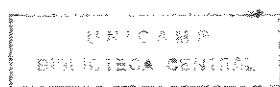
ROGÉRIO BOTTEON ROMANO

Orientador : Prof. Dr. IOSHIKI DOI

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas (FEE - UNICAMP), como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

- Julho 1989 -

Campinas - SP - Brasil



Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida : minha esposa SHIRLEY MARIA SELLA ROMANO , minha futura filha AMANDA SELLA ROMANO , e meus pais ARMANDO ROMANO e RUTH BOTTEON ROMANO.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. IOSHIAKI DOI , pela sua constante dedicação e orientação neste trabalho.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Pesquisa - do qual fui bolsista no biênio 83/84.

Ao Convênio TELEBRÁS / UNICAMP , que possibilitou a realização de parte do nosso trabalho.

Aos colegas JOSÉ ANTONIO DONIZETE ROSSI , TAKASHI TOME , ARILDO CÂNDIDO GARCIA e FLÁVIO EDUARDO NALLIN (hoje , todos no CPqD - TELEBRÁS) , pelas importantes contribuições ao desenvolvimento desta tese.

Ao JOSÉ HENRIQUE DE OLIVEIRA , HEITOR PIRES BARBOSA JR. , ELMITON JOSÉ ALENCAR , JORGE BERTOLINO FILHO e JORGE FUMIO OBATA (todos da TELEBRÁS) , que contribuíram para a execução final deste trabalho.

Aos demais amigos e colegas da FEE-UNICAMP e da TELEBRÁS.

RESUMO

Os problemas causados por descargas atmosféricas em redes telefônicas são conhecidos há muito tempo. Para assegurar uma adequada proteção elétrica dessas redes, é necessária a verificação constante da qualidade e desempenho dos dispositivos protetores, através de ensaios e da realização de simulações em redes experimentais de forma sistemática. Para isso, é necessário contar com equipamentos geradores apropriados, confiáveis e que reproduzam perfeitamente as características dos surtos desejados, e, se possível, normalizados e reproduzíveis. O presente trabalho analisa dois tipos de geradores de impulso de tensão, desenvolvidos para simulação em redes telefônicas e para testes específicos de centelhadores. A partir da comprovação prática descrita neste trabalho, foi possível projetar geradores de impulso de tensão até 10 kV, que estão sendo utilizados nos laboratórios do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS, e dando bons resultados técnicos.

ABSTRACT

The problems caused by atmospheric discharges over telephonic networks are known for a long time. In order to insure an adequate electric protection, it is necessary the constant verification of the quality and performance of the protector devices, through experiences and realization of simulations in experimental networks systematically. Thus, it is necessary to reckon on appropriate and reliable equipments, and that reproduce perfectly the characteristics of the desirable surges. If possible, these surges should be normalized and reproducible. This work investigates two kinds of voltage impulse generators, developed to simulation in telephonic networks and to specific tests of spark discharges. From the experimental confirmation described in this work, it was possible to project voltage impulse generators up to 10 kV, which have been used in the laboratories of Research and Development Center - TELEBRÁS, and giving good technical results.

ÍNDICE

	pág.
CAPÍTULO I - " INTRODUÇÃO GERAL "	01
CAPÍTULO II - " FORMAS DE ONDAS DE IMPULSO DE TENSÃO "	
2.1 - Introdução.....	06
2.2 - Formação e Indução de Surtos	
Atmosféricos.....	07
2.3 - Características Principais.....	09
2.4 - Padronização	
2.4.1 - Impulso Atmosférico.....	15
2.4.2 - Impulso de Manobra.....	17
2.5 - Discussão.....	19
CAPÍTULO III - " ESTUDO DOS CIRCUITOS GERADORES DE IMPULSO	
DE TENSÃO "	
3.1 - Introdução.....	23
3.2 - Tipos Principais.....	24
3.3 - Cálculos Teóricos dos Parâmetros RLC ...	25
3.4 - Rendimento.....	29
3.5 - Resultados Numéricos.....	31
3.6 - Curvas Teóricas.....	46
3.7 - Discussão.....	52

CAPÍTULO IV - " ANÁLISE TEÓRICA DO CIRCUITO GERADOR

"PARALELO - SÉRIE" "

4.1 - Introdução.....	53
4.2 - Sistema de Equações	53
4.3 - Variação Permissível dos Parâmetros do Circuito.....	56
4.4 - Circuito Gerador de Rampas de Tensão....	67

CAPÍTULO V - " COMPOSIÇÃO DO GERADOR "

5.1 - Introdução.....	70
5.2 - Componentes Básicos.....	70
5.3 - Diagrama Geral.....	79
5.4 - Circuito de Alimentação de Energia	
5.4.1 - Controlador de Carregamento.....	81
5.4.2 - Transformador de Alta.....	82
5.4.3 - Circuito de Retificação.....	83
5.4.4 - Controle de Polaridade.....	83
5.5 - Circuito de Disparo do Gerador.....	84
5.6 - Sistema de Medição.....	86
5.6.1 - Equipamentos para Medição de Impul- so.....	88
5.6.1.a - Divisores de Tensão.....	89
5.6.1.a.1 - Divisor para Tensão Contínua.	90
5.6.1.a.2 - Divisor Capacitivo.....	91
5.6.1.b - Voltímetro de Pico.....	93
5.7 - Sistema de Proteção.....	93

CAPÍTULO VI - " PARTE EXPERIMENTAL "

6.1 - Introdução.....	95
6.2 - Componentes Básicos	
6.2.1 - Capacitores.....	95
6.2.2 - Resistores.....	98
6.3 - Comprovação Prática	
6.3.1 - Formas de Ondas.....	104
6.3.2 - Indutância.....	111
6.3.3 - Rendimento.....	113
6.4 - Particularidades Práticas na Composição do Gerador de Impulso	
6.4.1 - Circuito de Carregamento.....	115
6.4.2 - Transformador de Alta.....	115
6.4.3 - Circuito de Disparo do Gerador..	116
6.4.4 - Sistema de Medição	
6.4.4.1 - Divisores de Tensão.....	118
6.4.4.2 - Voltímetro de Pico.....	128

CAPÍTULO VII - " CONCLUSÕES ".....129

APÊNDICE A - " PROGRAMA PARA ESTUDO DA VARIAÇÃO DA FORMA DE ONDA DE IMPULSO DE TENSÃO "

A.1 - Fluxograma.....	133
A.2 - Listagem.....	134

BIBLIOGRAFIA.....141

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

As redes telefônicas estão sujeitas a perturbações elétricas não permanentes, provenientes de descargas atmosféricas e de surtos originados pelas operações de manobra em sistemas de energia elétrica instalados nas proximidades [43,44].

Estes surtos são do tipo transitório (unipolar), e frequentemente atingem a valores de alguns kilovolts de pico de tensão [41], podendo ter, na sua duração e nas suas características, de microsegundos até milissegundos.

Como conseqüências, estes transitórios eletromagnéticos podem levar ao mau funcionamento, a falhas ou a danos dos materiais e equipamentos das redes telefônicas.

Nas últimas décadas, com o desenvolvimento tecnológico e a utilização de materiais de estado sólido nos equipamentos componentes das redes telefônicas, tornaram os mesmos mais sensíveis, portanto, mais vulneráveis a estes tipos de transitórios, exigindo dessa forma, mais rigor e eficiência na sua proteção elétrica [48].

No Brasil, com a crescente melhoria no grau de serviço prestado pelas Operadoras do Sistema Telefônico Brasileiro, verificou-se que algumas áreas careciam de recursos técnicos condizentes com a nova realidade de operação.

Especificamente, identificou-se como um dos maiores problemas a ineficiente e inadequada proteção elétrica do sistema

telefônico , que , através das consequências já citadas , aumenta o risco de acidentes com funcionários, usuários e o público em geral.

Para se realizar uma proteção elétrica adequada da rede telefônica , diante dessa perturbação elétrica, é necessário de um lado, conhecer a origem e as características dos surtos que a atingem, e do outro, conhecer o comportamento dos dispositivos de proteção dos equipamentos em relação a estes surtos [45].

Quanto às características , os surtos encontrados em redes telefônicas abrangem uma gama razoável de formas de tensão, assim como de níveis de tensões de pico [46,47]. Esta variação é mais acentuada quando se trata de surtos atmosféricos , não se encontrando uma uniformidade nos dados de formas de onda e nem dos níveis de tensão nas literaturas especializadas a respeito.

Em relação aos comportamentos dos materiais , dispositivos de proteção e equipamentos , estes podem ser obtidos através de ensaios ou simulações em laboratórios ou em campos de provas.

Para que os objetivos da proteção sejam alcançados, é necessário que os ensaios assim como as simulações, sejam efetuados em condições mais reais e mais precisas possíveis, objetivando definir os níveis aceitáveis de proteção exigidos pelos diversos segmentos da rede telefônica , principalmente aqueles localizados em climas e situações adversas.

Os ensaios , assim como certas simulações são geralmente realizados baseando-se em critérios pré-estabelecidos e reconhecidos pelos organismos internacionais de padronização [14].

Um dos objetivos desta padronização é que os resultados sejam reproduzíveis, a fim de que os mesmos possam ser comparados com os resultados de outros laboratórios ou campos de testes, obtidos nas mesmas situações e condições experimentais.

Para que isso seja possível, é necessário a utilização de equipamentos que reproduzam os surtos a serem verificados ou aplicados com certa exatidão, e que os instrumentos de medidas também estejam dentro dos padrões reconhecidos internacionalmente.

O objetivo principal deste trabalho é contribuir com o estudo e desenvolvimento dos chamados Geradores de Impulso de Tensão (GIT), utilizados nos testes e simulações de surtos de componentes e equipamentos da rede telefônica.

Até o momento, o desenvolvimento de Geradores de Impulso de Tensão, no Brasil, fica restrito a poucos casos particulares. Já a comercialização destes equipamentos é realizada somente a nível de importação.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivos adicionais:

- analisar as três principais alternativas de geradores de impulso de tensão (até 10 kV). Nesta análise, são dados os detalhes técnicos mais importantes, como, por exemplo, formulações matemáticas, indutâncias máximas permissíveis, rendimentos e cargas máximas, que viabilizam as formas de ondas nestes geradores de apenas um estágio;
- calcular com rapidez e precisão os parâmetros elétricos (resistências e capacitâncias) responsáveis pela formação de impulsos de tensão, com as constantes de tempo desejadas;

- escolher o circuito gerador mais adequado para as funções requeridas ;
- obter uma visão geral , teórica e prática , de todos os sistemas básicos componentes do gerador de impulso .

As formas de onda , os níveis de tensão e a energia utilizados nesse estudo obedecem às normas vigentes nos principais países , e reconhecidas internacionalmente pelos especialistas em proteção de um sistema telefônico.

Os impulsos de corrente , outra grandeza elétrica de vital importância no estudo de proteção elétrica, logicamente não serão abordados nesta pesquisa , pois os circuitos geradores destes impulsos possuem características , teorias básicas , normalizações e finalidades diferentes do objetivo principal desse trabalho.

Em um rápido resumo das várias etapas dessa pesquisa , pode-se dizer que o Capítulo II enfoca os tipos , as características e como se formam as ondas de impulso de tensão padronizadas , frequentemente utilizadas nos testes e simulações dos diversos componentes da rede telefônica.

O Capítulo III analisa e determina as principais diferenças entre os circuitos geradores mais usados na atualidade , entre as quais o rendimento e a aplicação.

O Capítulo IV se fixa na análise teórica detalhada do circuito gerador de melhor qualidade e adequação aos nossos propósitos. Esse estudo abrange as possíveis variações e relações dos parâmetros elétricos RLC e suas características.

O Capítulo V dá a composição geral do gerador de impulso envolvendo circuito de retificação , sistema de disparo e

sistema de medição entre outros . Complementa sobretudo as as informações a respeito de um gerador de impulso de tensão do do tipo convencional (de um estágio).

A comprovação prática da teoria envolvida é efetuada no Capítulo VI , onde são mostradas também as particularidades de um gerador construído no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Estadual de Campinas , para o projeto : "Proteção Elétrica e DGs", através de um convênio UNICAMP / TELEBRÁS / FTPT (Contrato D46/83 - JDPqD).

Por fim , as conclusões e as observações finais , bem como sugestões para continuação deste trabalho , estão detalhadas no Capítulo VII .

CAPÍTULO II

FORMAS DE ONDAS DE IMPULSO DE TENSÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

Para se conseguir uma boa proteção elétrica da rede telefônica contra surtos de tensão, é necessário conhecer as características dos surtos atmosféricos induzidos em uma linha de transmissão [50-53], bem como conhecer a indução do sistema de potência na vizinhança da linha telefônica.

No nosso trabalho, não nos preocupamos em conhecer profundamente a origem e as características dos surtos que atingem uma rede telefônica [49,54]. Procuramos conhecer e viabilizar os mais frequentes impulsos de tensão, originados e induzidos por descargas atmosféricas [34], que são estabelecidos por normas nacionais e internacionais.

Estas formas de ondas impulsivas são uma das características principais dos Geradores de Impulso de Tensão, que é o objeto de nosso estudo.

2.2 - FORMAÇÃO E INDUÇÃO DE SURTOS ATMOSFÉRICOS

Em certas condições atmosféricas, uma nuvem poderá vir a se carregar eletricamente com um certo potencial em relação à terra. No instante em que se efetivar uma certa diferença de

potencial entre ambas , poderá ocorrer uma descarga ("flashover") para a terra , através de um canal pelo ar atmosférico [40].

Na ocorrência de uma descarga atmosférica , campos elétricos e magnéticos aparecem na atmosfera . Se a condutividade da terra for ideal , somente aparecem campos elétricos verticais. Mas , a condutividade da terra sendo finita , ocorrerá uma inclinação do campo elétrico em direção das ondas eletromagnéticas , aparecendo um campo elétrico horizontal . Os dois campos elétricos causam uma força eletromagnética sobre os cabos telefônicos. Embora o campo elétrico horizontal seja mais fraco do que o campo vertical , ocorre maior quantidade de surtos atmosféricos produzidos por campos elétricos horizontais [57].

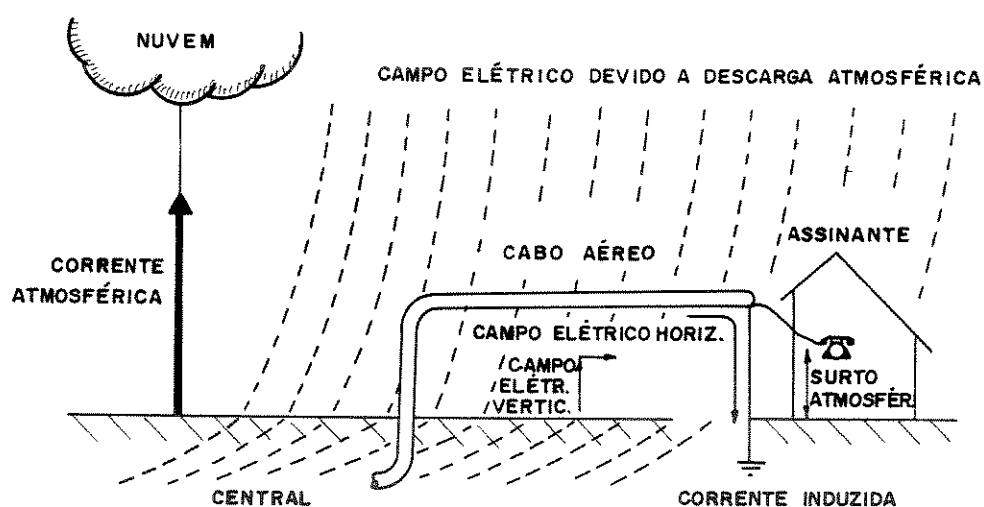


Figura 1 - Mecanismo de indução de surtos atmosféricos sobre as linhas telefônicas.

Uma onda genérica do surto atmosférico (através dos pares telefônicos e a terra) foi calculada com base no modelo da figura 1 e é apresentada na figura 2. Uma onda de surto (impulso) atmosférico genérica , induzida sobre as linhas telefônicas ,

pode conter , por exemplo , um pico rápido em sua frente devido ao campo elétrico vertical e uma lenta oscilação depois do pico devido ao campo elétrico horizontal [57].

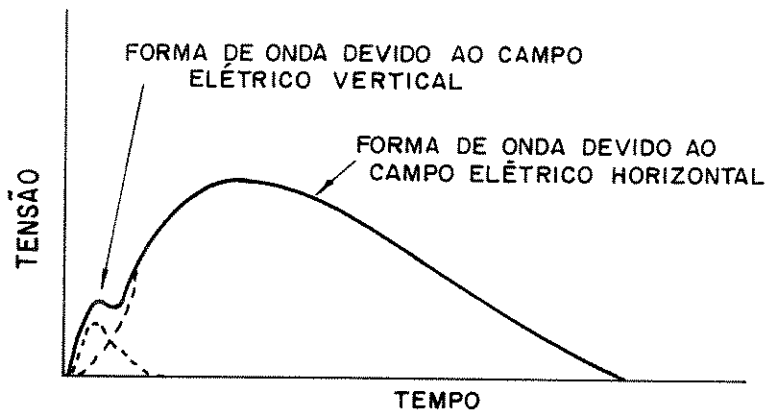


Figura 2 - Onda Genérica do Surto Atmosférico.

Para a simulação destes impulsos em campos de testes ou laboratórios , necessitamos de uma caracterização teórica e de uma padronização destas formas de onda , a fim de que possam ser simulados adequadamente por um Gerador de Impulso de Tensão .

Estes impulsos de tensão são do tipo Dupla Exponencial (fig.3c) . Outro importante tipo de impulso de tensão é o Linear (fig.3b) , também recomendado em algumas normas especializadas em proteção elétrica de rede telefônica [42].

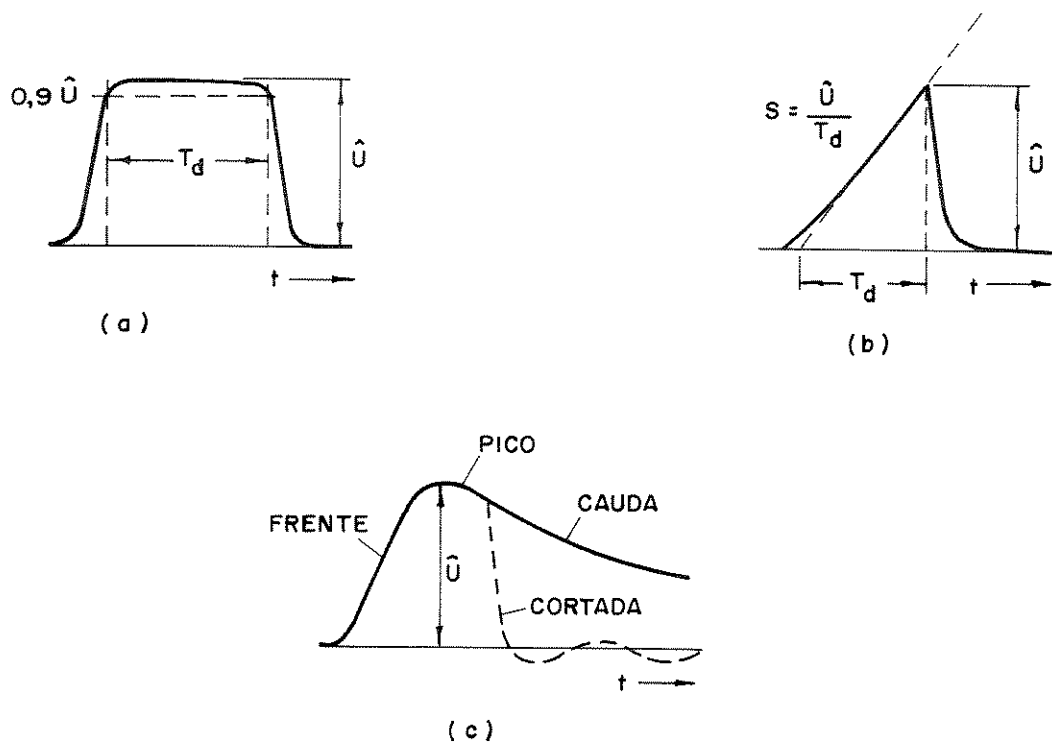


Figura 3 - Principais Tipos de Impulsos de Tensão :

a) Quadrada ; b) Linear ; c) Dupla Exponencial.

2.3 - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

A onda de impulso de tensão do tipo dupla exponencial pode ser teoricamente considerada, em uma análise mais simplificada, como sendo a diferença entre duas funções exponenciais com constantes de tempo T_1 e T_2 , respectivamente.

Para facilidade de cálculos analíticos, a onda de impulso de tensão pode ser representada por [42] :

$$u(t) = k \left(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2} \right) \quad (\text{eq. 1})$$

A figura 4 mostra as duas exponenciais e o impulso resultante.

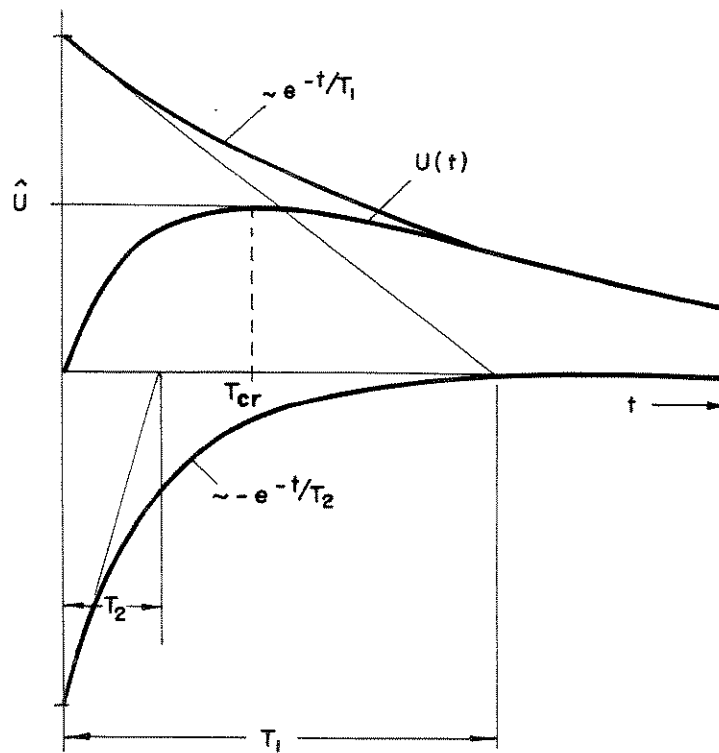


Figura 4 - Representação Gráfica da Onda de Impulso de Tensão

Essa representação simplificada permite a identificação de algumas características importantes das ondas reais de impulso, como por exemplo: a inclinação da frente, a amplitude e a inclinação da cauda. Algumas outras características que possam estar presentes em ondas reais, como por exemplo, oscilações sobrepostas ou variação muito lenta da tensão, no ponto próximo ao início do impulso [10], não estão representadas nessa função simplificada.

As ondas de impulso de tensão do tipo dupla exponencial podem ser reproduzidas em um Gerador de Impulso de Tensão, cujo

esquema está exemplificado na figura 5. [5B]

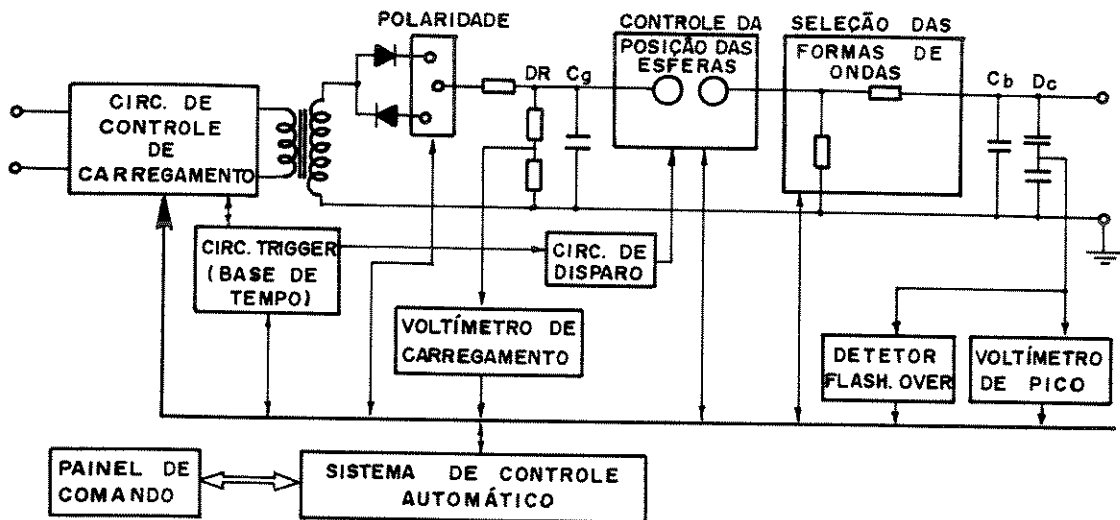


Figura 5 - Esquema Simplificado de um Gerador de Impulso de Tensão (de um estágio). (DR = divisor resistivo; Cg = capacitores do gerador; Cb = capacitância de carga; Dc = divisor capacitivo).

Inicialmente, carregam-se os capacitores do gerador (Cg) com uma energia fornecida por um sistema de alimentação de alta tensão retificada, até um valor pré-determinado pelo operador. Após esta fase, a energia armazenada é descarregada, através de "gaps" de chaveamento, sobre o circuito gerador, formado basicamente de resistências e capacitâncias, e simultaneamente carregam os demais capacitores existentes, como o divisor de impulso de tensão, as capacitâncias parasitas, além do objeto sob teste.

O processo continua até que o nível da tensão de descarga dos capacitores (Cg) se iguale ao nível da tensão de carregamento das capacitâncias acima citadas. Neste momento, estabelece-se a "crista do impulso", e o valor da tensão neste ponto é denominado "tensão de pico" (ou "de crista").

A porção compreendida entre a origem e o pico é comumente denominada "frente de onda", e o intervalo de tempo correspondente é o "tempo de frente de onda".

Para surtos resultantes de descargas atmosféricas, o tempo requerido para atingir o valor de pico é da ordem de 1 μ s. Elas são denominadas sobretensões atmosféricas. As tensões geradas em um laboratório para simular essas sobretensões são chamadas "tensões impulsivas atmosféricas" [38].

Para surtos que ocorrem em consequência de operações de chaveamento em sistemas de alta tensão, o tempo decorrido para alcançar o valor de pico é pelo menos 100 μ s. Sua reprodução no laboratório é efetuada pelas "tensões impulsivas de manobra". Elas são aproximadamente do mesmo formato que as tensões impulsivas atmosféricas, mas consideravelmente mais longas.

Após atingir a tensão de pico, todos os componentes capacitivos, que estavam com a mesma diferença de potencial, descarregam-se em paralelo para a "terra", constituindo assim a chamada "cauda da onda".

O intervalo de tempo entre o pico e o ponto onde a tensão atinge 50 % do valor máximo é denominado "tempo de meio valor" (ou "de cauda").

Como o circuito gerador pode ser representado por um

circuito RLC , podem ocorrer oscilações na onda da tensão , como as apresentadas na figura 6. [26]

Isso é causado pela inevitável indutância dos elementos do circuito e suas disposições físicas [11], podendo resultar em pelo menos um ponto de inflexão na frente da onda , e também oscilações.

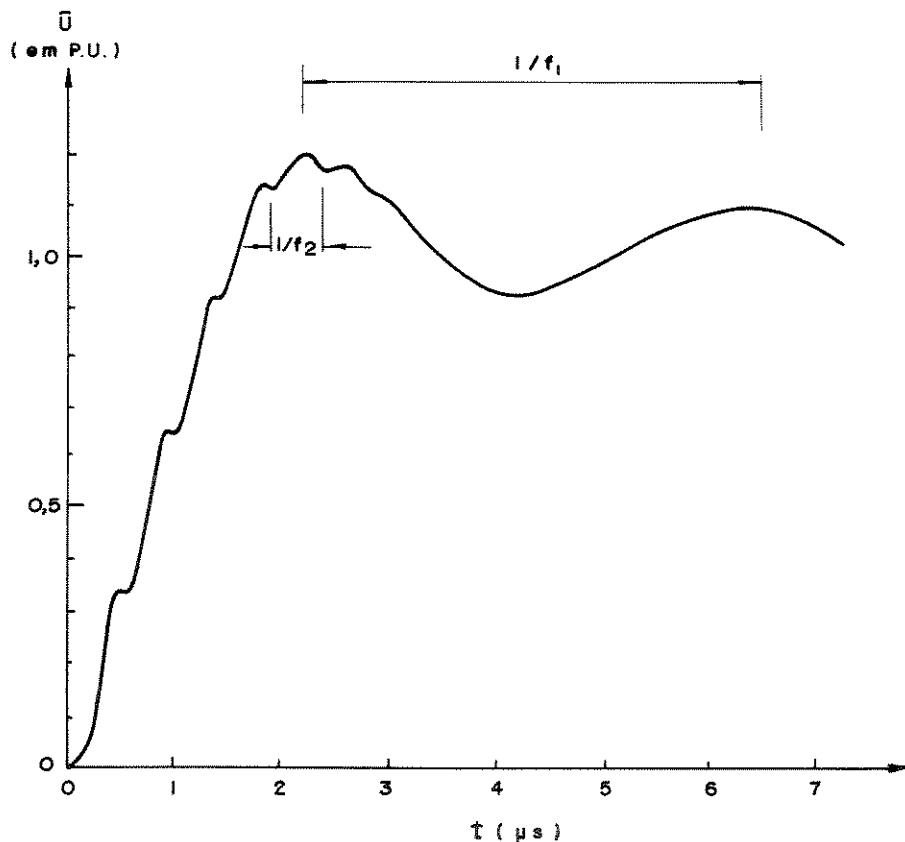


Figura 6 - Possíveis Oscilações em um Impulso de Tensão.

As frequências f_1 e f_2 das oscilações que podem aparecer numa onda de impulso de tensão podem ser calculadas teoricamente, a partir dos elementos do gerador de impulso [8] :

$$f_1 = \left(2\pi \cdot \sqrt{(L_s + L_c) \cdot C_g \cdot (C_{ot} + C_p) / (C_g + C_{ot} + C_p)} \right)^{-1} \quad (\text{eq. 2})$$

$$f_2 = \left(2\pi \cdot \sqrt{L_c \cdot C_{ot} \cdot C_p / (C_p + C_{ot})} \right)^{-1}$$

(eq. 3)

onde :

Cg - Capacitância de impulso do gerador

Cot - Capacitância do objeto sob teste

Cp - Capacitância parasita para a "terra"

Ls - Indutância do gerador de impulso

Lc - Indutância do circuito de ensaio

A amplitude destas oscilações não pode exceder 5 % do valor da tensão de pico. É assumido, nesse caso, que a frequência das oscilações [15] é de pelo menos 0,5 MHz.

2.4 - PADRONIZAÇÃO

A principal associação internacional de normalização é a IEC (International Electrotechnical Commission). As demais : ANSI - American National Standards Institute ; VDE - Verband Deutscher Elektrotechniker ; ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas ; por exemplo , são associações normativas de seu respectivo país. Elas obedecem os limites dos padrões de ondas de impulso de tensão da IEC e estabelecem normas para serem utilizadas em ensaios de alta tensão [14-16].

2.4.1 - Impulso Atmosférico

A onda de impulso atmosférico padronizada pela IEC é de $1,2 \mu\text{s} / 50 \mu\text{s}$ (tempo de frente / tempo de cauda).

A figura 7 mostra como os tempos de frente e de cauda da onda são obtidos.

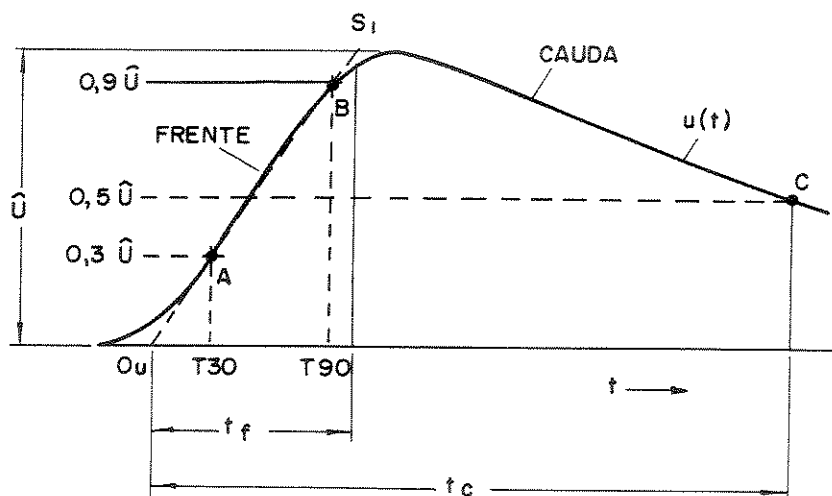


Figura 7 - Onda de Impulso Atmosférico (IEC)

onde :

T30 e T90 - são os pontos em que a onda atinge 30 % e 90 % da tensão de crista , respectivamente.

tf - tempo de frente de onda

tc - tempo de cauda da onda

0v - zero virtual

O tempo de frente é igual a 1,67 vezes o intervalo de tempo compreendido entre os pontos de 30 % e 90 % do valor da tensão de crista. A explicação para o parâmetro 1,67 baseia-se em simples relação de triângulos obtidos pela figura 7 :

$$\frac{tf - 0v}{T90 - T30} = \frac{V}{0,9 V - 0,3 V}$$

ou seja,

$$\frac{tf}{T90 - T30} = \frac{1}{0,6}$$

logo,

$$tf = 1,67 (T90 - T30) \quad (\text{eq. 4})$$

Segundo a IEC, o tempo de cauda da onda é o intervalo de tempo medido a partir do zero virtual (0v) até o valor de 50% do

valor da tensão de crista (na fase do decaimento). O zero virtual é determinado pelo cruzamento da reta que une os pontos que representam 30% e 90% do valor de pico com o eixo dos tempos.

A onda de impulso atmosférico padronizada pela ANSI é de $1,5 \mu s / 40 \mu s$, também medidos a partir do zero virtual (0v) e definidos da seguinte forma [13] :

- O tempo de frente é igual a 2 vezes o intervalo de tempo compreendido entre os instantes de 30% e 90% do valor da tensão de pico.

- O tempo de cauda é medido conforme definição da IEC.

Entretanto, a onda de impulso atmosférico padronizada pela VDE é $1,0 \mu s / 50 \mu s$, medidos a partir do zero virtual (0v) e definidos da seguinte maneira [13] :

- O tempo de frente é estabelecido pelo intervalo entre o zero virtual e o ponto de encontro entre a reta que passa pelos pontos que representam 10% e 90% do valor de crista, e o eixo dos tempos

- O tempo de cauda é medido conforme definição da IEC.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) segue as normas da IEC para a padronização do impulso atmosférico [17,18].

2.4.2 - Impulso de Manobra

A onda de impulso de manobra padronizada pela IEC é de $250 \mu s / 2500 \mu s$ (tempo de frente / tempo de cauda).

O tempo de cauda é medido da mesma maneira que o tempo de cauda do impulso atmosférico (50% do valor de pico).

Quanto ao tempo de frente do impulso de manobra, esta-

belece-se pelo intervalo entre a origem e o tempo correspondente ao valor de crista, como pode ser visto na figura 8.

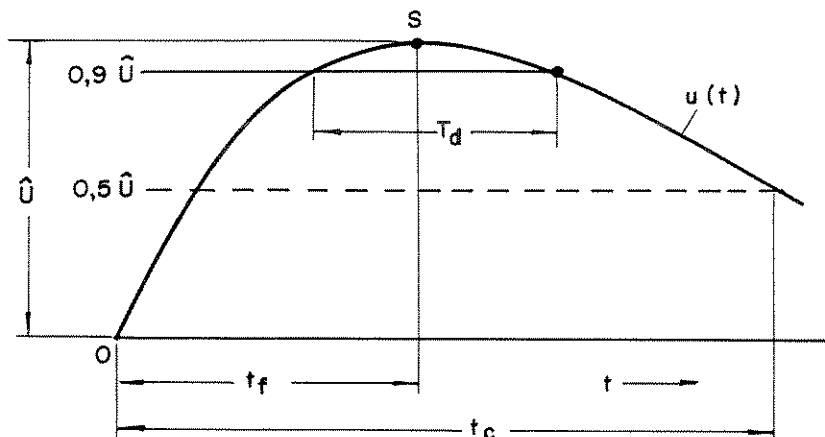


Figura 8 - Onda de Impulso de Manobra (IEC)

Devido às tolerâncias apresentadas pela IEC, as demais entidades normalizadoras aceitaram empregar os valores da IEC, que são:

- para o impulso atmosférico:

- tolerância para o tempo de frente = +/- 30 %
- faixa de aceitação para o tempo de frente de onda = $0,84 \mu s \leq t_f \leq 1,56 \mu s$
- tolerância para o tempo de cauda de onda = +/- 20 %
- faixa de aceitação para o tempo de cauda de onda = $40 \mu s \leq t_c \leq 60 \mu s$

- para impulsos de manobra:

- tolerância para o tempo de frente de onda = +/- 20 %
- faixa de aceitação para o tempo de frente de onda = $200 \mu s \leq t_f \leq 300 \mu s$
- tolerância para o tempo de cauda de onda = +/- 60 %
- faixa de aceitação para o tempo de cauda de onda = $1000 \mu s \leq t_c \leq 4000 \mu s$

2.5 - DISCUSSÃO

Os surtos encontrados em sistemas telefônicos abrangem uma gama muito grande de amplitude e formas de onda de tensão.

Naturalmente, não é possível, sob o ponto de vista técnico e econômico, incorporar todos os tipos de surtos de tensão normalizados em um único equipamento de testes.

Fazendo um levantamento das normas e recomendações para testes com impulsos de tensão em equipamentos, protetores e sistemas de Telecomunicações, podemos resumi-lo no quadro 1. [59]

Quadro 1

ESPECIFICAÇÃO	FORMAS DE ONDA	AMPLITUDE
IEC 884	1,2 / 50 μ s	variável
	Aplicação : Isolamento em sistemas e equipamentos de baixa tensão.	
CCITT IX	10 / 700 μ s	1,5 - 5,0 kV
k.15 e k.17	100 / 700 μ s	1,5 - 3,0 kV
	Aplicação: repetidores e componentes, cabos, protetores e sistemas de Telecomunicações	
CNET TMA/PRL/197 (1976)	0,5 / 700 μ s	5 kV
NT/DAS/PRL 003 (1977)	0,5 / 700 μ s 1,2 / 50 μ s	5 kV 10 kV
ST/LAA/RLM/51 (1980)	0,5 / 700 μ s	2 kV

ST/LAA/RLM/88 (1981)	0,5 / 700 μ s 1,2 / 50 μ s	5 kV 10 kV
	Aplicações: amplificadores de linha de assinantes , telefone , telégrafo , central telefônica e telex .	
FCC Docket 19528/Part 68 FCC Sec.68.302 Title 47	10 / 560 μ s 10 / 160 μ s 2 / 10 μ s	800 V 1500 V 2500 V
	Aplicações : equipamentos de Telecomunicações .	
FTZ 4391 TV1 (German Post Office)	10 / 700 μ s	2500 V
	Aplicações : cápsula de microfone de telefone .	
PTT 692.01 (1966)	1,0 / 50 μ s	4,0 kV
	Aplicações : sistemas e equipamentos de comutação telefônica .	
CCITT IX k.12 (1981)	5 / 65 μ s 1 kV / μ s	5,0 kV 5,0 kV

	Aplicação : protetores a gás	
IEEE 465.1 (1977)	100 V / μ s 500 V / μ s 5 kV / μ s 10 kV / μ s	- - - -
	Aplicação : protetores a gás	
TELEBRAS 235.610-506 (1985)	100 V / μ s 1 kV / μ s	2 kV 5 kV
	Aplicações : centelhadores tripolares a gás .	
VDE 0845 14.78 DIN 57845	1,2 / 50 μ s 1 kV / μ s	3,5 - 10 kV -
	Aplicações : protetores a gás , dispositivos de proteção , spark-gaps e cabos .	
FTZ 47771 TV (German Post Office)	1 kV / μ s	5 kV

A partir deste levantamento resumido no quadro nº 1 , foi possível estabelecer as formas de ondas que o gerador de impulso de tensão , relatado neste trabalho , deve simular.

Determinamos que uma quantidade de formas de ondas viável tecnicamente deve ser estudada e implantada , para que se possa abranger os casos mais frequentes de simulação e testes da rede telefônica atual.

Para a simulação de impulso atmosférico , a forma de onda $1,2 / 50 \mu s$ é a mais recomendada pelos principais órgãos normativos desta área , reconhecidos internacionalmente .

As formas de ondas $10 / 700 \mu s$ e $100 / 700 \mu s$ são recomendadas pelo CCITT , e suas aplicações são bem abrangentes na área de Telecomunicações [19-21].

Considerando que a experiência de propagação de ondas impulsivas numa linha de transmissão de grande comprimento , nos mostra uma duração maior do que a de linha curta , e que este gerador estudado também é dedicado à simulação de diferentes comprimentos de linha , as formas $10 / 1000 \mu s$ e $100 / 1000 \mu s$ foram incluídas em nosso trabalho .

Para atender aos estudos de proteção elétrica [45] efetuada principalmente por centelhadores tripolares a gás , difundida amplamente no Sistema Telefônico Brasileiro , optou-se pela prática Telebrás 235.610-506 , onde são padronizadas as ondas $100 V / \mu s$ e $1 kV / \mu s$ para os testes de tensões impulsivas [22,23].

CAPÍTULO III

ESTUDO DOS CIRCUITOS GERADORES DE IMPULSO DE TENSÃO

3.1 - INTRODUÇÃO

Nós vimos no capítulo anterior as formas de ondas impulsivas que foram estudadas e implantadas nos nossos geradores .

O próximo passo foi estudar teoricamente os principais tipos de circuito gerador , parte efetivamente responsável pelo estabelecimento das formas impulsivas das ondas .

Vários estudos sobre as características de geradores de impulso dupla-exponencial foram realizados após a época da sua criação por Marx [1-9]. Dentre eles podemos destacar um publicado em 1957 por G. Ellesworth [7], e outro publicado em 1964 por Otmar Etzel e Gunter Helmchen [9] .

Após uma avaliação técnica mais detalhada destes dois artigos , pudemos observar a praticabilidade e a precisão nos cálculos dos parâmetros elétricos da teoria desenvolvida por Otmar Etzel e Gunter Helmchen .

A partir daí , nós apresentamos neste capítulo os principais tipos de circuitos geradores utilizados na prática , analisando a sua teoria envolvida para o cálculo dos parâmetros elétricos RLC . Outro ponto importante , que foi analisado e que serviu de base para as comparações , é o rendimento dos geradores .

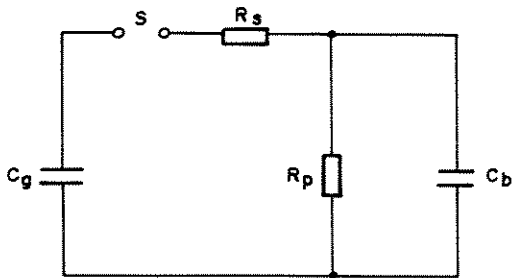
Na parte final deste capítulo , são realizadas várias simulações teóricas sobre os parâmetros elétricos dos circuitos

geradores , possibilitando uma opção pelo melhor ou mais adequado das três alternativas .

3.2 - TIPOS PRINCIPAIS

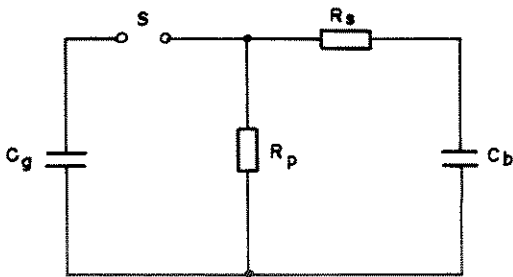
As três formas simplificadas do circuito gerador de impulso de tensão largamente empregadas são :

a) Circuito "A" : " SÉRIE - PARALELO "

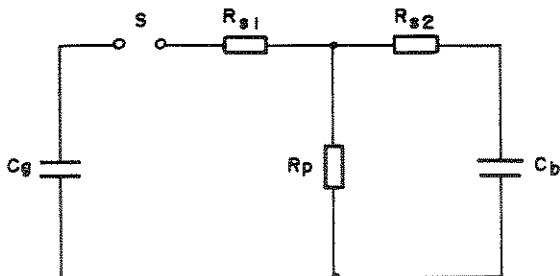


C_g = capacitância do gerador
 C_b = capacitância da carga
 R_s = resistência série
 R_p = resistência paralela
 s = "spark gap"

b) Circuito "B" : " PARALELO - SÉRIE "



c) Circuito "C" : " SÉRIE - PARALELO - SÉRIE "



R_{s1} = resistência série 1
 R_{s2} = resistência série 2
 $R_{s2} = x \cdot R_{s1}$
 x = fator que relaciona as resistências séries R_{s1} e R_{s2} .

3.3 - CÁLCULOS TEÓRICOS DOS PARÂMETROS R L C

Para o projeto de circuitos geradores de impulsos de tensão, é necessário estabelecer relações entre os valores dos elementos do circuito e as características da forma de onda [9].

Circuito "A" :

$$R_s = \frac{l}{2C_g} \left[(T_1 + T_2) - \sqrt{(T_1 + T_2)^2 - 4T_1 \cdot T_2 \left(\frac{C_g}{C_b} + 1 \right)} \right] \quad (\text{eq. 5})$$

$$R_p = \frac{l}{2(C_g + C_b)} \left[(T_1 + T_2) + \sqrt{(T_1 + T_2)^2 - 4T_1 \cdot T_2 \left(\frac{C_g}{C_b} + 1 \right)} \right] \quad (\text{eq. 6})$$

Circuito "B" :

$$R_s = \frac{l}{2C_b} \left[(T_1 + T_2) - \sqrt{(T_1 + T_2)^2 - 4T_1 T_2 \left(\frac{C_b}{C_g} + 1 \right)} \right] \quad (\text{eq. 7})$$

$$R_p = \frac{l}{2(C_g + C_b)} \left[(T_1 + T_2) + \sqrt{(T_1 + T_2)^2 - 4T_1 T_2 \left(\frac{C_b}{C_g} + 1 \right)} \right] \quad (\text{eq. 8})$$

Circuito "C" :

$$R_{s1} = \frac{(T_1 + T_2)(1 + x) - \sqrt{(T_1 + T_2)^2 (1 + x)^2 - 4T_1 T_2 \left[\left(\frac{C_g}{C_b} + 1 + x^2 + x^2 \frac{C_b}{C_g} \right) \right]}}{2(C_g + x^2 C_b)}$$

(eq. 9)

$$R_p = \left\{ \frac{2 (T_1 + T_2) (C_g + x^2 C_b) - (C_g + x C_b) \left[(T_1 + T_2) (1 + x) - \sqrt{(T_1 + T_2)^2 (1 + x)^2 - 4 T_1 T_2 (C_g / C_b + 1 + x^2 + x^2 C_b / C_g)} \right]}{2 (C_g + C_b) (C_g + x^2 C_b)} \right\} \quad (\text{eq. 10})$$

$$R_{s2} = x \cdot R_{s1} \quad (\text{eq. 11})$$

onde :

T_1 = constante de tempo , relacionada com t_c (tempo de meio valor).

T_2 = constante de tempo , relacionada com t_f (tempo de frente).

$$T_1 = a \cdot t_c \quad (\text{eq.12})$$

$$T_2 = (b / 2) \cdot t_f \quad (\text{eq.13})$$

onde "a" e "b" são obtidos dos gráficos das figuras nº 9 e 10 .

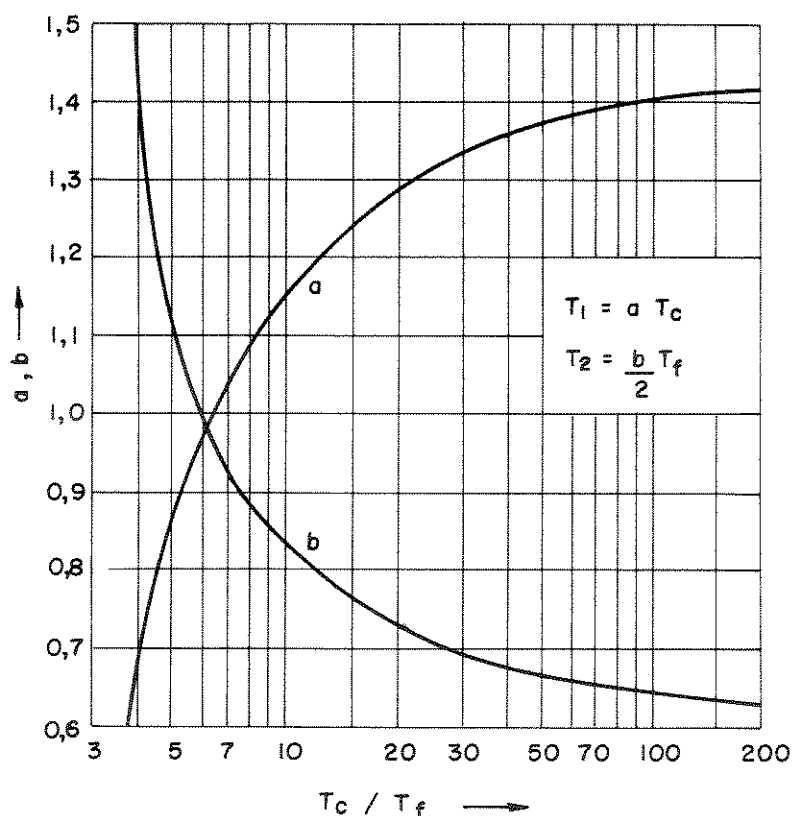


Figura 9 - Transformação de tempos reais em constantes de tempo.

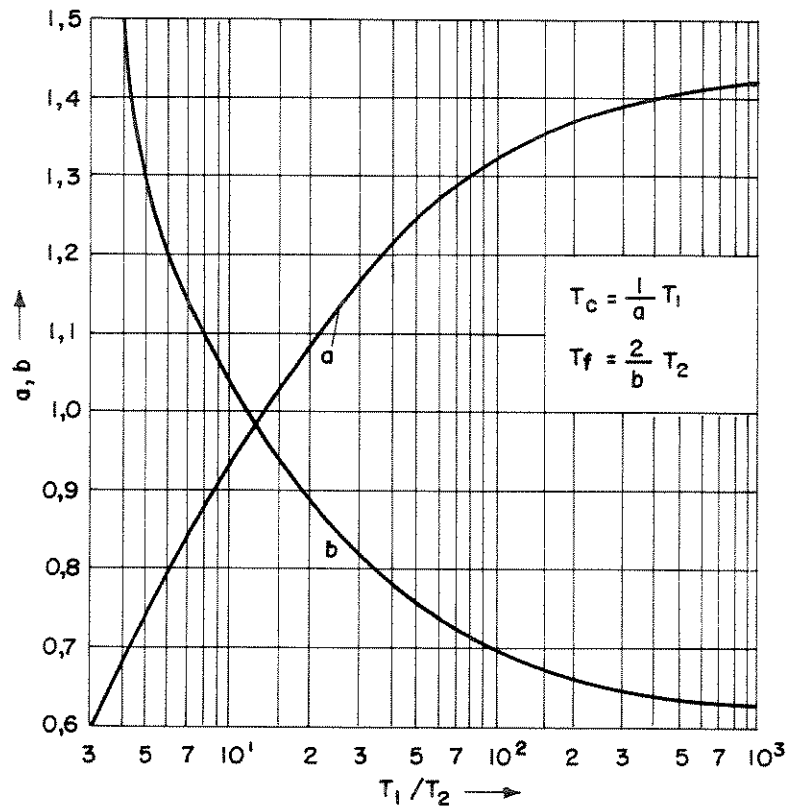


Figura 10 - Transformação das constantes de tempo em tempos reais.

Obtidos os valores dos parâmetros elétricos, as constantes T_1 e T_2 podem ser determinadas a partir de :

Circuito "A" :

$$T_1 = \frac{1}{2} \left\{ R_p \cdot C_b + (R_s + R_p) C_g + \sqrt{[R_p C_b + (R_s + R_p) C_g]^2 - 4 R_s R_p C_g C_b} \right\} \quad (\text{eq. 14})$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \left\{ R_p \cdot C_b + (R_s + R_p) C_g - \sqrt{[R_p C_b + (R_s + R_p) C_g]^2 - 4 R_s R_p C_g C_b} \right\} \quad (\text{eq. 15})$$

Circuito "B" :

$$T1 = \frac{1}{2} \left\{ R_p \cdot C_g + (R_s + R_p) C_b + \sqrt{[R_p C_g + (R_s + R_p) C_b]^2 - 4 R_p R_s C_g C_b} \right\}$$

(eq. 16)

$$T2 = \frac{1}{2} \left\{ R_p \cdot C_g + (R_s + R_p) C_b - \sqrt{[R_p C_g + (R_s + R_p) C_b]^2 - 4 R_p R_s C_g C_b} \right\}$$

(eq. 17)

Circuito "C" :

$$T1 = \frac{1}{2} \left\{ R_{s1} (C_g + x \cdot C_b) + R_p (C_g + C_b) + \sqrt{[R_{s1} (C_g + x C_b) + R_p (C_g + C_b)]^2 - 4 R_{s1} R_p C_g C_b [1 + x + x (R_{s1} / R_p)]} \right\}$$

(eq. 18)

$$T2 = \frac{1}{2} \left\{ R_{s1} (C_g + x \cdot C_b) + R_p (C_g + C_b) - \sqrt{[R_{s1} (C_g + x C_b) + R_p (C_g + C_b)]^2 - 4 R_{s1} R_p C_g C_b [1 + x + x (R_{s1} / R_p)]} \right\}$$

(eq. 19)

Como já foi citado anteriormente , a tensão de impulso pode ser descrito como a composição de duas exponenciais negativas.

$$u (t) = k (e^{-t/T1} - e^{-t/T2}) \quad (\text{eq. 20})$$

sendo que esta constante "k" é dada por :

- Para os circuitos "A" e "B" :

$$k = \frac{U_0 \cdot T_1 \cdot T_2}{R_s \cdot C_b \cdot (T_1 - T_2)} \quad (\text{eq. 21})$$

- Para o circuito "C" :

$$k = \frac{U_0 \cdot T_1 \cdot T_2}{R_{s1} \cdot C_b (1 + x + x (R_{s1}/R_p)) \cdot (T_1 - T_2)} \quad (\text{eq. 22})$$

3.4 - RENDIMENTO

O rendimento de um gerador de impulso de tensão pode ser definido como sendo a razão entre a tensão de pico aplicada sobre a capacitância C_b e a tensão inicial aplicada em C_g [42].

No entanto, conhecendo-se os valores numéricos das resistências R_s e R_p ; das capacitâncias C_g e C_b , e das constantes de tempo T_1 e T_2 , podemos também calcular a sua eficiência, sendo este valor bastante próximo da eficiência real do circuito gerador de impulso [9].

O rendimento para cada um dos circuitos já descritos anteriormente pode ser determinado a partir das seguintes relações :

- Circuito "A" e "B" :

$$\eta = \sqrt{\frac{R_p C_g}{R_s C_b}} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1+T_1/T_2}{2(1-T_1/T_2)}} \quad (\text{eq. 23})$$

- Circuito "C" :

$$\eta = \frac{R_p \cdot C_g}{T_1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{1-T_1/T_2}} \quad (\text{eq. 24})$$

3.5 - RESULTADOS NUMÉRICOS

As simulações teóricas , a seguir , determinam os valores dos componentes resistivos e capacitivos dos três tipos de circuitos geradores já explicados anteriormente , para gerarem as cinco formas de ondas escolhidas.

Os valores das resistências , R_s e R_p , e do rendimento foram obtidos através das equações 5 a 11 e 23 a 24 , respectivamente , e com o auxílio do programa listado no apêndice A.

Pode-se notar que o circuito gerador "A" ("série-paralelo") , nos quadros 2 , 5 , 8 e 13 , apresenta uma pequena faixa de variação possível na relação C_g/C_b . Outra observação importante nestas simulações teóricas para este circuito gerador é quanto ao rendimento máximo possível , que se localiza no intervalo entre 10 e 20 da relação C_g/C_b . E finalmente , não foi possível calcular valores teóricos para a forma de onda 100 / 700 us dentro da relação até $C_g = 1000.C_b$.

O circuito gerador "B" ("paralelo-série") apresentou seus melhores rendimentos com C_g/C_b próximo de 1000 , e um decréscimo de forma exponencial para valores menores.

Já para o circuito "C" ("série-paralelo-série") , o comportamento dos valores de rendimento se alteram em relação à razão C_g/C_b , que se apresenta numa faixa menor que o circuito "paralelo-série". O rendimento máximo acontece para valores próximos de $C_g = 20.C_b$.

Os valores resistivos calculados e exibidos nestes quadros , para formas de ondas com frentes de 1,2 us e 10 us , se apresentaram , em alguns casos , muito próximos de zero. Dentro

das técnicas existentes para a fabricação deste tipo de resistores impulsivos , podemos garantir que estes resistores são tecnicamente inviáveis . Mas estes valores de resistência foram apenas usados para demonstrar teoricamente os comportamentos dos circuitos geradores.

Baseando-se no que foi visto na bibliografia , nas simulações computacionais , e posteriormente nos gráficos , podemos dizer que a Capacitância do Gerador (Cg) mais adequada para o gerador que efetua simuações nas linhas telefônicas é de 20 μ F.

Para chegarmos a este valor , consideramos alguns pontos observados na prática de projetos de redes telefônicas , onde um cabo telefônico pode atingir distâncias até 10 km.

Devido ao fato do sistema de proteção elétrica estar instalado entre cada condutor do par e a terra , devemos considerar como carga do circuito gerador o desequilíbrio capacitivo máximo individual estabelecido pela especificação Telebrás 235-320-701 (1982) : 2625 pF/km.

Outra observação importante é que , embora os circuitos protetores de dispositivos transistorizados em equipamentos de telecomunicações não estejam diretamente expostos a descargas atmosféricas ou a curto-circuitos de alta tensão , correntes induzidas de 100 (A) podem facilmente ocorrer nesses circuitos.

Nas recomendações k.15 e k.17 da CCITT - volume IX , é dado o contorno sobre as necessidades mínimas de checagem e avaliação de itens como repetidores , cabos de telecomunicações , sistemas protetores de sobretensão e semicondutores usados em sistemas de telecomunicações . Entre as necessidades mínimas , dois itens chamam a nossa atenção :

- corrente de curto-circuito : 333 (A) ;
- energia : 250 (J).

Em resumo , as vantagens de se ter $C_g = 20 \mu F$ são :

- a) propiciar menores valores de resistências R_p e R_s ;
- b) poder testar objetos com maiores valores capacitivos ;
- c) maior disponibilidade de energia no gerador ;
- d) maior corrente de curto-circuito na carga ;
- e) melhor rendimento do gerador.

Nestas simulações , utilizamos o valor medido da capacitância do gerador real ($C_g = 20,82 \mu F$) , composta por quatro capacitores de aproximadamente $5 \mu F$, ligados em paralelo.

* Quadro 2

* Circuito "A" : " SÉRIE - PARALELO "				
- Forma de Onda : 1,2 / 50 μs				
- Capacitância do Gerador : 20,82 μF				
C_b [μF]	R_s [Ω]	R_p [Ω]	Rend %	C_g/C_b
0,5205	1,3	1,9	57,2	40
0,6940	0,8	2,4	71,9	30
1,0410	0,5	2,7	79,6	20
2,0820	0,2	2,8	82,6	10
4,1640	0,1	2,6	78,3	5
5,2050	0,09	2,6	75,7	4
6,9400	0,08	2,4	71,4	3
10,4100	0,06	2,2	63,9	2

* Quadro 3

* Circuito "B" : " PARALELO - SÉRIE "				
- Forma de onda : 1,2 / 50 μ s				
- Capacitância do gerador : 20,82 μ F				
Cb [μ F]	Rs [Ω]	Rp [Ω]	Rend. %	Cg/Cb
0,021	19,4	3,4	96,99	1000
0,023	17,4	3,4	96,98	900
0,026	15,5	3,4	96,97	800
0,030	13,6	3,4	96,95	700
0,035	11,6	3,4	96,93	600
0,042	9,7	3,4	96,89	500
0,052	7,8	3,4	96,84	400
0,069	5,8	3,4	96,76	300
0,104	3,9	3,4	96,60	200
0,116	3,5	3,4	96,55	180
0,130	3,1	3,4	96,48	160
0,149	2,7	3,4	96,40	140
0,173	2,3	3,4	96,28	120
0,208	2,0	3,4	96,12	100
0,260	1,6	3,4	95,88	80
0,347	1,2	3,3	95,49	60
0,520	0,8	3,3	94,71	40
1,040	0,4	3,2	92,44	20
2,080	0,2	3,1	88,21	10
4,160	0,1	2,8	80,81	5

* Quadro 4

* Circuito "C" : " SÉRIE - PARALELO - SÉRIE "					
- Forma de Onda : 1,2 / 50 μ s					
- Capacitância do Gerador : 20,82 μ F					
Cb (μ F)	Rs1 (Ω)	Rs2 (Ω)	Rp (Ω)	Rend %	Cg/Cb
0,1301	2,5	2,5	0,7	22,2	160
0,1388	2,2	2,2	1,1	32,7	150
0,1487	1,9	1,9	1,3	39,9	140
0,1602	1,7	1,7	1,6	46,2	130
0,1735	1,5	1,5	1,7	51,8	120
0,1893	1,3	1,3	1,9	56,8	110
0,2082	1,2	1,2	2,1	61,3	100
0,2313	1,0	1,0	2,2	65,6	90
0,2603	0,9	0,9	2,3	69,5	80
0,2974	0,8	0,8	2,5	73,2	70
0,3470	0,7	0,7	2,6	76,6	60
0,4164	0,5	0,5	2,7	79,8	50
0,5205	0,4	0,4	2,8	82,7	40
0,6940	0,3	0,3	2,9	85,1	30
1,0410	0,2	0,2	2,9	86,7	20
2,0820	0,1	0,1	2,9	85,5	10
4,1640	0,06	0,06	2,7	79,6	5
5,2050	0,05	0,05	2,6	76,6	4
6,9400	0,04	0,04	2,4	72,0	3
10,4100	0,03	0,03	2,2	64,2	2

* Quadro 5

* Circuito "A" : " SÉRIE - PARALELO "				
- Forma de Onda : 10 / 700 μ s				
- Capacitância do Gerador : 20,82 μ s				
Cb [μ F]	Rs [Ω]	Rp [Ω]	Rend %	Cg/Cb
0,2974	17,8	28,6	60,2	70
0,3470	13,2	33,1	69,5	60
0,4164	10,1	36,0	75,7	50
0,5205	7,6	38,3	80,4	40
0,6940	5,5	40,0	84,2	30
1,0410	3,5	41,2	86,7	20
2,0820	1,8	41,0	86,1	10
4,1640	1,0	38,2	80,4	5
5,2050	0,8	36,8	77,4	4
6,9400	0,6	34,7	72,8	3
10,4100	0,5	30,9	64,9	2

* Quadro 6

* Circuito "B" : " PARALELO - SÉRIE "				
- Forma de onda : 10 / 700 μ s				
- Capacitância do gerador : 20,82 μ F				
Cb [μ F]	Rs [Ω]	Rp [Ω]	Rend %	Cg/Cb
0,0208	156,1	46,6	98,0	1000
0,0231	140,5	46,6	98,0	900
0,0260	124,9	46,6	98,0	800
0,0297	109,3	46,6	98,0	700
0,0347	93,7	46,6	97,9	600
0,0416	78,1	46,6	97,9	500
0,0521	62,5	46,6	97,9	400
0,0694	48,9	46,5	97,8	300
0,1041	31,3	46,4	97,6	200
0,1157	28,2	46,4	97,6	180
0,1301	25,1	46,4	97,5	160
0,1487	22,0	46,3	97,4	140
0,1735	18,8	46,3	97,3	120
0,2082	15,7	46,2	97,1	100
0,2603	12,6	46,1	96,9	80
0,3470	9,5	45,9	96,5	60
0,5205	6,4	45,5	95,7	40
0,6940	4,8	45,2	94,9	20
2,0820	1,7	42,4	89,2	10
4,1640	0,9	38,9	81,7	5

* Quadro 7

* Circuito "C" : " SÉRIE - PARALELO - SÉRIE "

- Forma de Onda : 10 / 700 μ s

- Capacitância do Gerador : 20,82 μ F

Cb [μ F]	Rs1 [Ω]	Rs2 [Ω]	Rp [Ω]	Rend %	Cg/Cb
0,0833	27,8	27,8	18,9	39,7	250
0,1041	19,8	19,8	26,8	56,2	200
0,1157	17,3	17,3	29,3	61,6	180
0,1225	16,1	16,1	30,5	64,1	170
0,1301	14,9	14,9	31,6	66,5	160
0,1388	13,8	13,8	32,8	68,8	150
0,1487	12,7	12,7	33,8	71,1	140
0,1602	11,6	11,6	34,8	73,2	130
0,1735	10,6	10,6	35,8	75,3	120
0,1893	9,6	9,6	36,8	77,3	110
0,2082	8,7	8,7	37,7	79,3	100
0,2313	7,7	7,7	38,6	81,1	90
0,2603	6,8	6,8	39,5	83,0	80
0,2974	5,9	5,9	40,3	84,7	70
0,3470	5,0	5,0	41,1	86,3	60
0,4184	4,2	4,2	41,8	87,8	50
0,5205	3,3	3,3	42,4	89,1	40
0,6940	2,5	2,5	42,8	90,0	30
1,0410	1,7	1,7	42,9	90,3	20
2,0820	0,9	0,9	41,7	87,7	10
4,1640	0,5	0,5	38,6	81,0	5
5,2050	0,4	0,4	37,1	77,9	4

* Quadro 8

* CIRCUITO "A" : " SÉRIE - PARALELO "				
- Forma de Onda : 10 / 1000 μ s				
- Capacitância do Gerador : 20,82 μ F				
Cb (μ F)	Rs (Ω)	Rp (Ω)	Rend %	Cg/Cb
0,2082	24,1	42,8	62,8	100
0,2313	19,7	47,1	69,1	90
0,2603	16,4	50,3	73,8	80
0,2974	13,7	53,0	77,7	70
0,3470	11,2	55,3	81,0	60
0,4164	9,0	57,2	83,9	50
0,5205	7,0	58,9	86,4	40
0,6940	5,1	60,2	88,4	30
1,0410	3,4	61,0	89,4	20
2,0820	1,7	59,7	87,5	10
4,1640	0,9	55,4	81,2	5
5,2050	0,8	53,3	78,2	4
6,9400	0,8	50,1	73,5	3
10,4100	0,5	44,6	65,4	2

* Quadro 9

* Circuito "B" : " PARALELO - SÉRIE "				
- Forma de onda : 10 / 1000 μ s				
- Capacitância do gerador : 20,82 μ F				
Cb (μ F)	Rs (Ω)	Rp (Ω)	Rend %	Cg/Cb
0,0208	153,9	67,2	98,5	1000
0,0231	138,5	67,2	98,5	900
0,0260	123,1	67,2	98,5	800
0,0297	107,7	67,1	98,5	700
0,0347	92,4	67,1	98,5	600
0,0416	77,0	67,1	98,4	500
0,0521	61,6	67,1	98,4	400
0,0694	46,3	67,0	98,3	300
0,1041	30,9	66,9	98,1	200
0,1157	27,8	66,9	98,1	180
0,1301	24,7	66,8	98,0	160
0,1487	21,7	66,8	97,9	140
0,1735	18,6	66,7	97,8	120
0,2082	15,5	66,6	97,6	100
0,2603	12,4	66,4	97,4	80
0,3470	9,4	66,1	97,0	60
0,5205	6,3	65,6	96,2	40
1,0410	3,2	64,0	93,9	20
2,0820	1,7	61,1	89,6	10
4,1640	0,9	56,0	82,1	5

* Quadro 10

* Circuito "C" : " SÉRIE - PARALELO - SÉRIE "					
- Forma de Onda : 10 / 1000 μ s					
- Capacitância do Gerador : 20,82 μ F					
C_b [μ F]	R_{s1} [Ω]	R_{s2} [Ω]	R_p [Ω]	Rend%	C_g/C_b
0,0521	47,6	47,6	19,6	28,8	400
0,0694	29,6	29,6	37,6	55,1	300
0,1041	17,8	17,8	49,3	72,3	200
0,1157	15,7	15,7	51,3	75,2	180
0,1301	13,8	13,8	53,2	78,1	160
0,1487	11,9	11,9	55,1	80,7	140
0,1735	10,0	10,0	56,8	83,3	120
0,2082	8,3	8,3	58,5	85,8	100
0,2313	7,4	7,4	59,3	86,9	90
0,2603	6,5	6,5	60,0	88,0	80
0,2974	5,8	5,8	60,8	89,1	70
0,3470	4,9	4,9	61,4	90,1	60
0,4164	4,0	4,0	62,0	91,0	50
0,5205	3,2	3,2	62,5	91,7	40
0,6940	2,4	2,4	62,8	92,1	30
1,0410	1,6	1,6	62,6	91,7	20
2,0820	0,8	0,8	60,4	88,6	10
4,1640	0,5	0,5	55,7	81,7	5
5,2050	0,4	0,4	53,5	78,5	4
6,9400	0,3	0,3	50,2	73,7	3
10,4100	0,2	0,2	44,7	65,6	2

* Quadro 11

* Circuito "B" : " PARALELO - SÉRIE "				
- Forma de onda : 100 / 700 μ s				
- Capacitância do gerador : 20,82 μ F				
Cb [μ F]	Rs [Ω]	Rp [Ω]	Rend %	Cg/Cb
0,0208	2247,6	34,8	82,7	1000
0,0231	2023,1	34,8	82,7	900
0,0260	1798,6	34,8	82,7	800
0,0297	1574,0	34,7	82,6	700
0,0347	1349,5	34,7	82,6	600
0,0416	1125,0	34,7	82,6	500
0,0521	900,5	34,7	82,6	400
0,0694	675,9	34,7	82,5	300
0,1041	451,4	34,6	82,3	200
0,1157	406,5	34,6	82,3	180
0,1301	361,6	34,6	82,2	160
0,1487	316,7	34,5	82,1	140
0,1735	271,8	34,5	82,0	120
0,2082	226,9	34,4	81,9	100
0,2603	182,0	34,3	81,7	80
0,3470	137,1	34,2	81,3	60
0,5205	92,2	33,9	80,6	40
1,0410	47,3	33,0	78,6	20
2,0820	24,9	31,4	74,7	10
4,1640	13,6	28,6	68,0	5

* Quadro 12

* Circuito "C" : " SÉRIE - PARALELO - SÉRIE "					
- Forma de Onda : 100 / 700 μ s					
- Capacitância do Gerador : 20,82 μ F					
Cb [μ F]	Rs1 [Ω]	Rs2 [Ω]	Rp [Ω]	Rend %	Cg/Cb
2,0820	14,9	14,9	18,8	44,7	10
4,1640	7,2	7,2	23,7	56,4	5
5,2050	5,9	5,9	23,8	56,6	4
6,9400	4,6	4,6	23,2	55,2	3
10,4100	3,4	3,4	21,3	50,7	2

* Quadro 13

* Circuito "A" : " SÉRIE - PARALELO "				
- Forma de Onda : 100 / 1000 μ s				
- Capacitância do Gerador : 20,82 μ F				
Cb [μ F]	Rs [Ω]	Rp [Ω]	Rend %	Cg/Cb
4,1640	16,0	34,3	54,9	5
5,2050	12,3	36,0	57,6	4
6,9400	9,2	36,0	57,6	3
10,4100	6,5	33,8	54,1	2

* Quadro 14

* Circuito "B" : " PARALELO - SÉRIE "				
- Forma de onda : 100 / 1000 μ s				
- Capacitância do gerador : 20,82 μ F				
Cb [μ F]	Rs [Ω]	Rp [Ω]	Rend %	Cg/Cb
0,0208	1995,3	55,2	88,2	1000
0,0231	1796,0	55,2	88,2	900
0,0260	1596,7	55,2	88,2	800
0,0297	1397,4	55,2	88,2	700
0,0347	1198,0	55,1	88,2	600
0,0416	998,7	55,1	88,1	500
0,0521	799,4	55,1	88,1	400
0,0694	600,0	55,0	88,0	300
0,1041	400,7	55,0	87,9	200
0,1157	360,8	54,9	87,8	180
0,1301	321,0	54,9	87,7	160
0,1487	281,1	54,8	87,7	140
0,1735	241,3	54,8	87,5	120
0,2082	201,4	54,7	87,4	100
0,2603	161,5	54,5	87,2	80
0,3470	121,7	54,3	86,8	60
0,5205	81,8	53,8	86,1	40
1,0410	41,9	52,5	84,0	20
2,0820	22,0	50,0	80,0	10
4,1640	12,1	45,7	73,0	5

* Quadro 15

* Circuito "C" : " SÉRIE - PARALELO - SÉRIE "					
- Forma de Onda : 100 / 1000 μ s					
- Capacitância do Gerador : 20,82 μ F					
Cb [μ F]	Rs1 [Ω]	Rs2 [Ω]	Rp [Ω]	Rend %	Cg/Cb
1,0410	26,7	26,7	27,7	44,3	20
2,0820	11,9	11,9	40,1	64,1	10
4,1640	6,2	6,2	41,5	66,4	5
5,2050	5,1	5,1	40,7	65,1	4
6,9400	4,0	4,0	38,9	62,2	3
10,4100	3,0	3,0	35,1	56,2	2

3.8 - CURVAS TEÓRICAS

As figuras 11 a 15 relacionam os rendimentos dos três principais tipos de circuito gerador através de uma relação entre a capacitância do gerador (C_g) e a capacitância da carga (C_b).

No caso do circuito gerador "C" ("série-paralelo-série"), optou-se pela melhor relação entre as resistências séries , isto é , por aquela que proporcione o melhor rendimento possível.

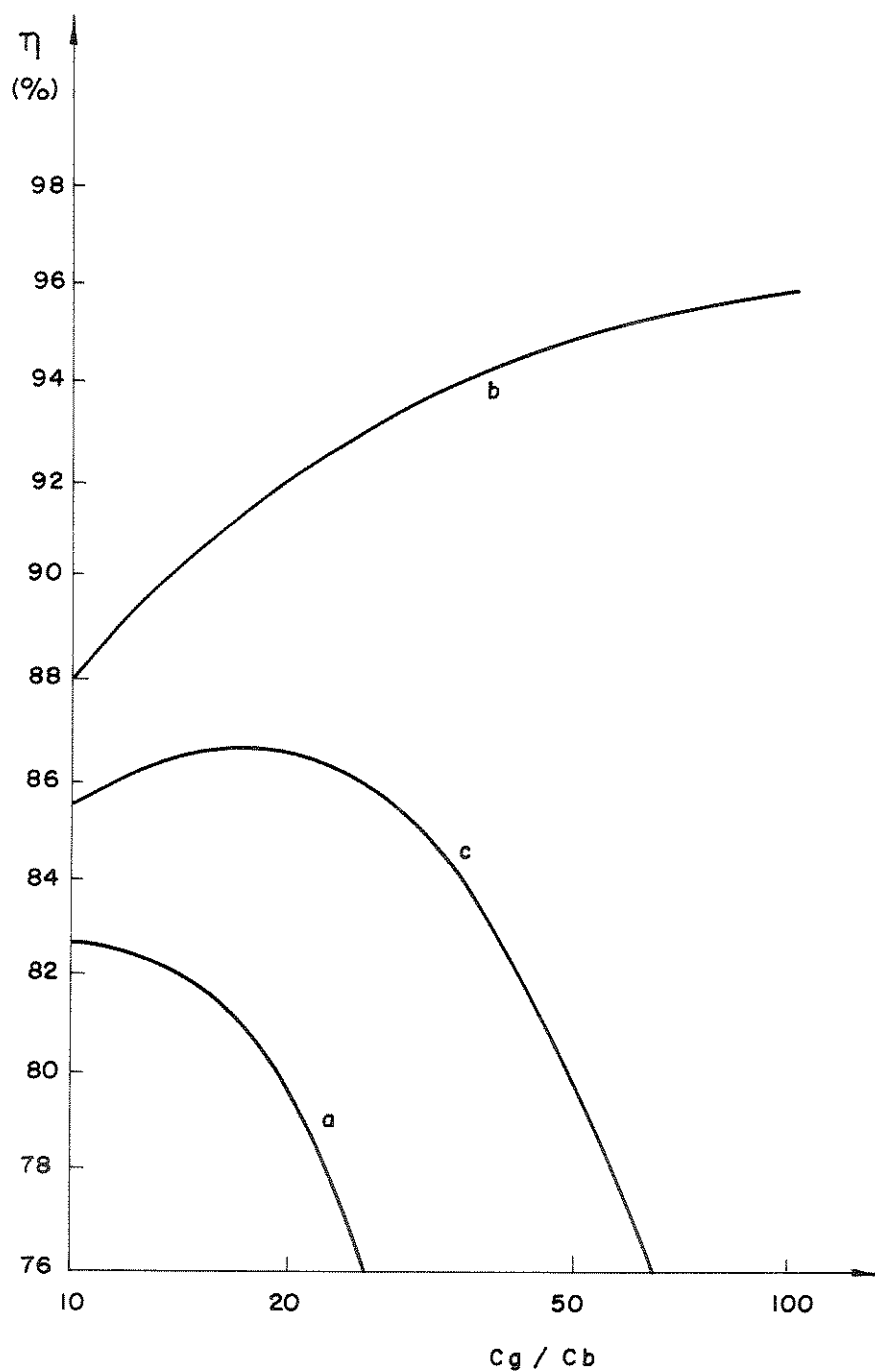


Figura 11 - Gráfico do rendimento em função da razão C_g/C_b .

Forma de onda : 1,2 / 50 μ s.

Curva (a) : circuito gerador "série-paralelo".

Curva (b) : circuito gerador "paralelo-série".

Curva (c) : circuito gerador "série-paralelo-série"

com $R_{s1} = R_{s2}$.

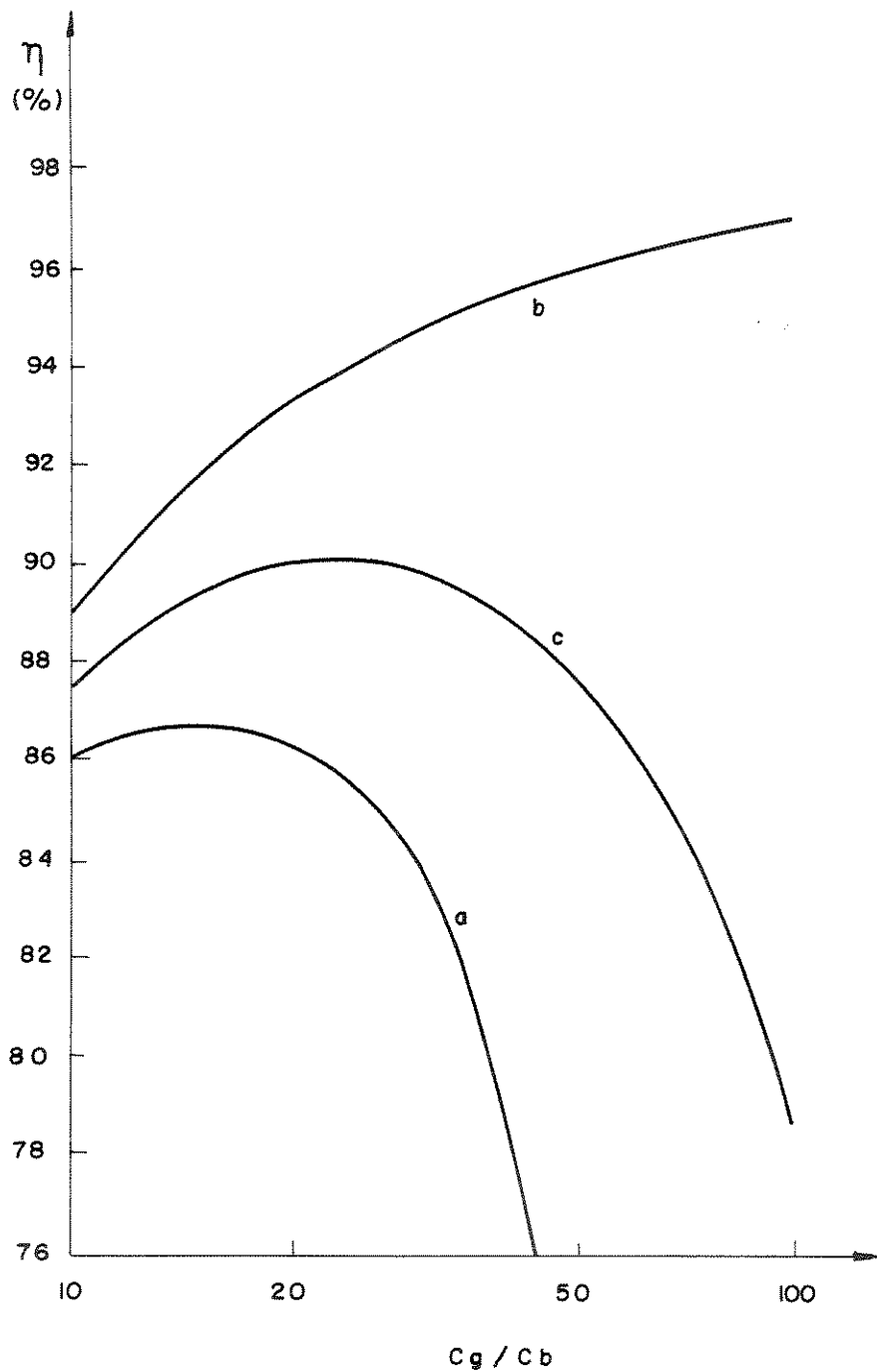


Figura 12 - Gráfico do rendimento em função da razão C_g / C_b .

Forma de onda : 10 / 700 μ s.

Curva (a) : circuito gerador "série-paralelo".

Curva (b) : circuito gerador "paralelo-série".

Curva (c) : circuito gerador "série-paralelo-série",

com $R_{s1} = R_{s2}$.

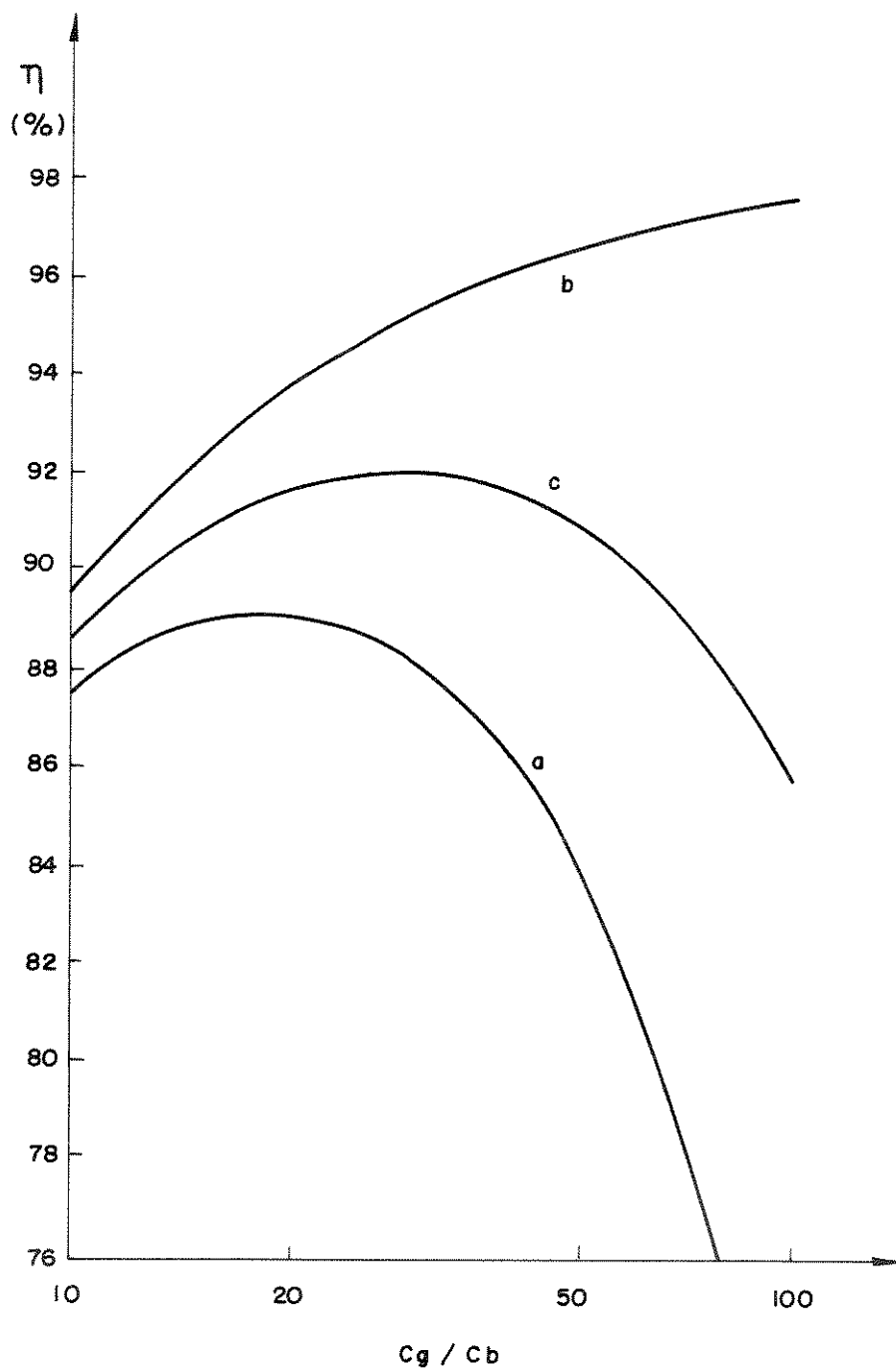


Figura 13 - Gráfico do rendimento em função da razão C_g/C_b .

Forma de onda : 10 / 1000 μ s.

Curva (a) : circuito gerador "série-paralelo".

Curva (b) : circuito gerador "paralelo-série".

Curva (c) : circuito gerador "série-paralelo-série",
com $R_{s1} = R_{s2}$.

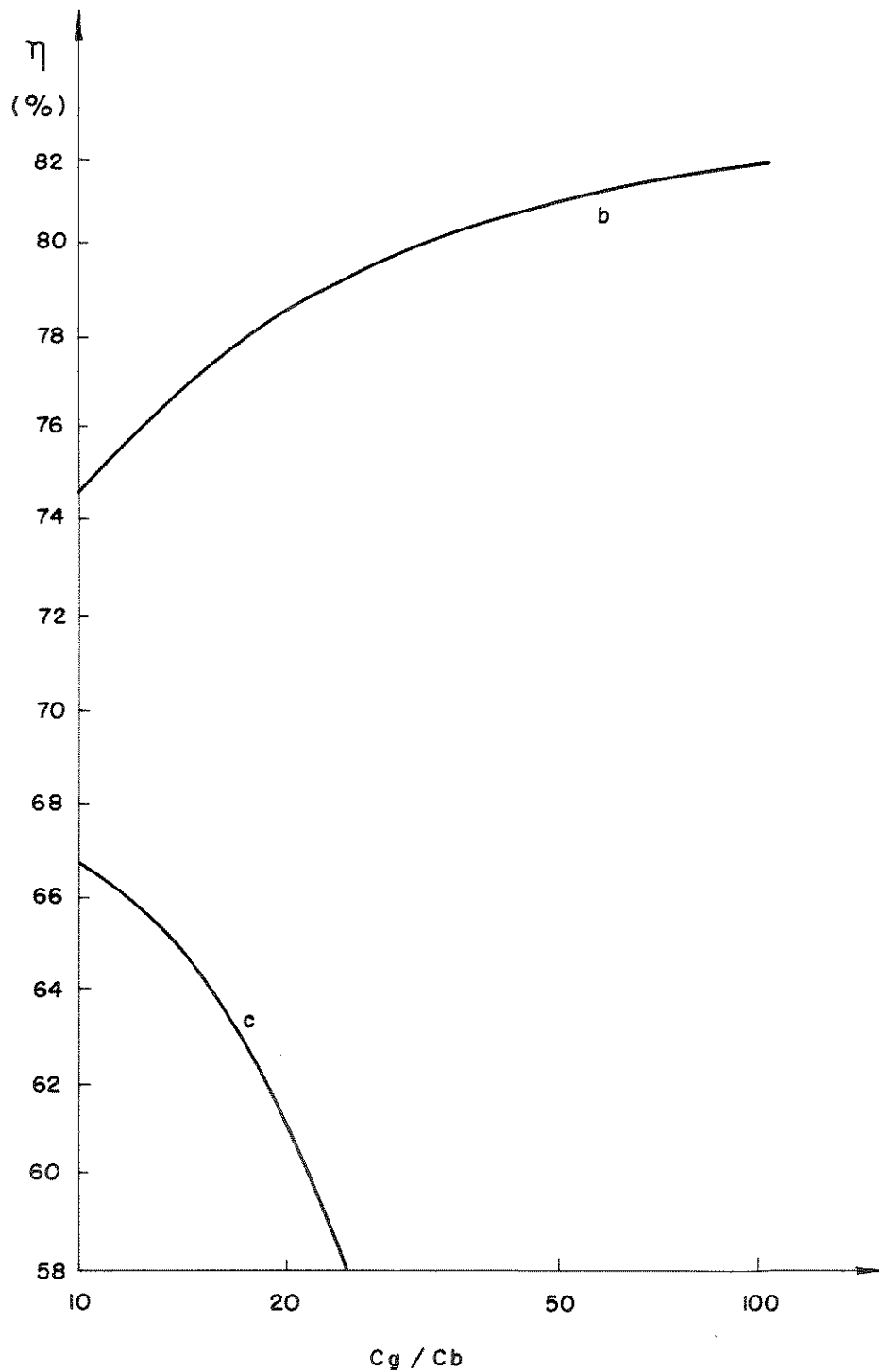


Figura 14 - Gráfico do rendimento em função da razão C_g/C_b .

Forma de onda : 100 / 700 μs .

Curva (b) : circuito gerador "paralelo-série".

Curva (c) : circuito gerador "série-paralelo-série",

com $R_{s1} = R_{s2}$.

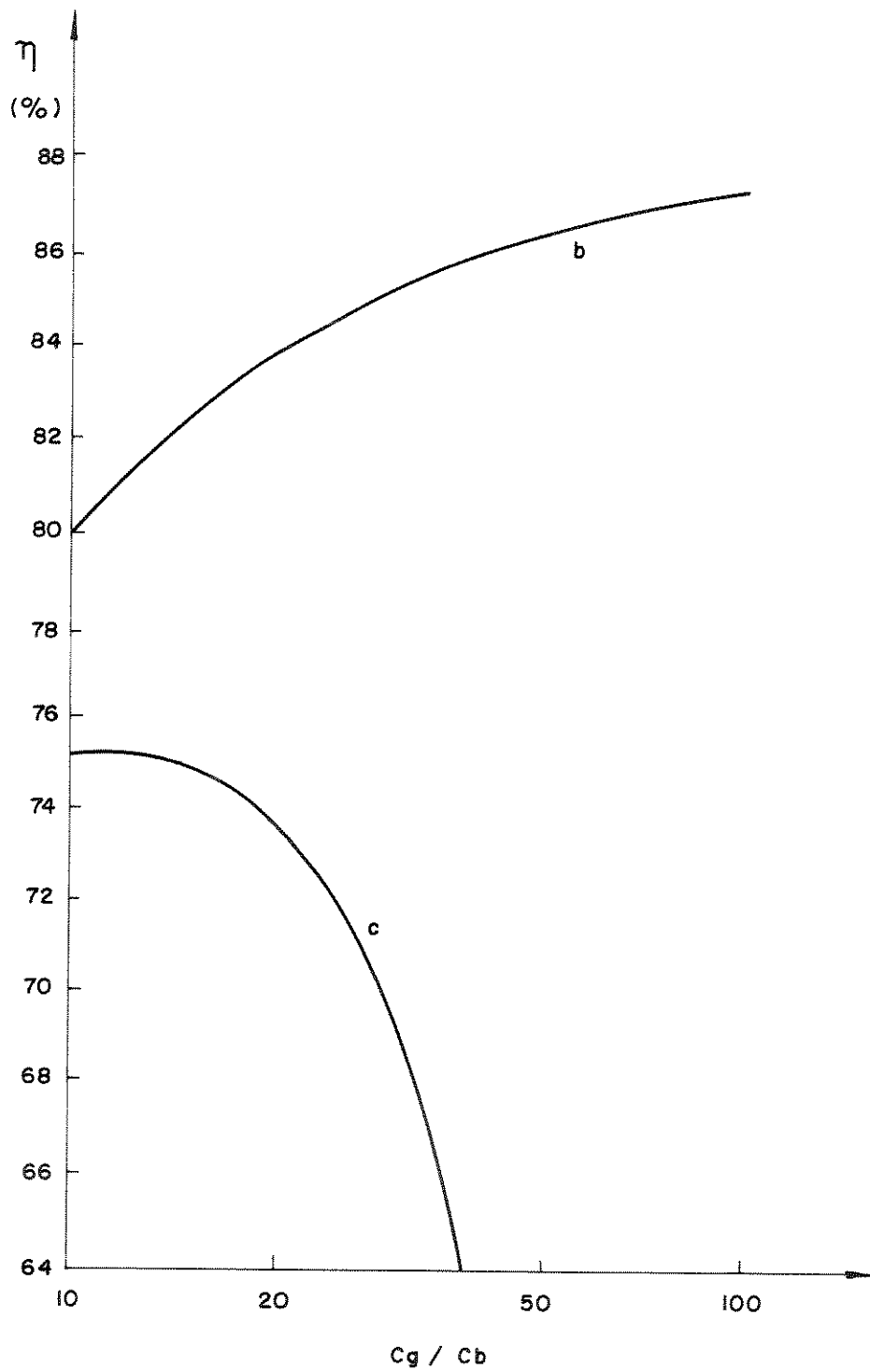


Figura 15 - Gráfico do rendimento em função da razão C_g/C_b .

Forma de onda : 100 / 1000 μ s.

Curva (b) : circuito gerador "paralelo-série".

Curva (c) : circuito gerador "série-paralelo-série",

com $R_{s2} = 5.R_{s1}$.

3.7 - Discussão

A preferência por qualquer dos três circuitos depende fundamentalmente dos critérios de projeto do construtor do gerador de impulsos.

A comparação dos resultados obtidos pelos três circuitos leva a algumas considerações :

a) Sob o ponto de vista do rendimento do gerador , as resistências R_p e R_s nos circuitos "A" ("série-paralelo") e "C" ("série-paralelo-série") formam um divisor de tensão , e portanto , a eficiência destes tipos é geralmente menor que a eficiência obtida através do circuito "B" ("paralelo-série").

b) Com a configuração do circuito "C" é difícil , mas não impossível , gerar ondas de impulso com curtos tempos de cauda . Entretanto , mesmo nos casos onde a geração de ondas de impulso é factível , a eficiência do gerador cai a valores muito baixos.

c) O circuito "B" pode ser usado em uma maior faixa da razão de capacitâncias que os dois circuitos . Isto significa que o circuito "B" pode dar uma performance satisfatória com baixos valores de C_b .

d) Deve ser observado que a adoção do circuito "B" impede o uso de divisores de tensão resistivos na medição das ondas impulsivas geradas , o que traz de certa forma alguma vantagem.

Portanto, o circuito "B" será utilizado em nosso presente trabalho.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE TEÓRICA DO CIRCUITO GERADOR

" PARALELO - SÉRIE "

4.1 - INTRODUÇÃO

Depois da escolha da configuração do circuito gerador mais adequada, efetuada no capítulo anterior, passamos a nos dedicar a um detalhamento e a uma série de simulações teóricas deste circuito "paralelo-série".

Inicialmente, mostramos o equacionamento da tensão impulsiva final $u(t)$.

Em seguida, realizamos simulações teóricas dos parâmetros do circuito sempre em relação a uma carga capacitiva do gerador, característica predominante em diversos componentes da rede telefônica.

Finalmente, uma variação do circuito gerador "paralelo-série" é apresentada, pois ela é utilizada para formação de impulsos de tensão do tipo "linear" (ou "rampa").

4.2 - SISTEMA DE EQUAÇÕES

Devido ao seu melhor rendimento, os geradores de impulso são predominantemente construídos na conexão básica do circuito "B". Para este circuito, podemos escrever as equações [42] :

$$U_0 - \left(1 / C_s \right) \int_0^t (i_p + i_s) dt = i_p \cdot R_p = i_s \cdot R_s + u(t) \quad (\text{eq. 25})$$

$$i_s = \frac{C_b \cdot du(t)}{dt} \quad (\text{eq. 26}) \quad \text{com } u(t=0) = 0$$

onde : i_s = corrente que circula pela resistência série R_s ;
 i_p = corrente que circula pela resistência paralela R_p ;
 $C_s = C_g$ = capacitância do gerador ;
 U_0 = tensão inicial (para $t = 0$).

Esta equação diferencial pode ser resolvida ,
 aplicando a Transformada de Laplace .

$$\frac{U_0}{s} - \frac{1}{s C_g} \cdot (J_p + s C_b U) = J_p \cdot R_p = U (s R_s C_b + 1)$$

Resolvendo para $U = U(s)$, temos :

$$U(s) = \frac{U_0}{R_s \cdot C_b} \cdot \frac{1}{s^2 + sb + c}$$

onde :

$$b = \frac{1}{R_p \cdot C_g} + \frac{1}{R_s \cdot C_g} + \frac{1}{R_s \cdot C_b}$$

$$c = \frac{1}{R_s \cdot C_b \cdot R_p \cdot C_g}$$

As duas raízes da equação quadrática são :

$$s_{1,2} = \frac{b}{2} \cdot \left(-1 \pm \sqrt{1 - 4c/b^2} \right)$$

Elas são sempre negativas (menor que zero) e reais .

A transformação reversa nos dá :

$$u(t) = \frac{U_0}{R_s \cdot C_b} \cdot \frac{1}{s_1 - s_2} \cdot \left(e^{s_1 \cdot t} - e^{s_2 \cdot t} \right)$$

$$u(t) = \frac{U_0}{R_s \cdot C_b} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot \left(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2} \right)$$

Aqui as constantes de tempo $T_1 = -1/s_1$ e $T_2 = -1/s_2$ são introduzidas . A solução geral pode ser bem simplificada se a aproximação usualmente válida

$$R_p \cdot C_g \gg R_s \cdot C_b$$

(ou seja : tempo de cauda (T_c) muito maior que o tempo de frente (T_f)).

for considerada . Então as relações :

$$b \approx \frac{1}{R_s} \left(\frac{C_g + C_b}{C_g \cdot C_b} \right) \quad e \quad 4c/b^2 \ll 1$$

seguem-se . Com isso a expressão da raiz quadrada em s_1 , s_2 aproxima-se ao valor $\left(1 - 2c/b^2 \right)$, e resulta que :

$$s_1 \approx -c / b = -1 / R_p (C_g + C_b)$$

portanto : $T_1 = R_p (C_g + C_b)$

$$s_2 \approx (c / b) - b = -b = -(1 / R_s) \cdot (C_g + C_b) / (C_g \cdot C_b)$$

portanto : $T_2 = R_s (C_g \cdot C_b) / (C_g + C_b)$

Portanto , a equação resultante do impulso de tensão no gerador tipo "B" - "Paralelo-Série" - é :

$$u (t) = \frac{U_0}{R_s \cdot C_b} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2})$$

(eq. 27)

Constatamos que o impulso de tensão é dado pela diferença de duas funções exponenciais com constantes T_1 e T_2 .

4.3 - VARIACÃO PERMISSÍVEL DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO

As figuras 16 a 19 fornecem as resistências , série (R_s) e paralela (R_p) , que devem estar contidas no circuito gerador "paralelo-série" para uma carga predominantemente capacitiva, até 450 nF , a fim de estabelecer as formas de onda dentro dos limites padronizados de tempo.

Nas figuras 20 a 24 são mostradas as possíveis variações de R_s com a capacitância de carga C_b , determinadas teoricamente (equação 7) para cada uma das formas de onda.

A área hachurada destes gráficos deve ser entendida como sendo o conjunto de alternativas destes dois parâmetros (R_s e C_b), para que as respectivas formas de onda dos impulsos gerados se mantenham dentro dos limites estabelecidos pela norma IEC 60.2. Os outros dois parâmetros do gerador, R_p e C_g , são mantidos constantes.

Desta forma, tomando como exemplo o circuito gerador para ondas de 1,2 / 50 us (figura 20), pode-se encontrar variações de C_b de 19 a 31 nF. A soma das capacitâncias de controle da frente de onda, capacitâncias do divisor, capacitância do objeto em teste e capacitâncias parasitas correspondentes pode variar nesta faixa.

Se o gerador dispuser de um C_b de 25 nF, a carga permissível neste circuito é de no máximo 6 nF (área A na figura 20).

Estes resultados mostrados nas figuras 20 a 24 foram confirmados posteriormente na prática (capítulo VI).

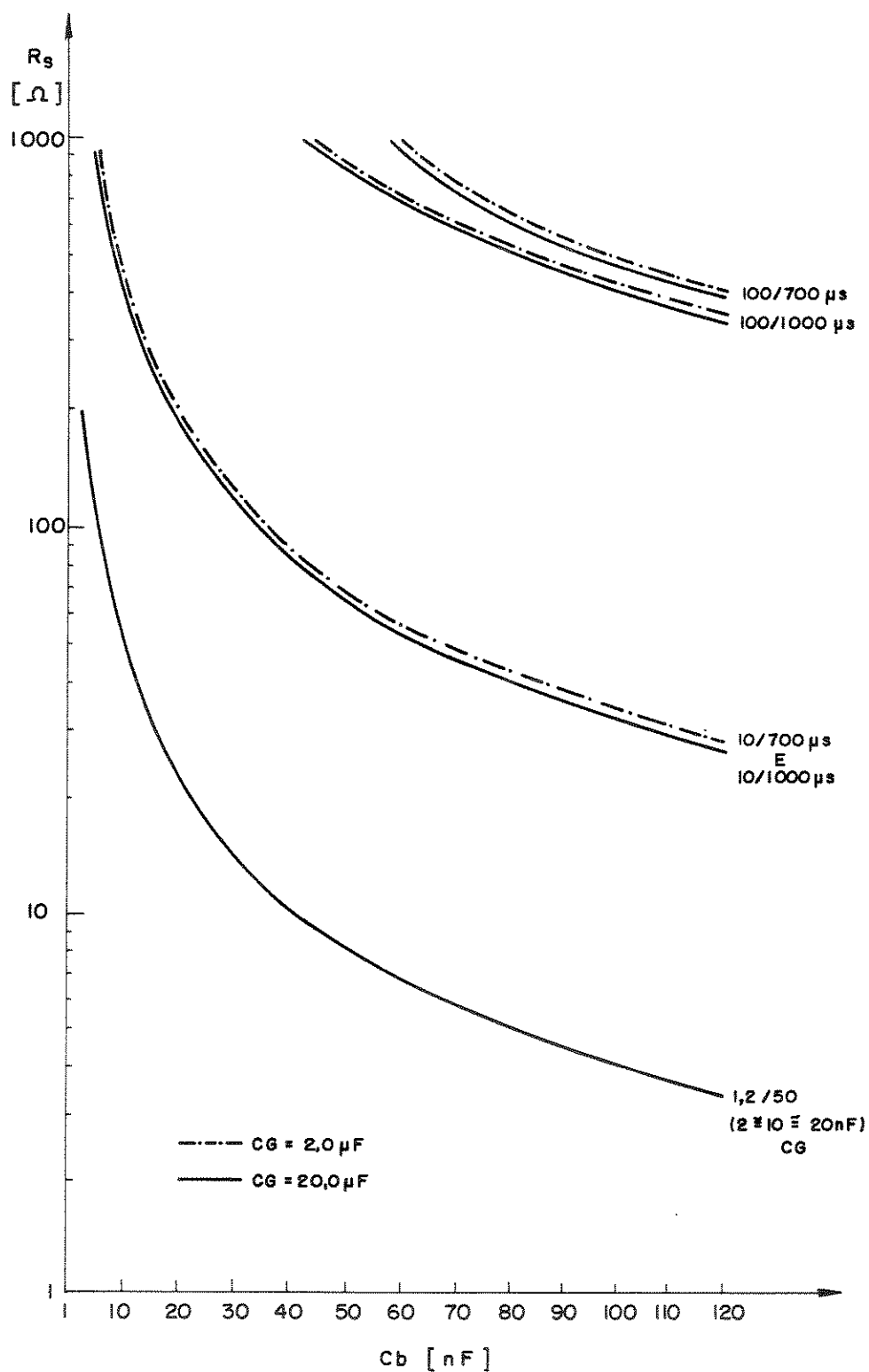


Figura 16 - Resistência Série em função da Capacitância da Carga (circuito gerador "paralelo-série").

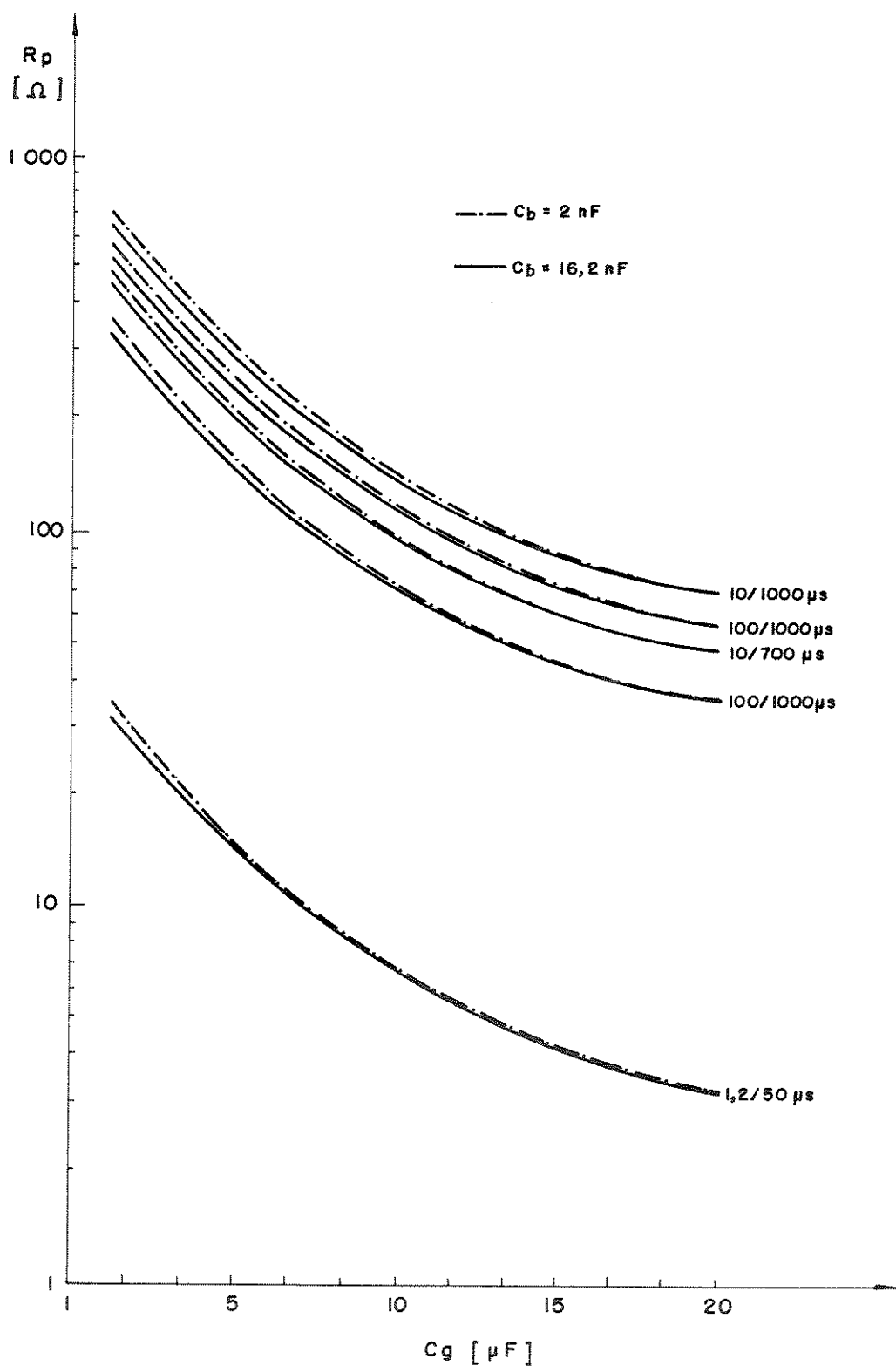


Figura 17 - Resistência Paralela em função da Capacitância do Gerador (circuito gerador "paralelo-série").

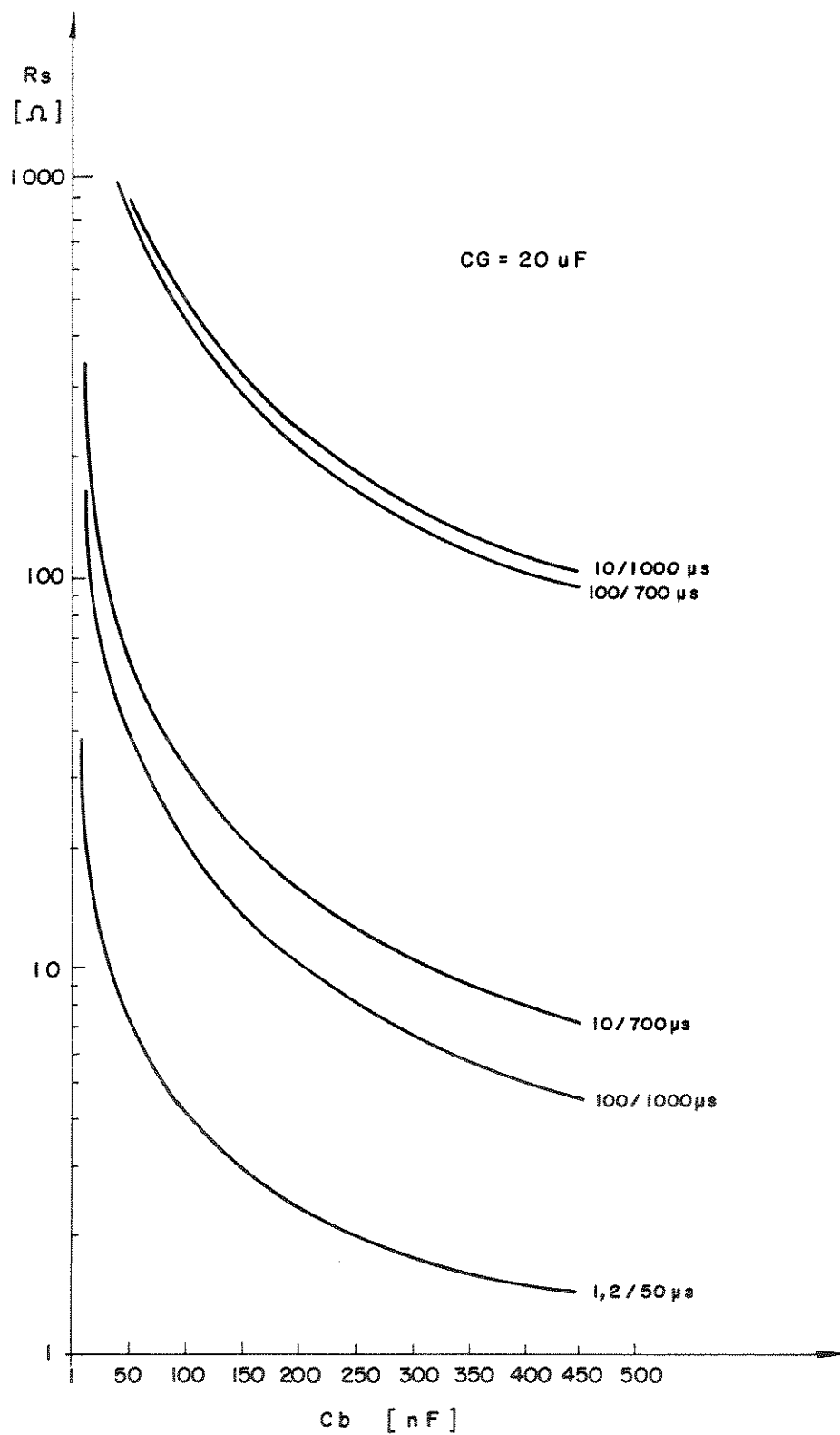


Figura 18 - Resistência Série em função da Capacitância da Carga para $C_g = 20 \mu F$ (circuito gerador "paralelo-série).

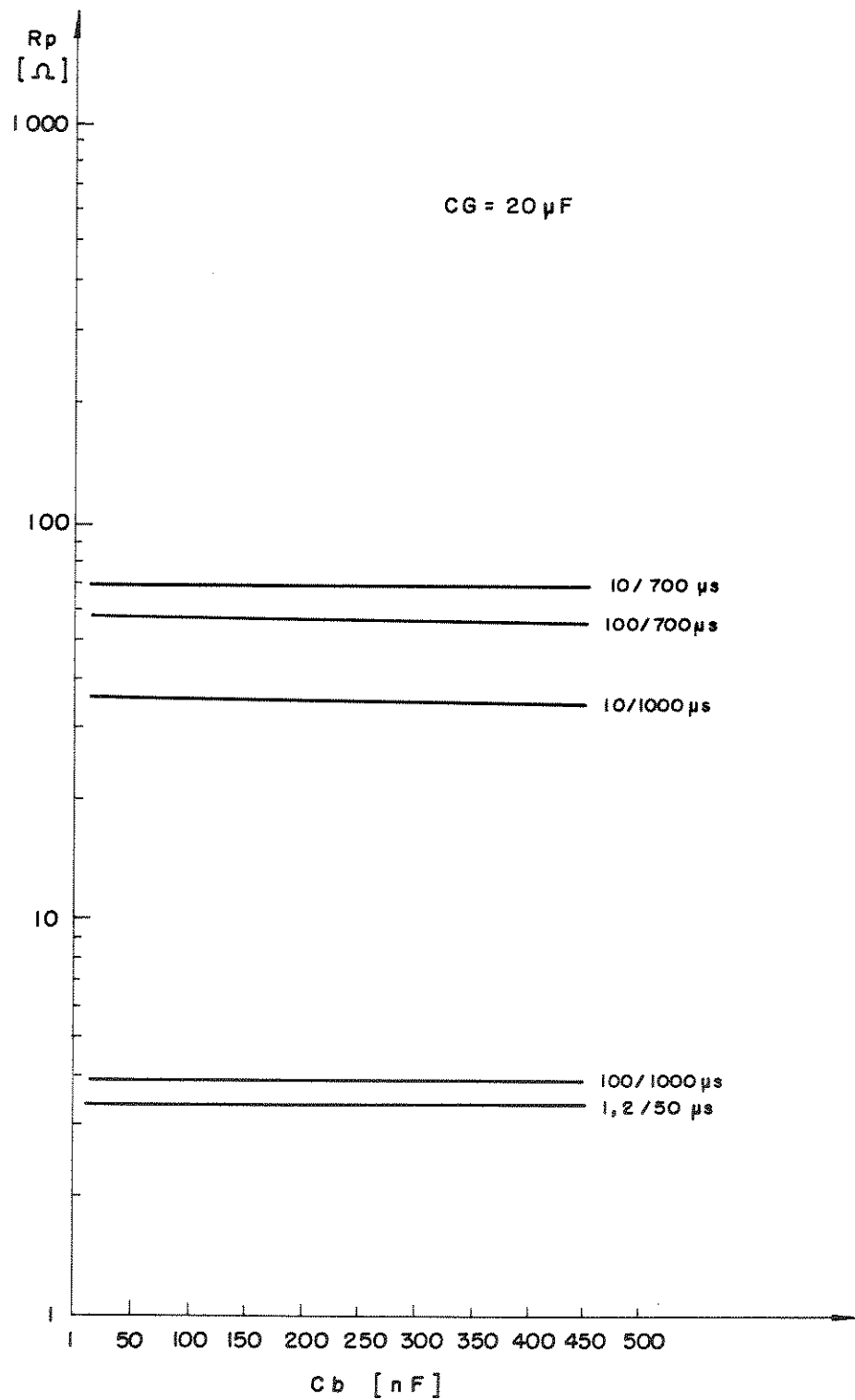
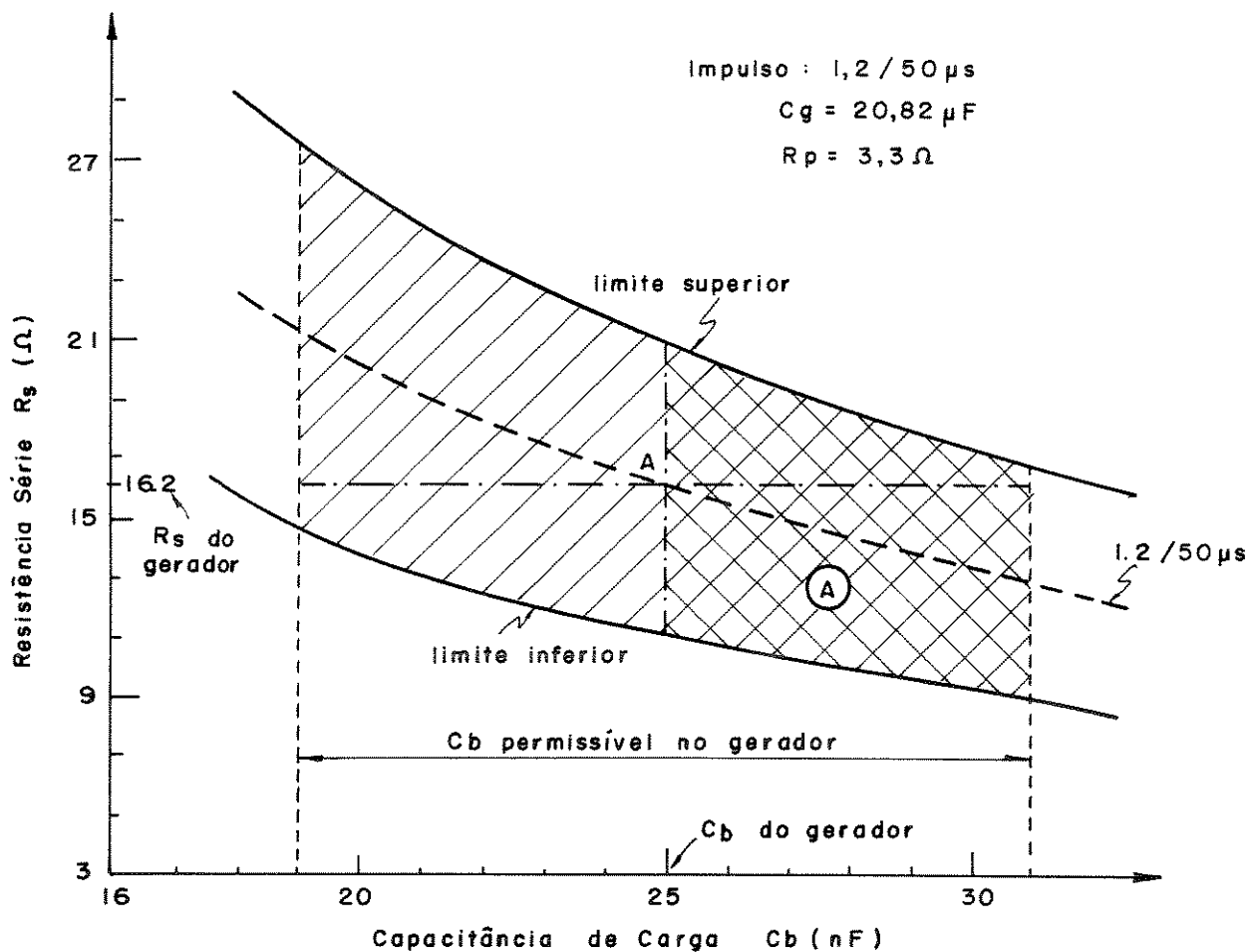


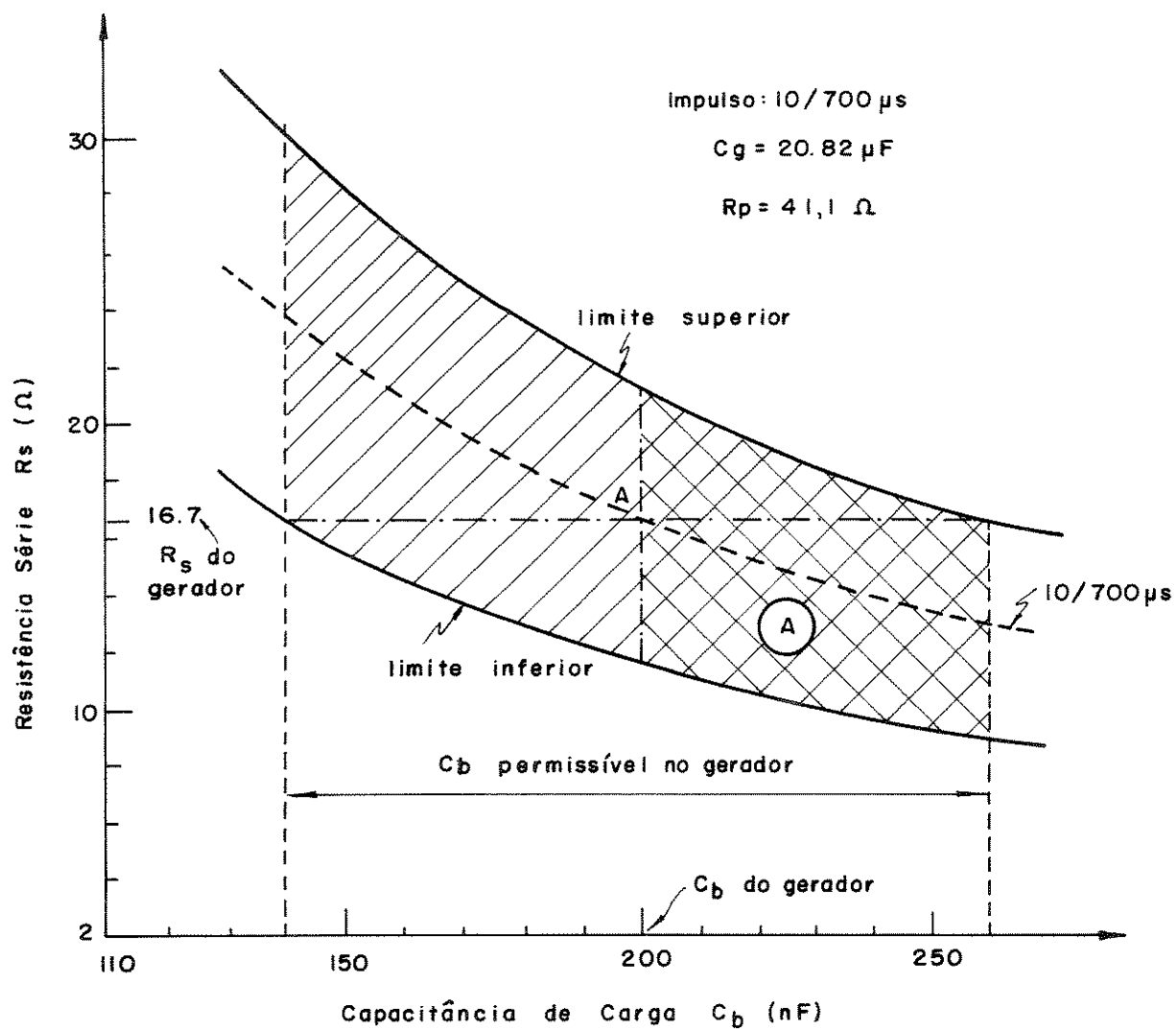
Figura 19 - Resistência Paralela em função da Capacitância da Carga para $C_g = 20 \mu F$ (circuito gerador "paralelo-série").



limite superior - tempo de frente = 1,56 μ s

limite inferior - tempo de frente = 0,84 μ s

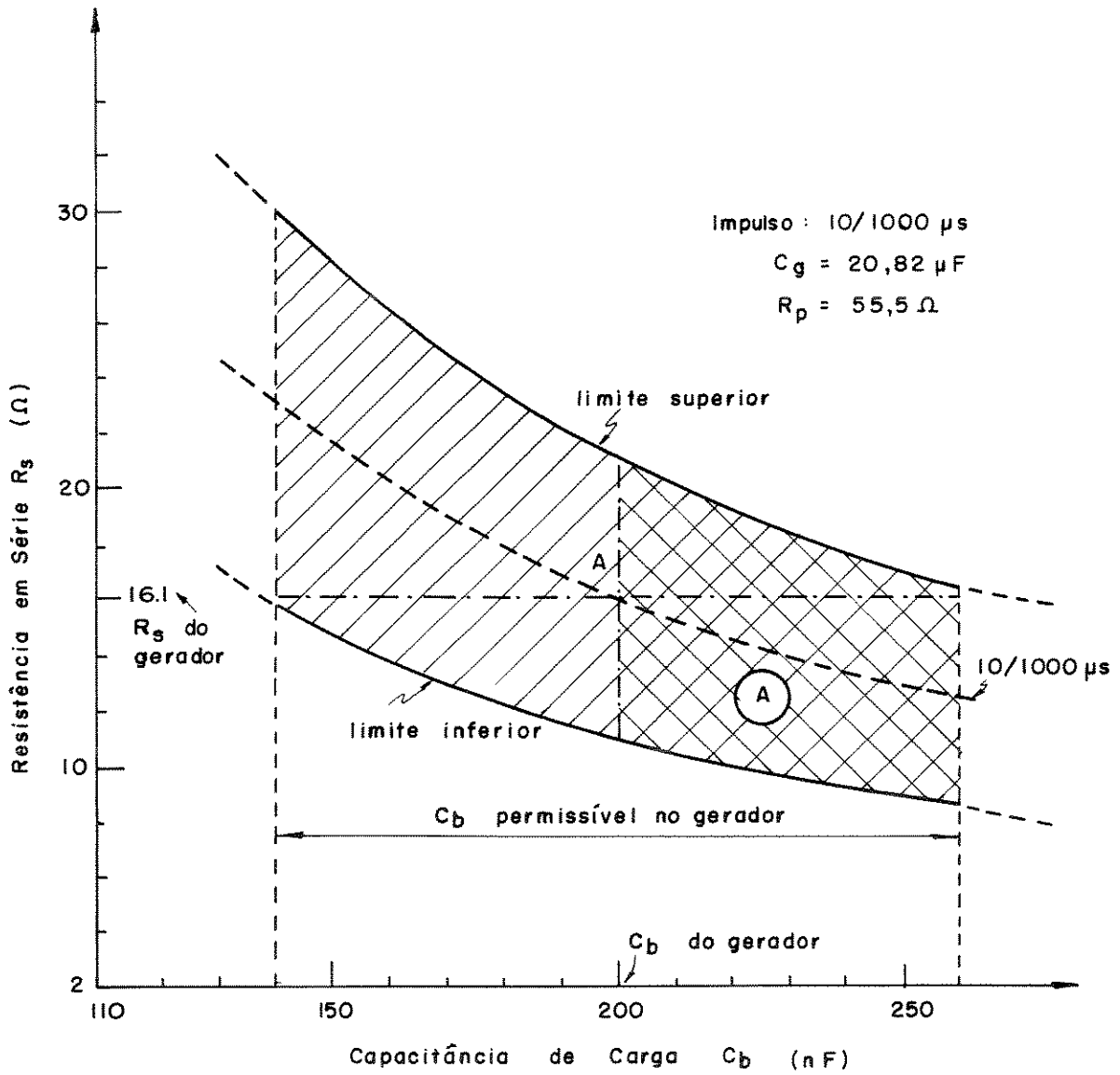
Figura 20 - Variação da Resistência Série em função da Capacitância da Carga no circuito "paralelo-série" para 1,2 / 50 μ s.



limite superior - tempo de frente = 13 μ s

limite inferior - tempo de frente = 7 μ s

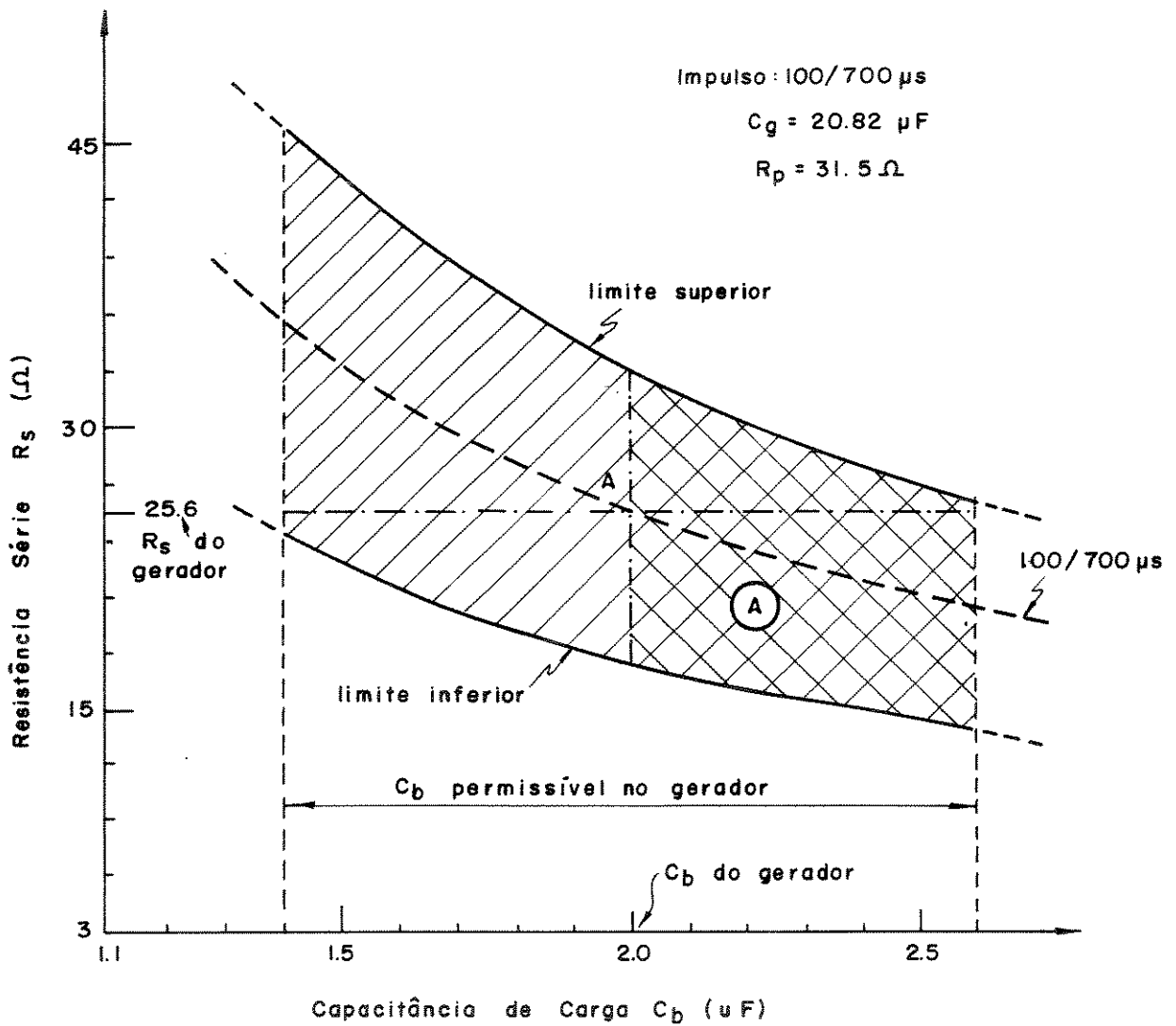
Figura 21 - Variação da Resistência Série em função da Capacitância da Carga no circuito "paralelo-série" para 10 / 700 μ s.



limite superior - tempo de frente = 13 μ s

limite inferior - tempo de frente = 7 μ s

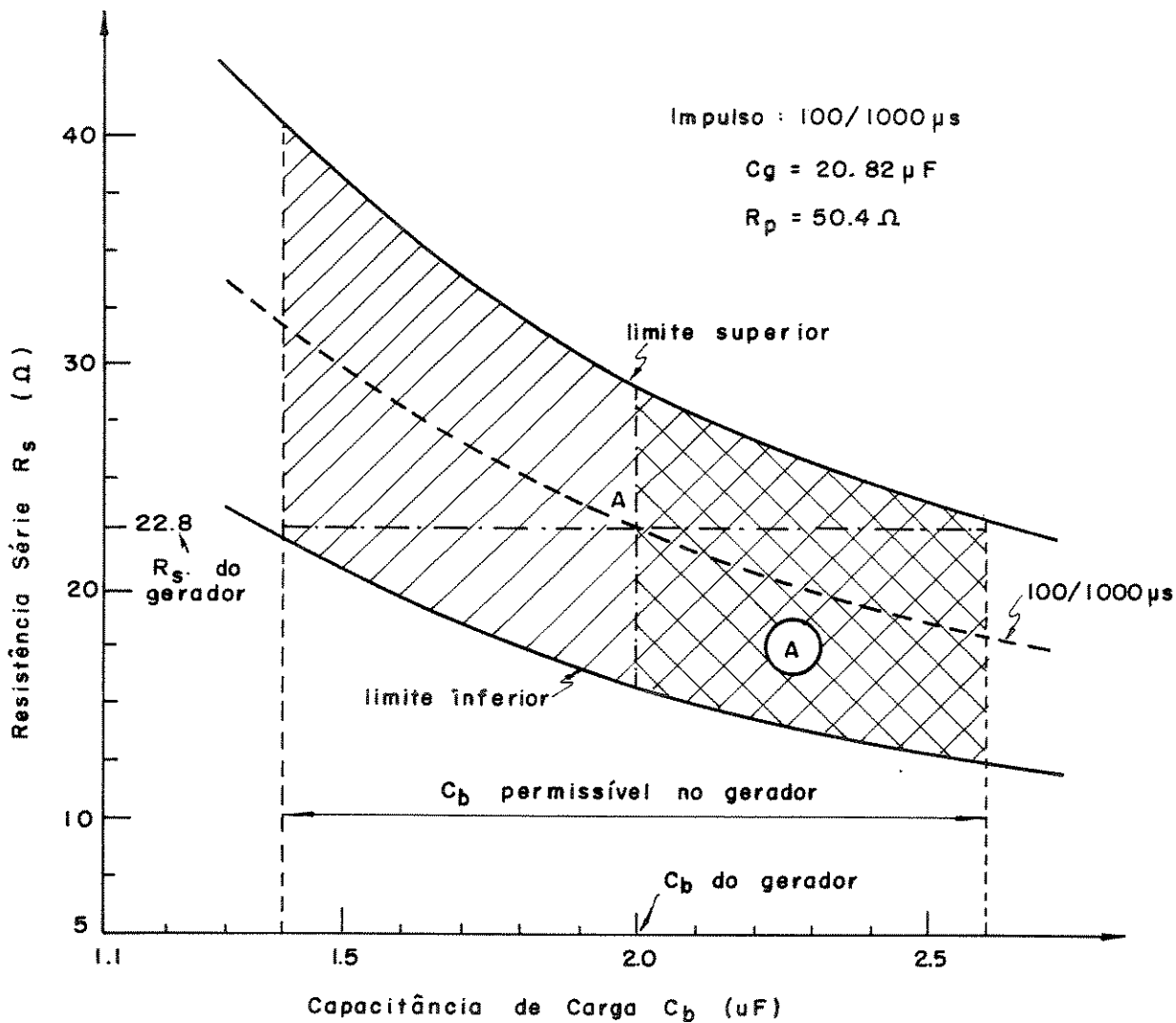
Figura 22 - Variação da Resistência Série em função da Capacitância da Carga no circuito "paralelo-série" para 10 / 1000 μ s.



limite superior - tempo de frente = 130 μ s

limite inferior - tempo de frente = 70 μ s

Figura 23 - Variação da Resistência Série em função da Capacitância da Carga no circuito "paralelo-série" para 100 / 700 μ s.



limite superior - tempo de frente = 130 μ s

limite inferior - tempo de frente = 70 μ s

Figura 24 - Variação da Resistência Série em função da Capacitância da Carga no circuito "paralelo-série" para 100 / 1000 μ s.

4.4 - CIRCUITO GERADOR DE RAMPAS DE TENSÃO

De acordo com a especificação Telebrás 235-810-706 (1985) ("Especificação de Centelhadores Tripolares a Gás de Cerâmica e Metal"), são exigidos testes de tensão de disparo sob impulso com frentes de ondas típicas de 100 V/ μ s e 1000 V/ μ s. Estes testes servem para verificar o comportamento dinâmico dos centelhadores.

Além deste teste de tensão de disparo em regime de surto, impulsos com frentes de 100 e 1000 V/ μ s são exigidos ainda nos testes de vida útil e de tensão transversal de um centelhador tripolar .

Os circuitos a serem utilizados em testes de impulsos de centelhadores são normalizados e podem ser encontrado , por exemplo , na especificação Telebrás 235-810-506 (1985).

Os circuitos geradores de impulso dedicados para testes de centelhadores em 100 V/ μ s e 1000 V/ μ s são do tipo "B" ("paralelo-série") adaptado para se conseguir uma frente dentro de uma faixa mais linear possível .

O diagrama do circuito gerador para testes de tensão de disparo, bem como para testes de tensão transversal, e seus periféricos é mostrado na figura 25 .

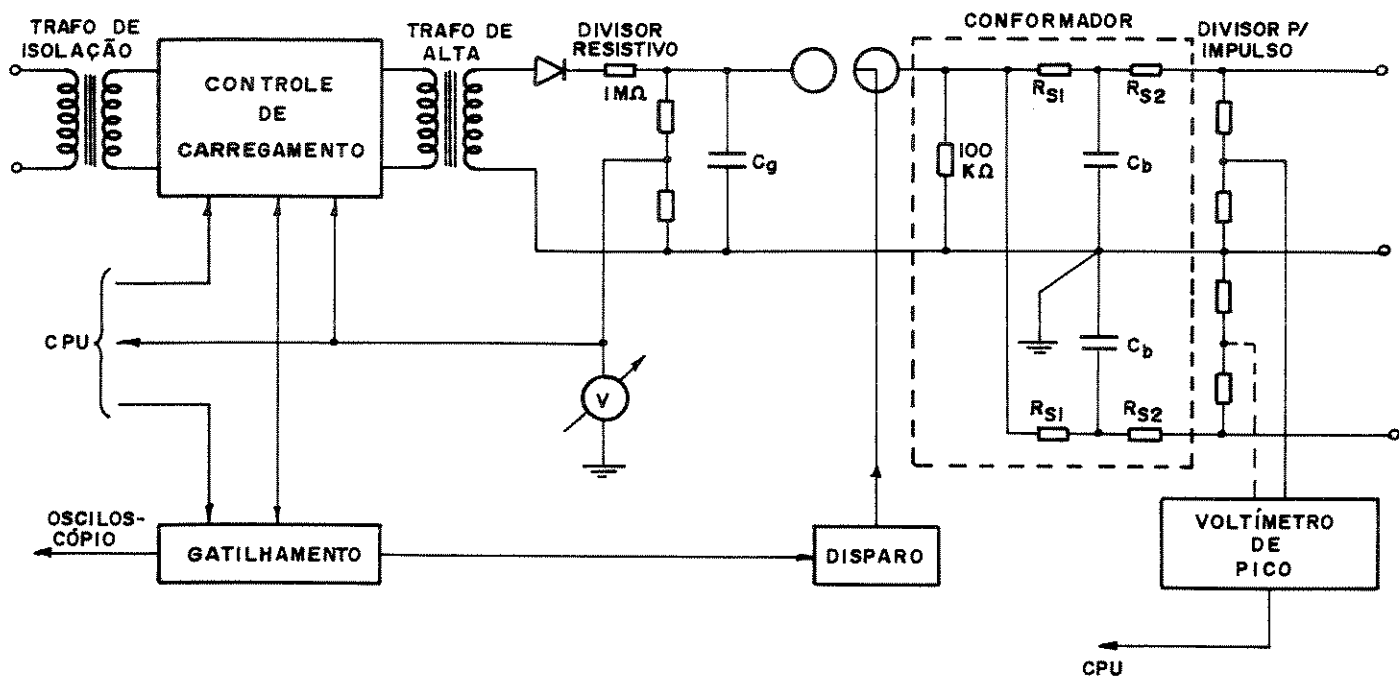


Figura 25 - Diagrama Geral do Gerador de Rampas .

Os parâmetros do circuito que mudam com a variação da taxa de crescimento de 100 ou 1000 V/ μ s são C_g e C_b . Ou seja, os valores de R_s (1000 ohms) e R_p (100 kohms) permanecem constantes para as duas rampas , sendo necessário apenas variar os valores das capacitâncias para obter os valores de rampas com as declividades desejadas.

Como o teste de tensão transversal é efetuado somente com o impulso de 1 kV/ μ s , os parâmetros do circuito rebatido são fixos.

No quadro 18 , mostramos os parâmetros do circuito para 100 e 1000 V/ μ s do gerador montado para estudos preliminares.

Quadro 16 - Relação dos parâmetros do circuito gerador de rampas

Rampa de 100 V/us	Rampa de 1kV/us
V = 5300 [V]	V = 5300 [V]
Rs1 = 1000 [ohms]	Rs1 = 1000 [ohms]
Rs2 = 50 [ohms]	Rs2 = 50 [ohms]
Rp = 100 [kohms]	Rp = 100 [kohms]
Cg = 0,2 [μF]	Cg = 0,1 [μF]
Cb = 50 [nF]	Cb = 5 [μF]

Outro parâmetro importante é a declividade da rampa que deve estar situada dentro de uma faixa de tolerância, conforme mostrado na figura 26. Ou seja, os valores de tensão das rampas, de 20% a 100% de sua tensão máxima de disparo de uma determinada classe de centelhadores, devem estar compreendidos dentro de uma margem de tolerância de +/- 10% no tempo.

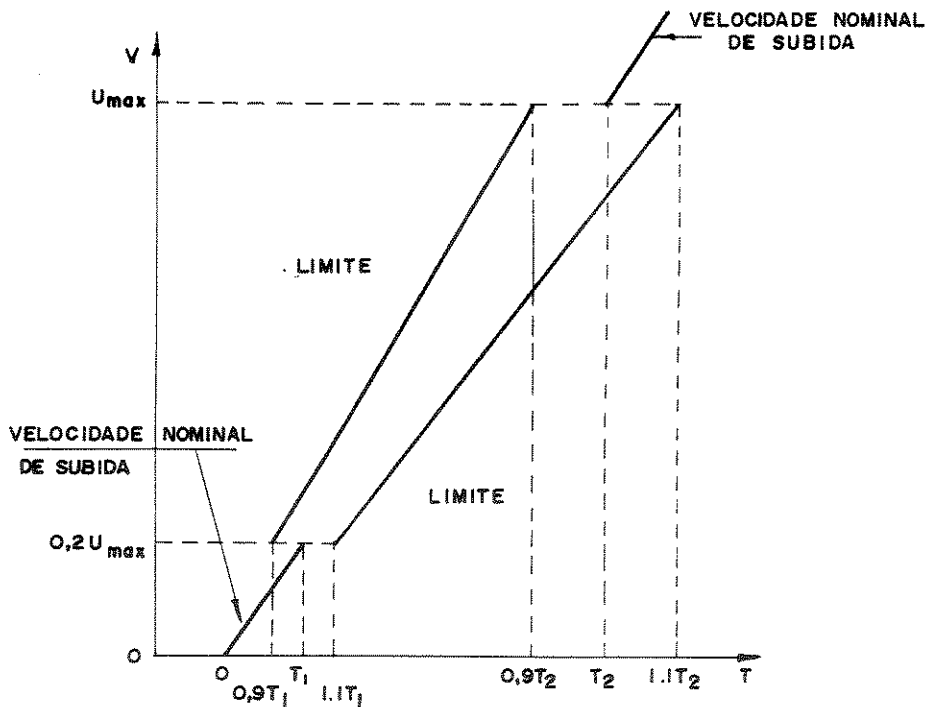


Figura 26 - Faixa permissível para a declividade das rampas.

CAPÍTULO V - COMPOSIÇÃO DO GERADOR

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são analisados os componentes básicos de um gerador de impulso de tensão, incluindo também aqueles componentes que não são responsáveis diretamente pela produção de um impulso de tensão, mas desempenham funções importantes que garantam confiabilidade, segurança e precisão ao gerador de impulso.

Primeiramente, é feita uma análise teórica dos resistores e capacitores do circuito gerador básico, onde são dados os principais tipos, funções e características dos mesmos.

Em seguida, é apresentado um diagrama geral do gerador de impulso de tensão estudado e construído no Laboratório de Alta Tensão da UNICAMP.

Na parte final deste capítulo, as partes componentes do gerador são abordadas teoricamente, sendo que dentre elas o sistema de medição é analisado mais detalhadamente por causa de sua importância e complexidade.

5.2 - COMPONENTES BÁSICOS

5.2.1 - RESISTORES

Os resistores empregados em um gerador de impulso de

tensão podem ser de vários tipos e, os mais comuns, são [36] :

- Anti-Indutivo : emprega um ou mais fios enrolados em um tubo suporte , em direções opostas , com o mesmo número de espiras, formando uma bobina . A finalidade desta disposição é minimizar a indutância , ou seja , o fluxo magnético total devido à corrente que circula no resistor . A indutância [35] deste tipo de resistor é dada por :

$$L = l \cdot ((\mu_r/4) + \ln(4a/\sqrt{D})). 10^{-7} \quad \text{eq. 28}$$

onde :

l - é o comprimento de cada fio ;

μ - é a permeabilidade relativa do material do fio ;

D - é o diâmetro do fio ;

a - é o espaçamento entre espiras de fios diferentes, ou seja, o passo da bobina formada, dado nas mesmas dimensões do diâmetro D.

- Pente : o comprimento adequado do fio ou fita é enrolado ao redor de uma superfície isolante com a forma de um pente duplo , sendo seus dentes colocados com espaçamento mínimo . O fio ou fita deve ser enrolado sempre num mesmo sentido.

- Silko : o resistor é constituído por uma tela de seda com os fios entrelaçados , de modo a formar uma rede . Estes fios são colados com uma goma laca e suas pontas são soldadas às presilhas , que são presas às alças por meio de parafusos . é utilizado normalmente como resistor externo ao gerador .

- Fita : composto de fios metálicos tecidos em torno de uma faixa de material com elevada resistência térmica, formando uma rede condutora altamente flexível, sendo frequentemente empregada para conexões externas ao gerador de impulso.

As funções que cada resistor executa num gerador de impulso de tensão, de acordo com a finalidade com que são empregados, são descritas a seguir.

5.2.1.a - Resistores de Forma de Onda

São os responsáveis pela obtenção da forma de onda adequada para a realização de um determinado ensaio de impulso. Existem dois tipos, sendo um responsável pela frente da onda de impulso e denominado RESISTOR DE FRENTE DE ONDA ou RESISTOR SÉRIE, e o outro responsável pela cauda da onda de impulso e denominado RESISTOR DE CAUDA DE ONDA ou RESISTOR PARALELO.

5.2.1.a.1 - Resistor de Frente de Onda (ou Resistor Série)

Este resistor está intimamente ligado à indutância do circuito de impulso e à sua carga capacitiva.

Para reduzir as oscilações com frequência igual a f_1 , dada pela equação 2, foi mostrado experimentalmente que a resistência série deve ser maior que 0,7 vezes a resistência crítica [8] do circuito, dada por :

$$R_{cr} = 2 \sqrt{(L_s + L_c) (C_g + C_{ot} + C_{pg}) W^{-1}}$$

eq. 29

onde :

$$W = C_g (C_{ot} + C_{pg})$$

sendo :

R_{cr} - resistência crítica.

L_s - Indutância interna do gerador.

L_c - Indutância das conexões.

C_g - capacitância de impulso do gerador.

C_{ot} - capacitância de carga do circuito.

C_{pg} - capacitância parasita do gerador.

Se , por acaso , ocorrerem oscilações com frequência f_2 , dadas pela eq. 3 , deve-se empregar resistores série internos e externos, o que significa que parte do valor da resistência de frente de onda necessária será colocada externamente ao gerador de impulso.

É impossível usar exclusivamente resistores série externos, e os motivos são :

- devido ao grande comprimento dos resistores série externos, torna-se necessário existir um espaço suficiente para acomodá-los entre o gerador de impulso e o objeto sob teste . Isto implica em aumento do comprimento linear do circuito , com conseqüente aumento da indutância total. Este fato é indesejável na produção de frentes de onda rápidas da ordem de até $2\mu s$;

- para um ensaio de impulso com forma de onda de tempos mais elevados, o resistor série externo deve ter um diâmetro elevado para evitar descargas no circuito. Isto aumentaria a capacitância parasita para a terra, tendo como consequência uma má distribuição de tensão ao longo do resistor tanto no início da onda plena quanto sob condições de onda cortada.

O resistor série é afetado pelo resistor de cauda de onda, seja na formação da onda de impulso, seja na energia dissipada (W_s) pelos resistores série, obtida de :

$$W_s = \int_0^{\infty} R_s I_s^2(t) dt \quad \text{eq. 30}$$

onde :

I_s - corrente no tempo t que circula no resistor de frente de onda R_s .

A corrente que circula no resistor R_s é dada pela equação :

$$I_s(t) = (E/R_s) \cdot (1/\alpha - \beta) \cdot (\alpha e^{-\alpha t} - \beta e^{-\beta t}) \quad \text{eq. 31}$$

Substituindo-se a equação 31 na equação 30 e integrando, obtém-se :

$$W_s = (E^2/2) \cdot (R_s C_{ot} + R_p C_{ot} + R_p C_g)^{-1} \cdot (R_p C_g C_{ot}) \quad \text{eq. 32}$$

onde :

E - tensão de carregamento total do gerador de impulso.

C_g - capacitância de impulso do gerador.

Cot - capacitância da carga do circuito de impulso.

Rp - resistor de cauda de onda.

5.2.1.a.2 - Resistor de Cauda de Onda

Este resistor está intimamente correlacionado com a capacitância de impulso do gerador como pode ser visto mais adiante.

Aconselha-se seu uso somente internamente, devido às seguintes vantagens :

- permitir uma melhor distribuição de tensão entre os estágios (se existentes) do gerador de impulso , quando o mesmo estiver sendo carregado ;
- permitir a possibilidade de serem realizadas conexões em paralelo, aumentando a flexibilidade do gerador;
- é mais adequada para geradores de impulso com tensão de carregamento elevada, pois as quedas de tensão que ocorrerem durante a duração do impulso serão distribuídas.

Como observado para os resistores série, a energia dissipada pelos resistores paralelos (Wp) sofrerá influência de ambos os resistores responsáveis pela forma de onda :

$$W_p = \int_0^{\infty} R_p i_p^2(t) dt$$

eq. 33

onde :

R_p - resistor de cauda de onda ;

I_p - corrente, no tempo t , que circula no resistor R_p .

Seguindo-se o procedimento semelhante ao utilizado na obtenção da equação 32 :

$$W_p = (E^2/2) C_g (R_p C_g + R_s C_{ot}) (R_s C_{ot} + R_p C_g + R_p C_{ot})^{-1}$$

eq. 34

onde os símbolos têm o mesmo significado da equação 32 .

5.2.1.b - Resistores de Carregamento

Esses resistores têm a finalidade dupla de carregar os capacitores de impulso e auxiliar os resistores de cauda de onda a descarregar o circuito de impulso formando, assim, a cauda da onda.

Em alguns casos , não são empregados resistores de carregamento, substituindo-os por conexões metálicas. Essas oferecem algumas vantagens como carregamento constante sem a necessidade de um regulador de tensão que pode comprometer a confiabilidade do sistema de alimentação.

5.2.1.c - Resistores de Descarga

Esses resistores são colocados em série com o braço da

chave de aterramento do gerador de impulso com a função de escoar a carga residual dos capacitores de impulso após a realização de um ensaio.

Outra função destes resistores é aterrar imediatamente o gerador por ocasião de qualquer emergência durante sua operação. Esta função é muito importante, pois se, em emergência, a chave de aterramento for acionada estando o gerador carregado, os resistores de descarga impedem a ligação direta do gerador à terra, que é perigosa.

5.2.1.d - Resistores de Potencial

Esses resistores possuem elevada resistência e visam aterrar a carcaça dos capacitores de impulso e a auxiliar o controle da distribuição de potencial durante o carregamento do gerador.

5.2.2 - CAPACITORES

Os capacitores empregados em um gerador de impulso até 10 kV (com energia de 1000 J) são geralmente de 2 tipos diferentes :

- Capacitores constituídos de papel impregnado a óleo. As unidades capacitivas internas têm em suas extremidades placas

metálicas, que permitem conexões mais confiáveis entre as unidades e escoamento da carga acumulada em curto espaço de tempo.

Os pontos externos para acesso aos capacitores são isolados por buchas de cerâmica.

As carcaças são metálicas e devem ser aterradas quando instaladas no gerador.

- Capacitores com dielétrico de mica . São constituídos por unidades padrões capacitivas , que os tornam bastante compactos . Não possuem carcaça metálica . O revestimento externo é do mesmo tipo utilizado como dielétrico . Não possuem buchas isolantes .

Obs : Os dois tipos acima mencionados permitem conexões em série e em paralelo entre os capacitores.

5.3 - DIAGRAMA GERAL

Para que tenhamos uma visão geral de um gerador de impulso de tensão (até 10 kV), apresentamos um diagrama de blocos e um esquema geral do nosso gerador, nas figuras 27 e 28, respectivamente.

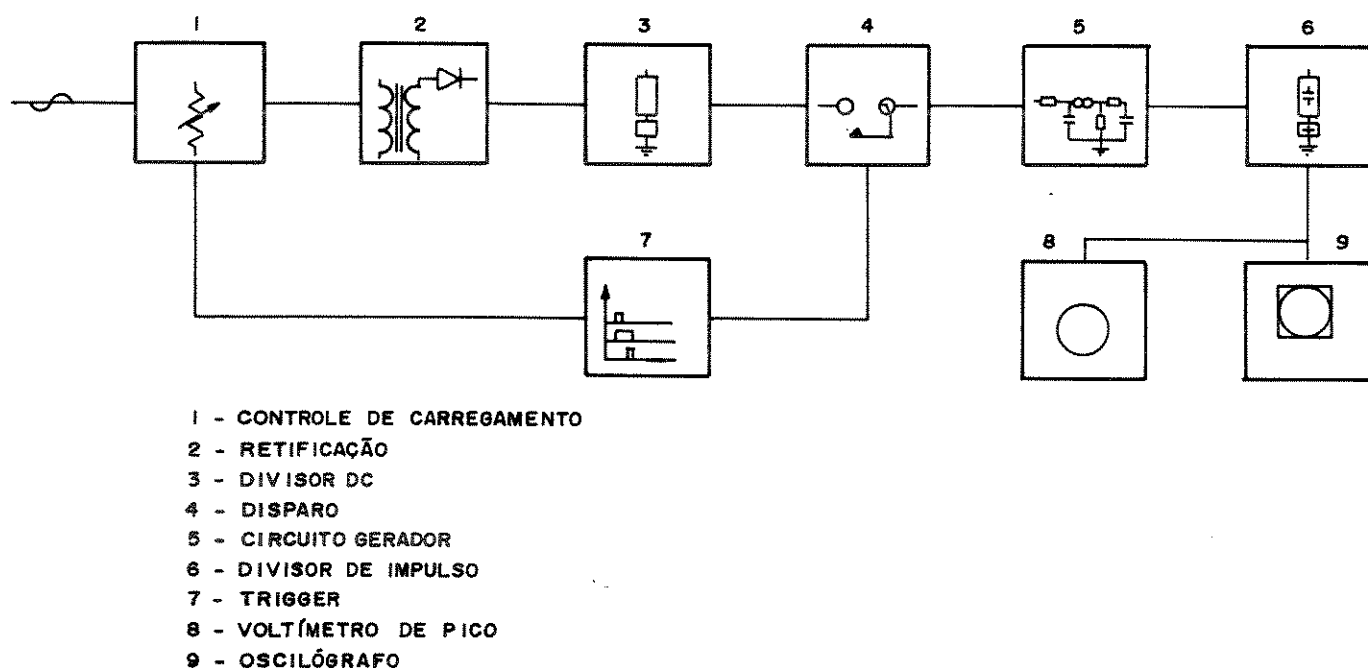


Figura 27 - Diagrama de Blocos do Gerador de Impulso de Tensão

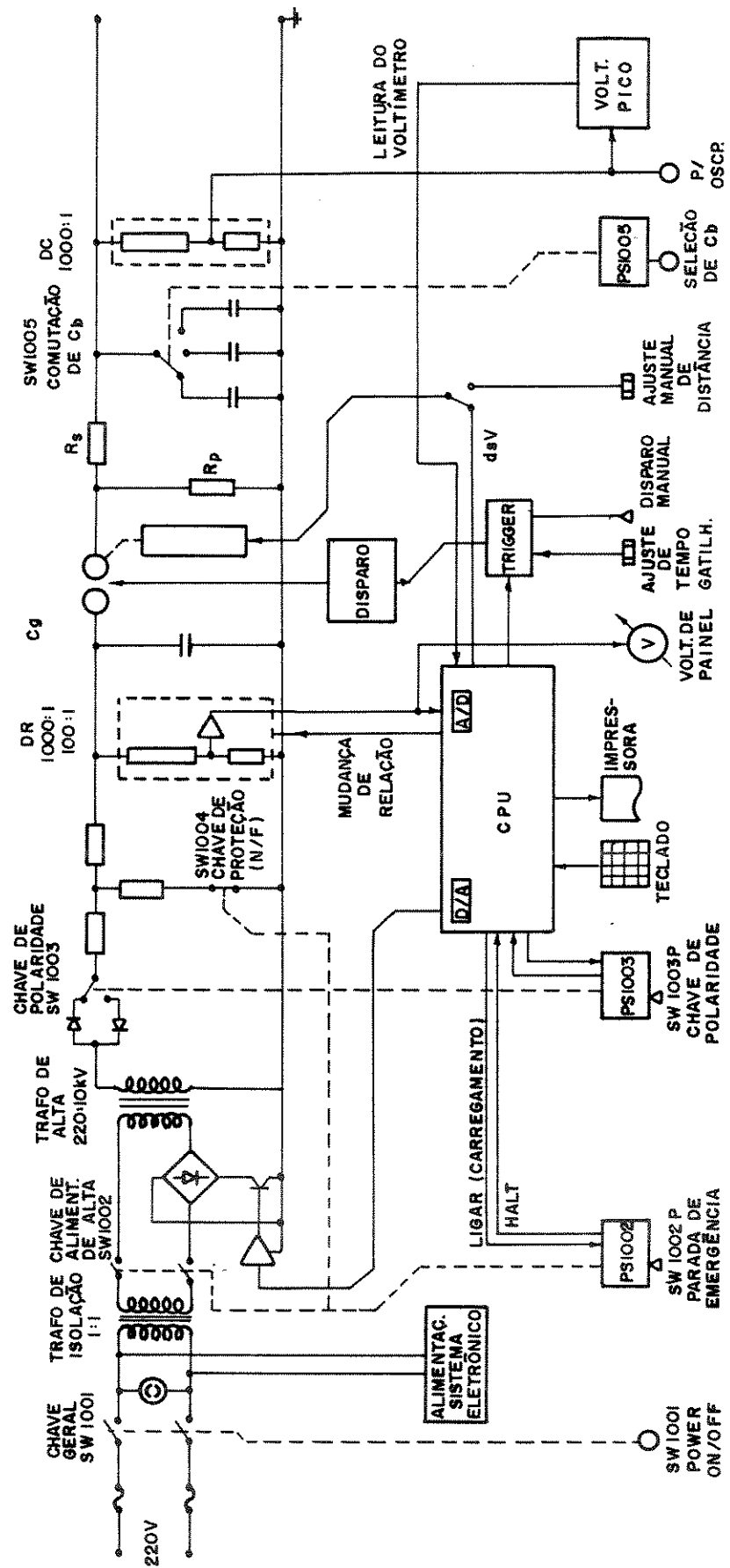


Figura 28 - Esquema Geral do Gerador de Impulso de Tensão Dupla-Exponencial.

5.4 - CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA

5.4.1 - CONTROLADOR DE CARREGAMENTO

O controlador de carregamento tem duas finalidades. Inicialmente, ele limita a corrente aplicada ao transformador de alta, de modo que o mesmo não seja excessivamente exigido quando do início do processo de carregamento do banco de capacitores C_g , em que temos $V_{cg} = 0$ (tensão de carregamento nula). Iniciado o processo, o controlador de carregamento serve para controlarmos a tensão que será estabelecida no banco de capacitores, e também para controlarmos a taxa de aplicações de impulsos (número de aplicações por minuto).

Portanto, esse circuito controla a velocidade de carregamento, de modo que tenhamos um perfeito controle sobre o processo de carregamento de C_g , evitando-se disparos acidentais bem como taxas de crescimento demasiadamente elevadas, o que poderia provocar danos não só aos componentes do gerador como também aos usuários.

Esse carregamento é feito com uma rampa linear de tensão até que o mesmo atinja 95 % do valor total e, a partir daí, a velocidade sofre uma redução, conforme mostra a figura 29, onde :

V_{cg} - tensão no capacitor C_g ;

V_p - tensão a ser aplicada ;

t_1 - parte inicial do carregamento ;

t_2 - parte final do carregamento, com dV/dt reduzida.

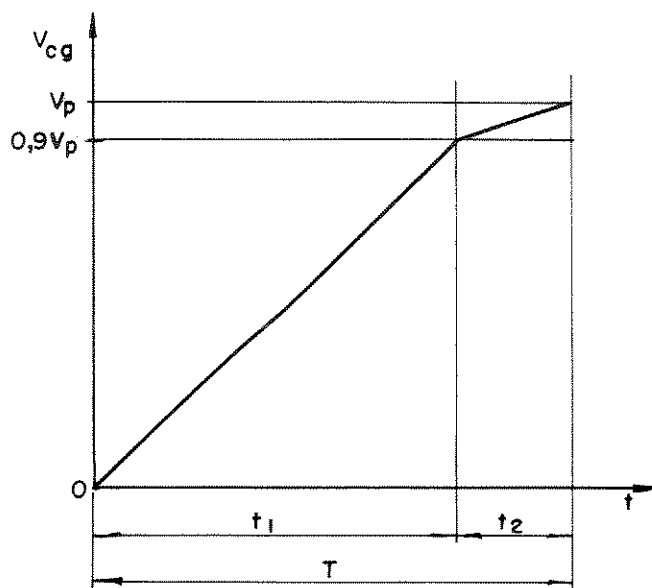


Figura 29 - Modo de carregamento do banco de capacitores C_g

Todo esse controle é feito do lado primário do transformador de alta tensão, isto é, em 220 V. A seguir, o transformador eleva essa tensão até no máximo 12 kV.

5.4.2 - TRANSFORMADOR DE ALTA

O transformador de alta serve para converter a tensão 0 - 220 V proveniente do circuito controlador de carregamento para um nível mais alto (máximo de 12 kV), o qual irá carregar o banco de capacitores C_g .

5.4.3 - CIRCUITO DE RETIFICAÇÃO

A tensão DC necessária ao carregamento do capacitor C_g do gerador de impulso é obtida através de um circuito de retificação de meia onda.

Quando o retificador estiver conduzindo, a capacitância C_g é carregada até o valor de tensão de pico V_p da tensão de saída do transformador. No próximo meio ciclo da tensão alternada, a tensão em C_g permanece a mesma, enquanto que a tensão no transformador atinge novamente o valor de pico V_p . Logo, o retificador deve suportar uma tensão de $2 V_p$.

O resistor R_c é o chamado resistor de carregamento (mencionado no capítulo anterior) e tem a finalidade de limitar as correntes excessivamente altas originadas durante o processo de carregamento.

No nosso caso, a capacitância C_g é a própria capacitância do gerador de impulso, servindo portanto a mesma como uma carga para o retificador.

5.2.4 - CONTROLE DE POLARIDADE

O controle de polaridade é constituído por uma chave de alta tensão que comuta os diodos retificadores à saída do transformador elevador, e por um circuito de comando.

Esse circuito serve para acionar aquela chave, checar a

sua posição , confirmar a polaridade da tensão existente no banco de capacitores e gerar um sinal que comute a polaridade de todas as unidades acopladas ao sistema , notadamente o voltímetro de pico.

5.5 - CIRCUITO DE DISPARO DO GERADOR

A energia armazenada no banco de capacitores C_g é transferida ao circuito conformador a fim de modelarmos a forma de impulso de acordo com o desejado.

Portanto , em circuitos geradores de ondas impulsivas , temos a necessidade de um "chaveamento" em alta tensão, capaz de uma operação rápida e controlada numa gama considerável de valores de tensão. No nosso caso específico, a tensão de operação varia desde 300-400 V até 10 kV.

As características que esta chave deve ter são :

- a) Alta tensão de isolamento ;
- b) Tempo de pré-chaveamento nulo, isto é , antes do chaveamento não devem ocorrer fenômenos parasitas tal como corona.
- c) Livre de repiques pós-chaveamento.

Uma solução seria o uso puro e simples de um gap esférico com espaçamento a ar. No entanto, esta solução embora barata possui alguns inconvenientes como a aleatoriedade dos disparos , uma vez que o chaveamento do gap ocorre via diferença de potencial entre os eletrodos.

A outra solução seria a utilização de um terceiro

eletrodo como elemento de ignição. Esta solução também não é adequada, visto apresentar a aleatoriedade no disparo, como no primeiro caso.

Uma das modificações desta segunda solução é o sistema "trigatron", que consiste na utilização de dois eletrodos esféricos juntamente com um eletrodo da ignição (trigger) embutido numa das esferas.

O eletrodo de ignição é uma haste metálica de pequena dimensão montado no centro de uma das esferas e dela isolado.

Uma tensão comparativamente pequena, aplicada ao eletrodo de ignição (trigger) pode levar o gap principal à ruptura em uma tensão abaixo daquela necessária na ausência do pulso de excitação (de alguns kV).

Isso acontece porque quando se aplica à haste um pulso de tensão de uma dada magnitude, temos a ocorrência de um centelhamento na extremidade da haste metálica dirigida ao gap esférico. Isso faz com que a distribuição do campo elétrico no gap esférico seja distorcido com maior intensidade nas proximidades da haste metálica, o que facilita o desenvolvimento da descarga elétrica, caso o potencial entre as esferas seja suficiente à descarga disruptiva entre elas.

Com a utilização deste princípio, tem-se uma chave controlada para o disparo do gerador de impulso, bastando para isso um circuito gerador de pulsos de tensão que devem ser fornecidos ao eletrodo de ignição.

5.6 - SISTEMA DE MEDIÇÃO

Um sistema de medição em alta tensão é composto pelos seguintes elementos : dispositivo de atenuação (divisores de tensão) , condutores de alta tensão , resistor de amortecimento (se necessário) , cabos de medição e impedâncias de terminação e adaptação , instrumentação indicadora e finalmente sistema de retorno à terra [15,16].

Como a técnica para medição em alta tensão requer , na maioria dos casos , uma considerável redução do nível de tensão da ordem de 1000 ou mais , esta atenuação da tensão é acompanhada normalmente por perdas de informação e distorção do sinal de entrada , fenômenos estes que dependem das características do divisor de tensão e das condições em que este divisor será usado.

Mas na realização de ensaios em alta tensão tem-se a necessidade de se ter um conhecimento exato do fenômeno a ser medido.

Assim sendo, para caracterizar um sistema de medição são necessários : fator de escala e sua faixa de validade ; características da resposta ; influência dos objetos vizinhos ; influência da amplitude e da duração da tensão ou corrente aplicada ; influência das condições atmosféricas ; e ainda , a aptidão do circuito de medição de funcionamento na sua tensão ou na sua corrente nominal máxima.

O sistema de medição deve conter uma ficha características com os seguintes dados :

- descrição geral do sistema.
- Identificação dos seus componentes.

- dimensões essenciais.
- detalhes sobre o tipo de retorno à terra.
- comprimento, diâmetro e posição do condutor de alta tensão.
- tipo, comprimento e posição dos cabos de medição, assim como as impedâncias de adaptação aos quais ele é ligado.
- características dos instrumentos utilizados.
- o limite superior da frequência em que o sistema pode ser utilizado.

Se esse sistema é destinado a medir tensões impulsivas, ele vai precisar fornecer com precisão o valor de crista da tensão (via voltímetro de pico ou oscilógrafo) e um registro fiel da sua forma de onda. Por isso ele deve obedecer ainda às seguintes prescrições [58] :

- deve medir o valor de crista dos impulsos plenos e cortados na proximidade da crista com um erro não superior a 3% ;
- para impulsos cortados na frente , devemos ter :
(Tch = tempo de corte)
se Tch maior que 2 μ s - erro menor ou igual a 3% ;
se Tch menor ou igual a 2 μ s - erro menor ou igual a 5%
- para impulsos cortados na frente com Tch menor ou igual a 0,5 μ s, erros superiores a 5% podem ser tolerados;
- medir os parâmetros de tempo que definem a forma de impulso com erro não superior a 10% ;
- medir oscilações em impulsos com precisão suficiente para garantia que elas não superem determinados níveis;
- a relação do divisor deve ser estável e conhecida , com um erro não superior a 1% ;
- o fator de escala do oscilógrafo ou voltímetro de pico deve ser

estável e conhecida , com um erro não superior a 2% ;

- o tempo de resposta deve ser :

- para impulsos atmosféricos cortados na crista ou cauda :
menor ou igual a 0,2 μ s ;

- para impulsos atmosféricos com elevação linear cortado na frente, com tempo de elevação (T_e) :

T_r menor ou igual a 0,05 T_e e T_r menor ou igual a 0,2 μ s.

Os sistemas de medição são classificados segundo o número de componentes da parte de alta tensão, podendo ser de 2 ou 3 componentes.

Esses componentes são :

- divisor de tensão

- condutor de alta tensão

- resistência de amortecimento na extremidade do condutor de alta tensão.

5.6.1 - EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DE IMPULSO

O sistema de medição de impulso pode ser composto de :

a) divisor de tensão , para atenuar a tensão de impulso até o nível compatível com a instrumentação a ser utilizada;

b) voltímetro de pico , para medir a tensão de pico do impulso;

c) oscilógrafo ou um registrador , para registrar a forma de onda de impulso.

5.6.1.a - DIVISORES DE TENSÃO

Como os níveis de tensão envolvidos em sistemas de alta tensão são , de maneira geral , elevados , torna-se necessário reduzi-los de maneira a torná-los compatíveis com os equipamentos de medição. Assim sendo, os divisores de tensão constituem a parte fundamental desses sistemas de medição em alta tensão.

No gerador de impulso de tensão utilizamos 2 (dois) tipos de divisores :

- divisor para tensão contínua ;
- divisor para tensão de impulso

Ou seja, um divisor para controlar o nível de tensão no carregamento (tensão DC) e um para medição da tensão de pico de impulso e da forma de onda gerada.

O divisor resistivo deve ser utilizado para atenuar a tensão DC da ordem de kilovolts para alguns volts. Enquanto isso, o divisor capacitivo deve ser utilizado na medição das tensões impulsivas do gerador , que no caso é da ordem de 10 kV.

Os divisores de tensão são equipamentos cuja construção consiste de um braço de alta tensão e outro de baixa tensão.

O braço de alta tensão é responsável pela atenuação do valor da tensão a valores mensuráveis, e o braço de baixa tensão é a parte do circuito sobre a qual as medidas são executadas.

Os divisores de tensão podem ser construídos com elementos resistivos , capacitivos ou elementos combinados (divisor misto).

Esses elementos são usualmente instalados dentro de um cilindro isolante, tendo em suas extremidades , terminais de

terra e de alta tensão.

A distribuição de potencial do divisor é calculada considerando-se as capacitâncias parasitas as quais influenciam fortemente as suas propriedades de transferência.

As principais fontes de erro para divisores são as capacitâncias de fuga para terra no braço de alta tensão e o efeito da indutância residual no braço de baixa tensão.

5.6.1.a.1 - DIVISOR PARA TENSÃO CONTÍNUA (DC)

No caso de divisores resistivos, o erro é uma função do produto da capacitância à terra e da resistência do braço de alta tensão. Assim, para uma dada tensão o erro pode ser minimizado ou pela diminuição do valor da resistência do braço de alta tensão, ou por compensação da capacitância para a terra pelo ajuste do eletrodo de alta tensão, para dar uma distribuição uniforme de tensão capacitiva ao longo da superfície do resistor.

A resposta de um divisor resistivo pode ser melhorada pela adição de capacitores em série e em paralelo com as unidades de resistores, formando um divisor misto.

Em divisores resistivos, deve-se tomar um cuidado muito grande com relação ao eletrodo de alta tensão, sendo de extrema necessidade, em caso de respostas muito oscilatórias, a blindagem do referido divisor.

5.6.1.a.2 - DIVISOR CAPACITIVO

Ao contrário do que ocorre na medição do nível DC (ou tensão de carregamento do capacitor C_g), a medição de impulsos se mostra razoavelmente mais complexa por envolver parâmetros que variam rapidamente no tempo.

Por exemplo, para um impulso da forma 1,2/50 μs que tenha uma amplitude de 10 kV, a taxa de subida máxima é da ordem de 10 kV/ μs , bem mais alto que os normalmente encontrados em medição por meios eletrônicos.

Por outro lado, uma onda 1,2/50 μs que seja cortada na frente com 10 % do valor de pico terá uma duração em torno de 100 ns, igualmente rápido para boa parte dos circuitos convencionais.

Para podermos assegurar a fidelidade das medidas, torna-se necessário termos um bom conhecimento do fenômeno a ser medido, e dimensionar os dispositivos em função desses valores esperados.

No caso do divisor, temos basicamente:

- a) Tensão máxima do impulso: 10 kV
- b) Taxa de subida máxima: 10 kV/ μs (para forma de onda 1,2/50 μs)
- c) Tempo de resposta: 50 ns (para permitir a leitura de ondas cortadas em até 10 % na frente).

As especificações (b) e (c) sugerem que devemos ter uma boa análise da resposta no domínio da frequência e resposta ao degrau [25,30].

Em particular para o impulso da forma 1,2/50 μs , o

espectro do sinal a ser medido pode ser visto na figura 30 .

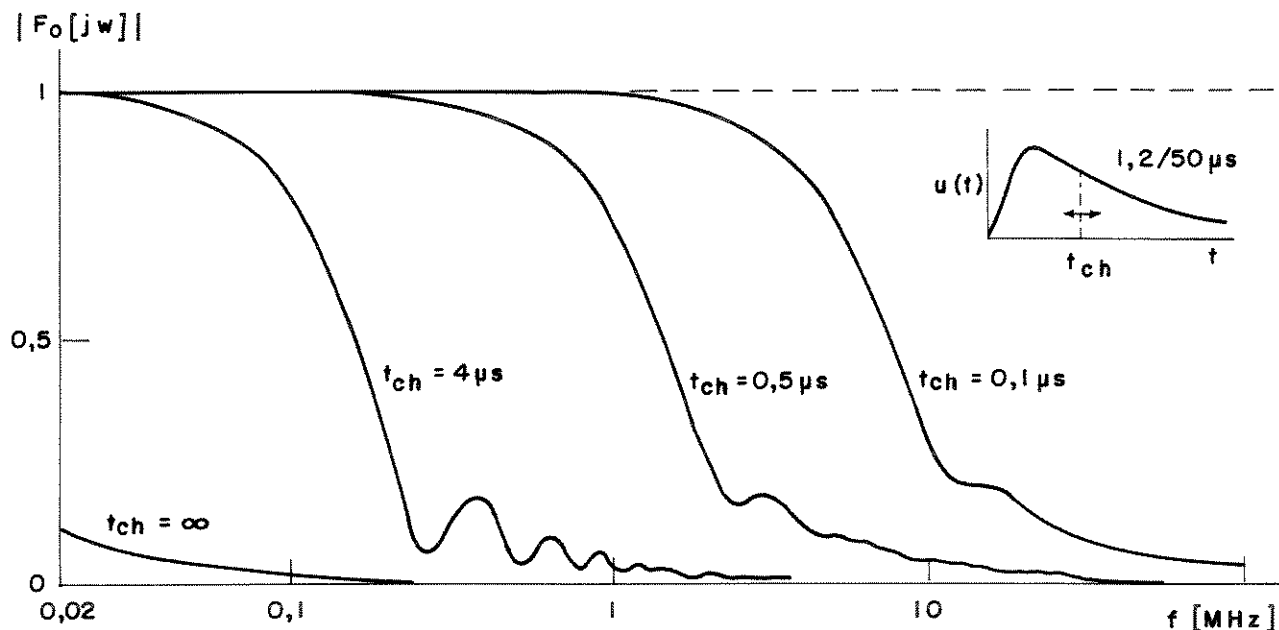


Figura 30 - Espectro Resultante de um Impulso $1,2/50 \mu s$ cortado.

Se o impulso for pleno, as componentes consideráveis se estendem até a faixa de 230 kHz . Por outro lado, se a onda for cortada em algum instante pela disruptura do dispositivo em teste, o espectro resultante se torna bem mais largo , e conforme a figura 30 , se o tempo de corte T_{ch} for igual a $4 \mu s$, teremos harmônicas consideráveis até a faixa de 1 MHz . Se o impulso for cortado na frente ($T_{ch} = 0,5 \mu s$), as harmônicas atingem facilmente a casa dos 10 MHz . A faixa passante do divisor deve ser então pelo menos da ordem de 10 MHz .

5.8.1.b - Voltímetro de Pico

Um dos pontos básicos de um voltímetro de pico de impulso com dispositivo digital é que este retenha o valor da tensão de pico do impulso a ser registrado, por um tempo suficiente a fim de que se possa efetuar a sua leitura .

Pode-se utilizar dois estágios de retenção de pico , em que o primeiro é otimizado para não degradar a taxa de subida dV/dt , e o segundo para manter V_p (tensão de pico) estável enquanto o voltímetro digital faz a leitura.

5.7 - SISTEMA DE PROTEÇÃO

Considerando-se que as tensões geradas no gerador de impulso de tensão são bastante elevadas , torna-se absolutamente indispensável que o mesmo disponha de um sistema de proteção, a fim de evitar danos desnecessários tanto ao operador quanto ao dispositivo sob teste.

Essencialmente, um sistema de proteção deve , assim que for detectado qualquer problema , desligar a alimentação para a parte de alta tensão, descarregar os capacitores de alta tensão e emitir um sinal de alarme.

O circuito de proteção deve atuar basicamente numa das seguintes condições :

a) quando ocorrer um curto ou problema similar no circuito controlador de carregamento , de modo que toda a tensão da rede

fica jogada sobre o primário do transformador.

b) quando começarem a ocorrer disparos aleatórios , fora de controle do circuito trigger.

c) quando não estiver ocorrendo disparos (e conseqüentemente Cg ficar permanentemente carregado).

Como o circuito controlador de carregamento é a parte vital do gerador de impulso de tensão , para termos um controle sobre o nível da tensão de carregamento , o circuito de proteção atua solidariamente com o mesmo.

CAPÍTULO VI

PARTE EXPERIMENTAL

6.1 - Introdução

Após uma explanação teórica das partes componentes do gerador de impulso de tensão com um estágio, realizada no capítulo anterior, apresentamos os detalhes experimentais que puderam ser observados durante o desenvolvimento deste equipamento.

Uma das mais importantes premissas do projeto foi a obrigatoriedade do uso de componentes e materiais adquiridos no mercado nacional para a construção do gerador.

Com isso, a reprodução deste experimento tornou-se viável tecnicamente, assim que desejada.

Um aspecto constatado com esta premissa foi a dificuldade do mercado nacional em atender certas características de determinados componentes, como, por exemplo, os capacitores, resistores, transformadores de alta tensão, materiais condutores e isolantes.

Apresentamos neste capítulo, uma comprovação prática do melhor modelamento teórico e suas equações, apresentados nos capítulos anteriores.

6.2 - Componentes Básicos

6.2.1 - Capacitores

Os capacitores empregados na montagem do gerador foram

de dois tipos.

8.2.1.a - Capacitores constituídos de unidades capacitivas internas de papel impregnado a óleo , que serve também para melhorar a Isolação .

Este papel impregnado tem suas faces metalizadas formando um "capacitor" , que possui como dielétrico o mesmo papel com uma constante dielétrica (ϵ) igual a 3,5 .

Devido às grandes áreas das placas , este "capacitor" é enrolado e comprimido numa direção perpendicular ao seu eixo . Saliente-se que existem isolantes para evitar contatos entre as placas neste processo de empacotamento .

Após a compactação , as unidades têm suas extremidades interligadas por duas placas metálicas , que permitem conexões mais confiáveis e escoamento da carga acumulada em aproximadamente 200 microsegundos , tempo de duração da menor onda escolhida neste projeto (1,2 / 50 μ s) .

Formado o bloco das unidades capacitivas , a etapa seguinte é colocá-lo dentro de uma carcaça metálica , isolando-o através de uma quantidade de óleo . Para se evitar a ruptura do dielétrico (óleo) , as distâncias entre as unidades ativas e a carcaça que é aterrada , e a rigidez dielétrica do óleo isolante são devidamente calculadas e projetadas pelo fabricante .

O ponto externo de alta tensão para acesso ao bloco das unidades capacitivas é isolado por buchas de cerâmica com tensão nominal de 15 kV .

Este tipo de capacitor foi utilizado como C_g . Foram arranjados quatro capacitores de 5 μ F em paralelo . Esta formação

permitiu uma melhor distribuição das correntes impulsivas e consequentemente uma melhor exigência das unidades .

Um outro capacitor de $2 \mu\text{F}$ deste mesmo tipo foi usado como uma das capacitâncias de carga C_b para a formação dos impulsos $100 / 700 \mu\text{s}$ e $100 / 1000 \mu\text{s}$ do gerador de maior energia.



Figura 31 - Foto do capacitor metálico.

8.2.1.b - Capacitores de mica , já descritos no item 5.2.2 do capítulo V , foram utilizados como capacitâncias de valores menores como 200 nF , 25 nF (responsáveis diretos pela formação das ondas impulsivas de $1,2 / 50 \mu\text{s}$, $10 / 700 \mu\text{s}$ e $10 / 1000 \mu\text{s}$), 50 nF e 5 nF (capacitâncias de carga do gerador de impulsos lineares $100 \text{ V} / \mu\text{s}$ e $1 \text{ kV} / \mu\text{s}$ respectivamente).

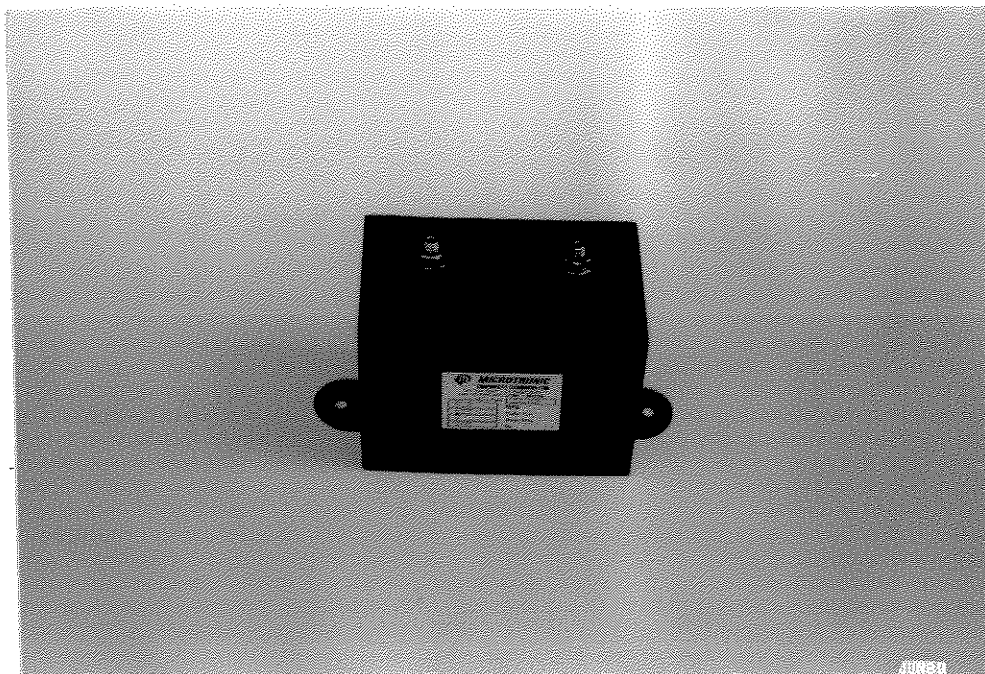


Figura 32 - Foto do capacitor de mica.

6.2.2 - Resistores

Tivemos dois tipos básicos de resistores na composição dos circuitos geradores experimentados. No gerador de energia máxima de aproximadamente 1000 Joules (tensão máxima = 10 kV), os componentes resistivos foram construídos nos nossos laboratórios, enquanto os demais foram encomendados junto ao mercado nacional.

Os resistores encomendados junto a firmas especializadas apresentaram pelo menos uma das seguintes desvantagens:

- alto custo;
- fabricação demorada;
- fabricantes com desconhecimento das características especiais para um resistor conformador de impulsos de tensão.

Os resistores têm duas características muito especiais

que devem ser respeitadas : uma indutância própria de valor bastante reduzido e uma alta capacidade de dissipação térmica .

6.2.2.a - Gerador de 1000 J

Os resistores para este gerador de impulso como para os demais são do tipo "anti-indutivo".

Nossos resistores possuem uma base tubular isolante de celeron para os fios de Níquel-Cromo e Manganina .

Esta base foi torneada de forma que os fios fossem mantidos dentro de pequenos sulcos a uma distância constante e segura entre eles . O sentido de enrolamento foi invertido no meio do comprimento total da base , para que a indutância total fosse bem reduzida .

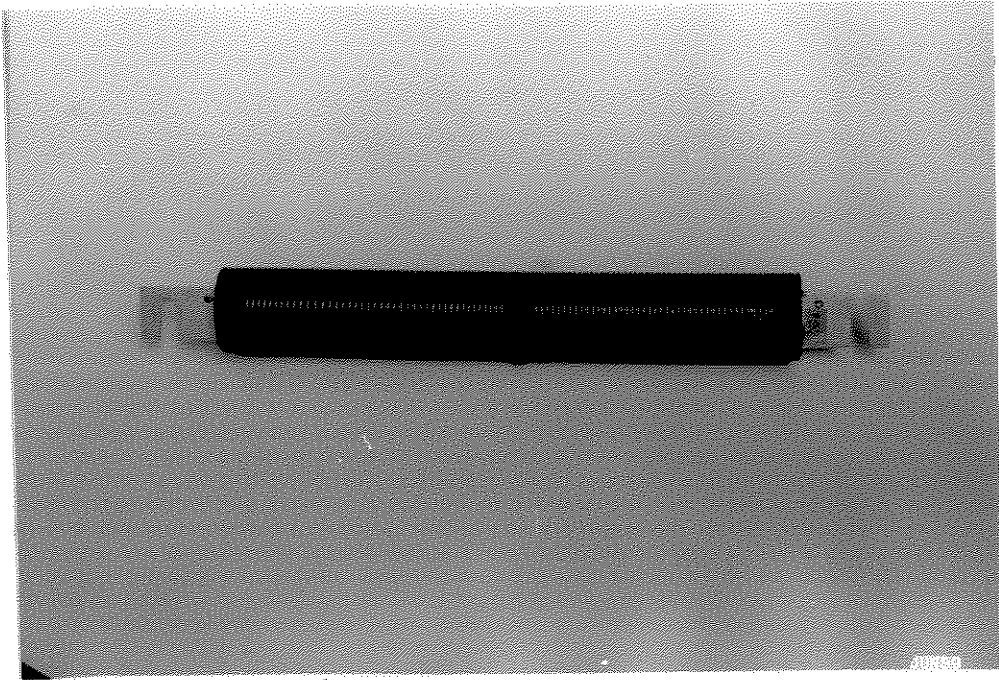
Nas extremidades da base , foram fixados terminais metálicos de resistência específica desprezível , devido ao seu material (Alumínio - $\rho = 0,0292 \text{ ohms.mm}^2 / \text{m}$) , à sua área e ao seu comprimento .

Estes resistores têm um comprimento total de 23 (cm) com um diâmetro externo variando entre 25 (cm) e 42 (cm) .

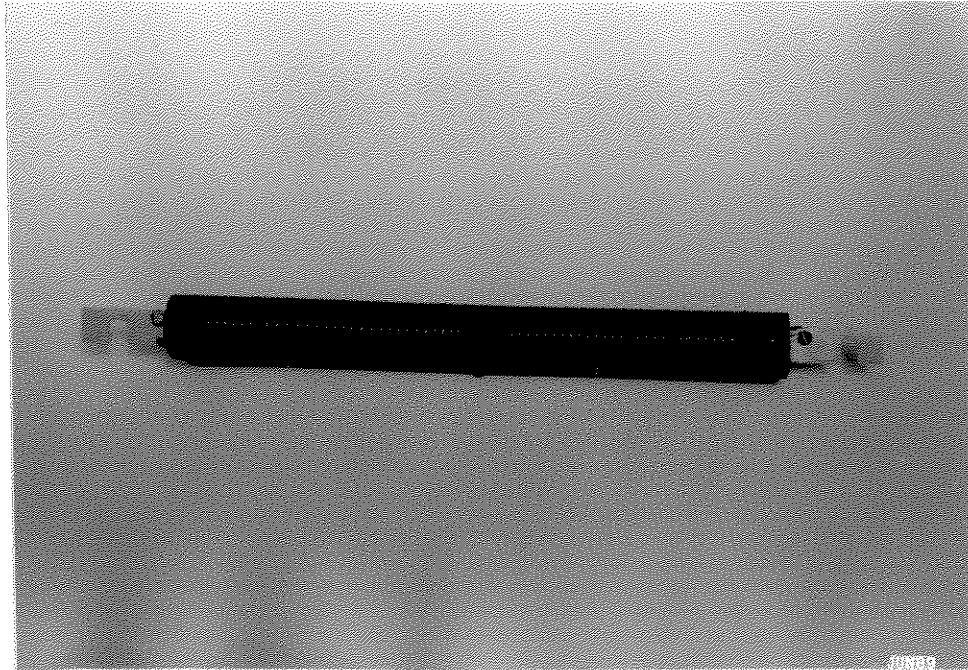
Os fios de Níquel-Cromo (80 % Ni - 20 % Cr) e de Manganina foram escolhidos por possuírem uma característica muito importante neste tipo de utilização : um reduzido coeficiente de variação da resistência por grau de temperatura (α).

- Manganina = 0

- Ni-Cr = 0,00013



a) Resistor de Níquel-Cromo



b) Resistor de Manganina.

Figura 35 - Fotos do resistor do circuito gerador de 1000 J .

O quadro 17 apresenta resumidamente as características principais destes tipos de resistores apresentados.

Quadro 17 - Características dos resistores construídos para o gerador de 1000 J.

Valor ôhmico [ohms]	material	bitola [mm]	número de espiras	diâmetro externo
32,9	Ni-Cr	0,4	116	42 [mm]
3,3	Manganina	1,0	52	32 [mm]
19,1	Manganina	0,4	72	25 [mm]
41,1	Ni-Cr	0,4	60	25 [mm]
16,4	Manganina	0,4	60	25 [mm]
55,5	Ni-Cr	0,4	66	32 [mm]
25,5	Manganina	0,3	54	25 [mm]
31,5	Manganina	0,4	94	32 [mm]
22,7	Manganina	0,3	48	25 [mm]
50,4	Ni-Cr	0,4	60	32 [mm]

Os valores das indutâncias destes resistores foram medidos e controlados para que não representassem uma parcela significativa na indutância-série (L_s), constituída basicamente pela indutância da resistência série (L_{rs}); pela indutância das conexões entre os componentes (L_c); pela indutância do capacitor de carga (L_{cb}); e pela indutância parasita do circuito (L_p).

Apresentamos no quadro 18 os valores medidos das indutâncias intrínsecas dos resistores de 1000 J, e os valores máximos calculados pela teoria.

Quadro 18 - Valores de Indutâncias dos resistores (1000 J).

Forma de onda [μ s]	Valor ôhmico [ohms]	Indutância [μ H]	Indutância máx. [μ H]
1,2 / 50	32,9	1,2	3,4
1,2 / 50	3,3	15,8	-
10 / 700	19,1	17,4	19,8
10 / 700	41,1	14,0	-
10 / 1000	16,4	12,0	14,6
10 / 1000	55,5	23,1	-
100 / 700	25,5	12,6	98,0
100 / 700	31,5	42,3	-
100 / 1000	22,7	10,1	236,1
100 / 1000	50,7	18,0	-

Os nossos resistores apresentaram no mínimo duas vantagens : menor custo e melhor resfriamento .

6.2.2.b - Gerador de 10 Joules ($C_g = 0,2 \mu F$; 10 kV)

Devido à baixa energia envolvida , aos valores de resistências relativamente superiores aos do gerador de 1000 J e , principalmente , às pequenas dimensões dos resistores , optamos pela industrialização imediata destes resistores .

O material escolhido para estes resistores foi o Constantan por possuir também um baixo coeficiente de variação da resistência por grau de temperatura ($\alpha = 0,00001$) e um custo relativamente baixo .

Os valores resistivos mais elevados destes resistores tornaram inadequada a utilização de fios de Manganina e NiCr . A resistência específica do Constantan em ohms por metro de comprimento e milímetro quadrado de seção é maior que as dos outros dois fios .

Estes resistores receberam em toda sua extensão tubular uma camada de cerâmica vitrificada que permitiu uma dissipação adequada do calor originado pela abrupta passagem de corrente pelos condutores , e uma isolação adequada entre espiras .

As suas terminações receberam um "plug" para encaixe rápido nos bornes de fixação projetados .



Figura 34 - Foto do resistor do circuito gerador de 10 J.

As indutâncias próprias destes resistores foram medidas mas a preocupação com elas no projeto foi bem menor , devido aos valores ôhmicos mais altos.

8.2.2.c - Gerador de Rampas

Para este tipo de gerador , foram necessários resistores de fabricação semelhante a dos resistores do gerador de 10 J , devido à baixa energia envolvida e aos altos valores ôhmicos.

8.3 - Comprovação Prática

8.3.1 - Formas de Ondas

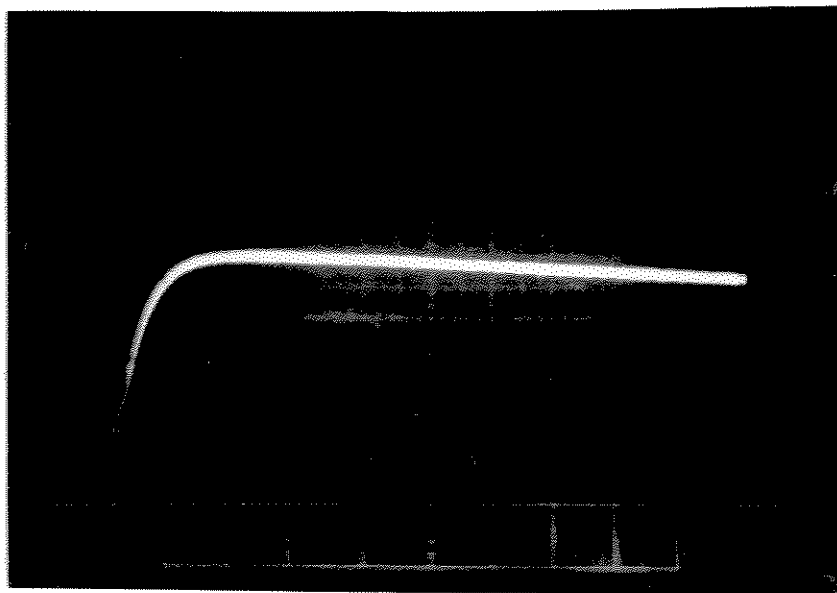
Com o circuito gerador "paralelo-série" constituído pelos valores relacionados no quadro 19 , simulamos as cinco formas de onda dupla exponenciais e duas rampas , e as medimos de acordo com as normas da IEC e da TELEBRÁS , respectivamente, específicas neste assunto.

Quadro 19 - Valores dos resistores e capacitores do gerador de 1000 Joules e do gerador de rampas.

formas de onda	Cg [μ F]	Cb [μ F]	Rs [ohms]	Rp [ohms]
1,2 / 50 μ s	20,82	0,0125	32,9	3,3
10 / 700 μ s	20,82	0,2198	19,1	41,1
10 / 1000 μ s	20,82	0,2198	16,4	55,5
100 / 700 μ s	20,82	2,01	25,5	31,5
100 / 1000 μ s	20,82	2,01	22,7	50,7
1 kV/ μ s	0,1	0,005	1037	100 k
100 V/ μ s	0,2	0,050	1037	100 k

Nas figuras 35-39 apresentamos algumas das formas de

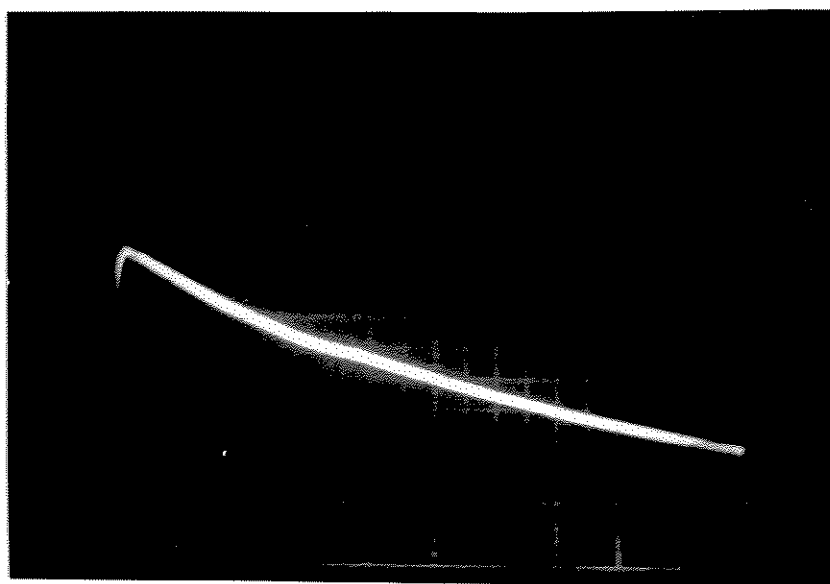
onda medidas com o auxílio de uma ponta de prova Tektronix P6015 (1000:1), e sua comparação com as calculadas.



1 μ s / div.

1 kV / div.

a) Frente da onda



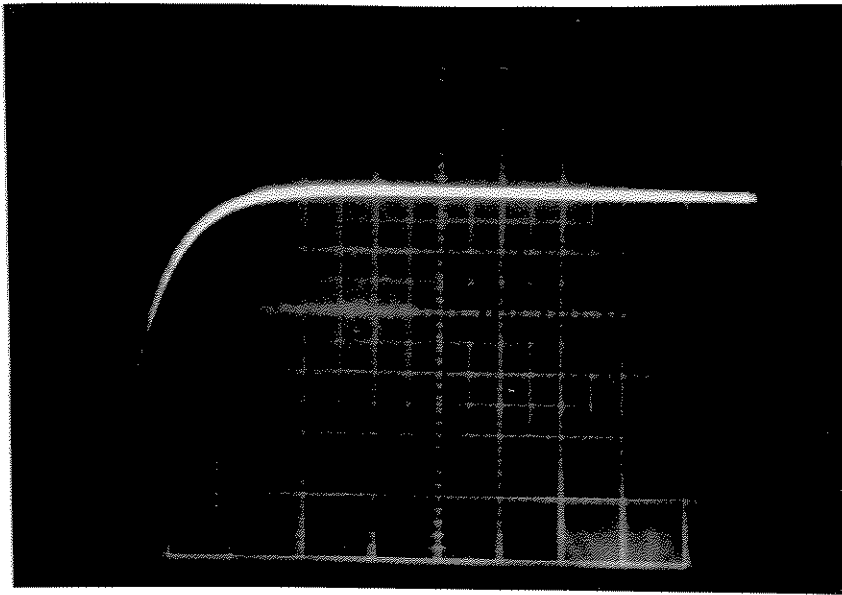
10 μ s / div.

1 kV / div.

b) Cauda da onda

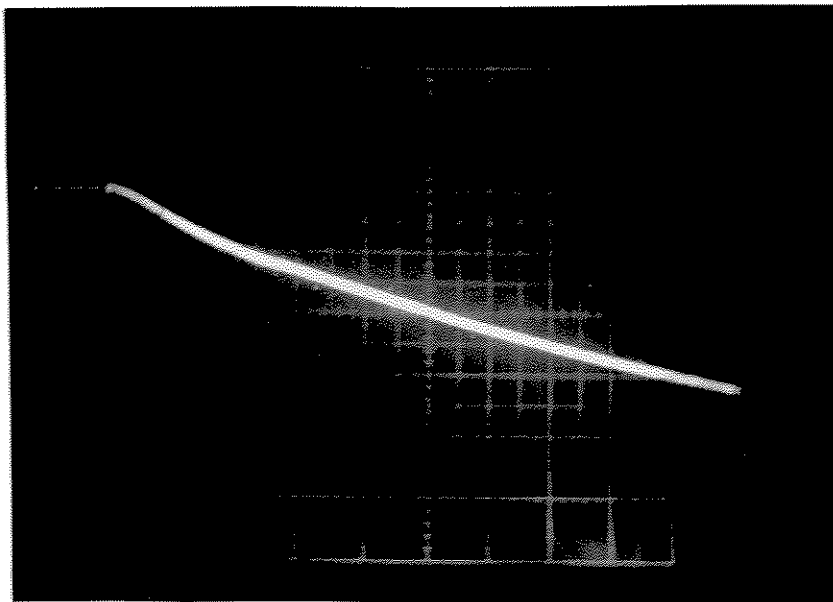
Figura 35 - Forma de onda : teórica = 1,2 / 50 μ s

medida = 1,3 / 49,5 μ s



5 μ s / div.
1 kV / div.

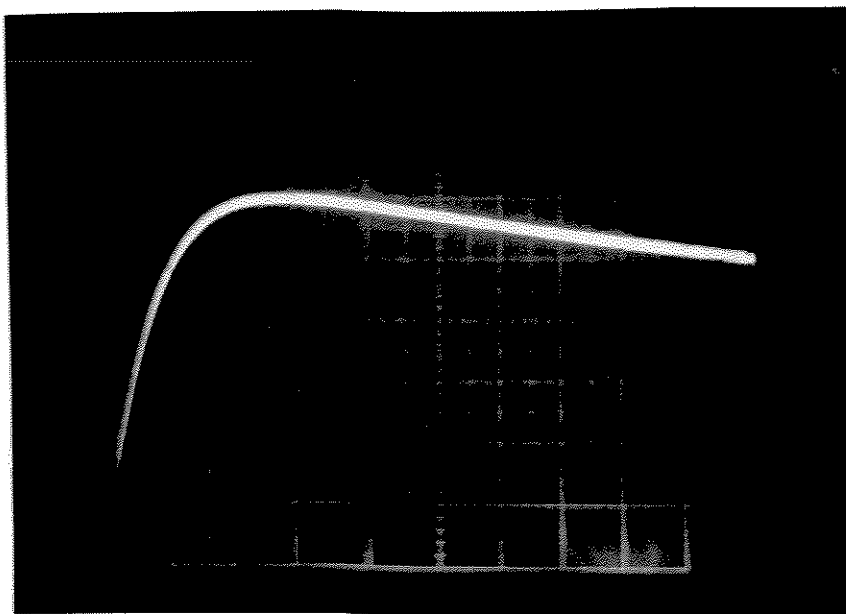
a) Frente da onda



100 μ s / div.
1 kV / div.

b) Cauda da onda

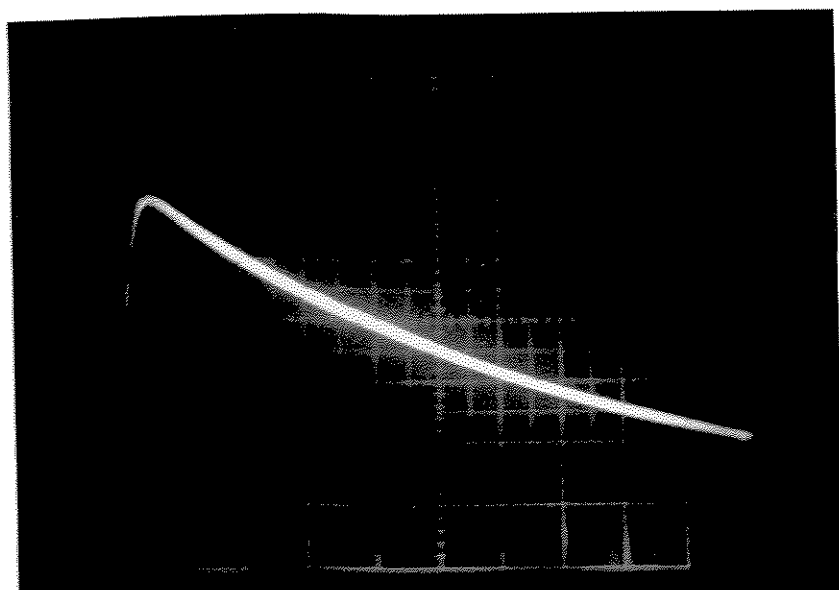
Figura 36 - Forma de onda : teórica = 10 / 700 μ s
medida = 11,2 / 685 μ s



5 μ s / div.

1 kV / div.

a) Frente da onda

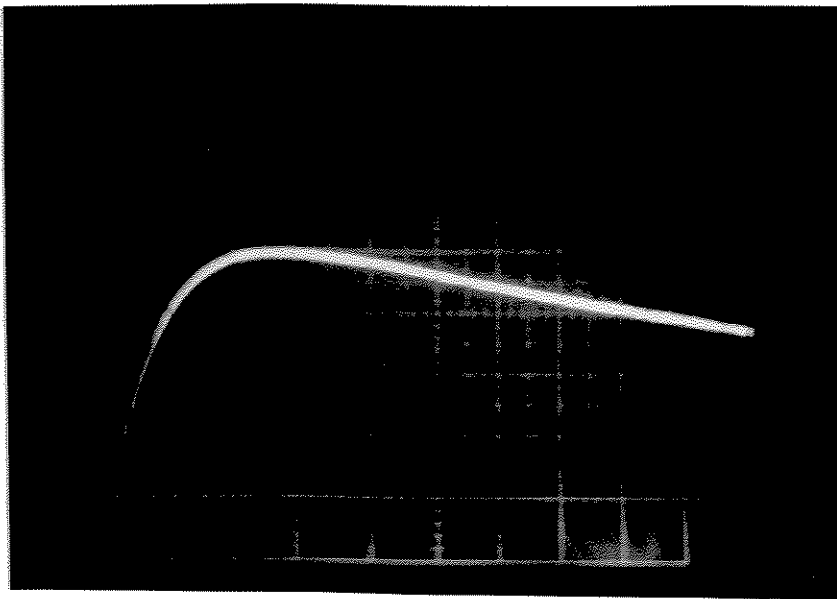


200 μ s / div.

1 kV / div.

b) Cauda da onda

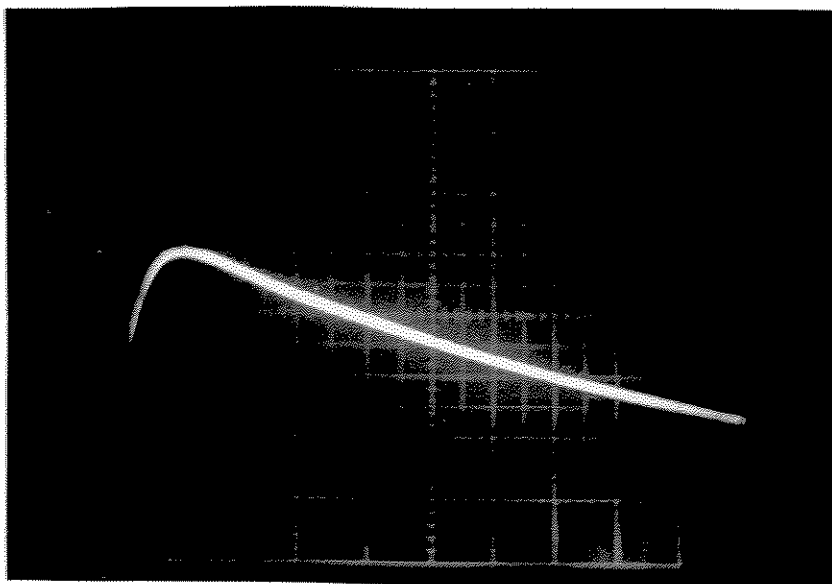
Figura 37 - Forma de onda : teórica = 10 / 1000 μ s
 medida = 9,8 / 1010 μ s



50 μ s / div.

1 kV / div.

a) Frente da onda



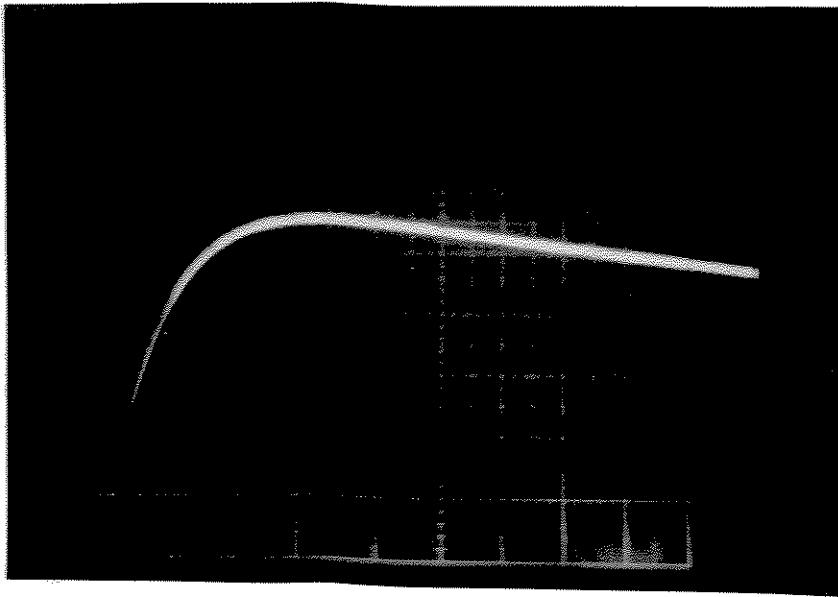
100 μ s / div.

1 kV / div.

b) Cauda da onda

Figura 38 - Forma de onda : teórica = 100 / 700 μ s

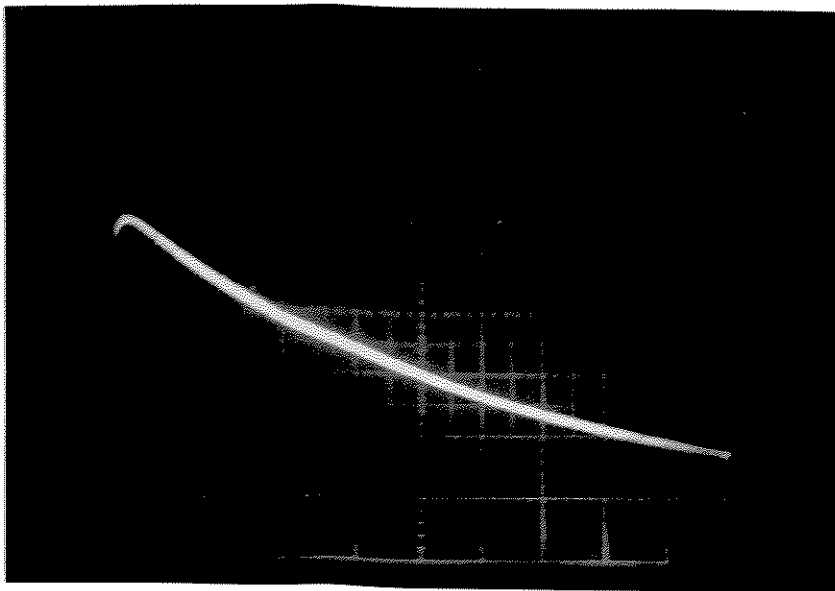
medida = 96 / 692 μ s



50 μ s / div.

1 kV / div.

a) Frente da onda



200 μ s / div.

1 kV / div.

b) Cauda da onda

Figura 39 - Forma de onda : teórica = 100 / 1000 μ s
 medida = 125 / 890 μ s

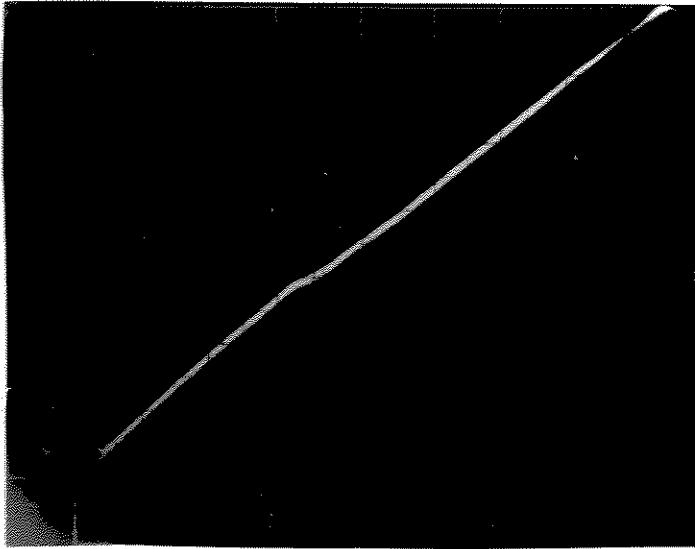


Figura 40 - Forma de onda : teórica = 1 kV / μ s
medida = 1 kV / 1.1 μ s

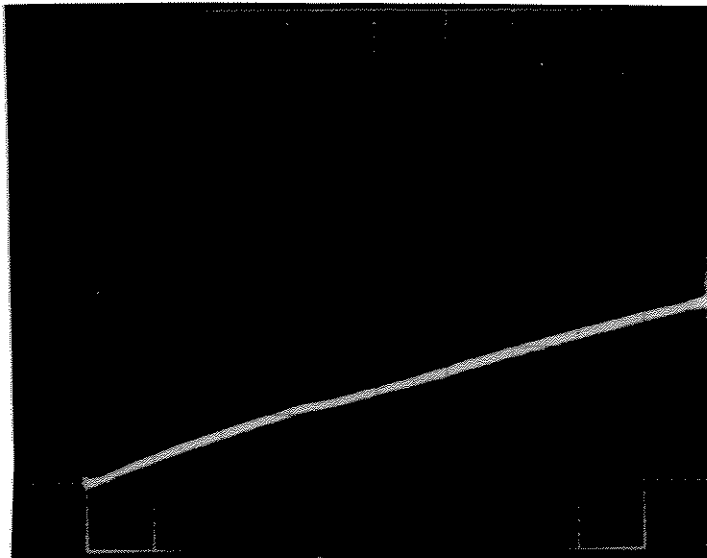


Figura 41 - Forma de onda : teórica = 100 V / μ s
medida = 100 V / 1.1 μ s

6.3.2 - Indutância

A indutância L (ou coeficiente de autoindução) máxima permitida neste tipo de gerador de impulso de tensão foi mantida dentro da faixa aceitável para cada tipo de circuito gerador.

Simulamos uma forma de onda ($10 / 700 \mu s$) com valor de indutância série (L_s) inferior , igual e superior ao valor máximo permitido pela teoria.

O esquema simplificado do circuito gerador ficou configurado conforme a figura 42 , para esta simulação.

Esta análise mostra que a forma de onda de impulso é afetada pelos parâmetros do circuito gerador [1,38].

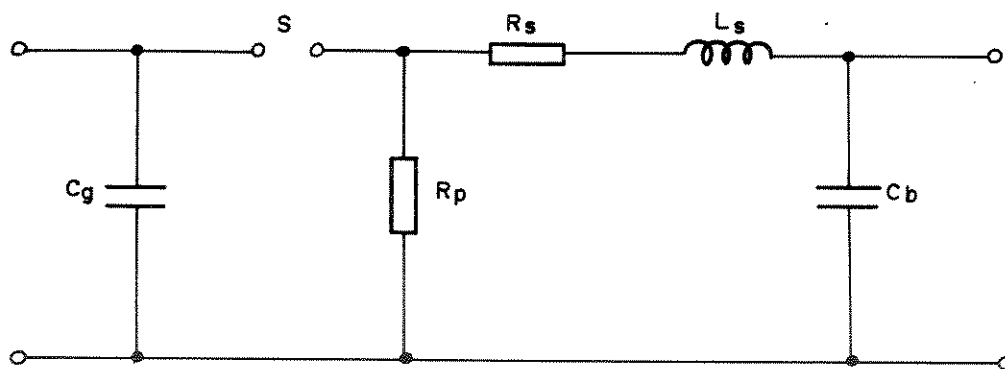


Figura 42 - Esquema simplificado do gerador com indutância L_s .

Os oscilogramas das figuras 43 , 44 e 45 mostram que o aumento gradativo da indutância série L_s provoca inicialmente um acréscimo no tempo de frente de onda , e posteriormente , oscilações na crista da onda de impulso , acima de seu valor máximo permitido.

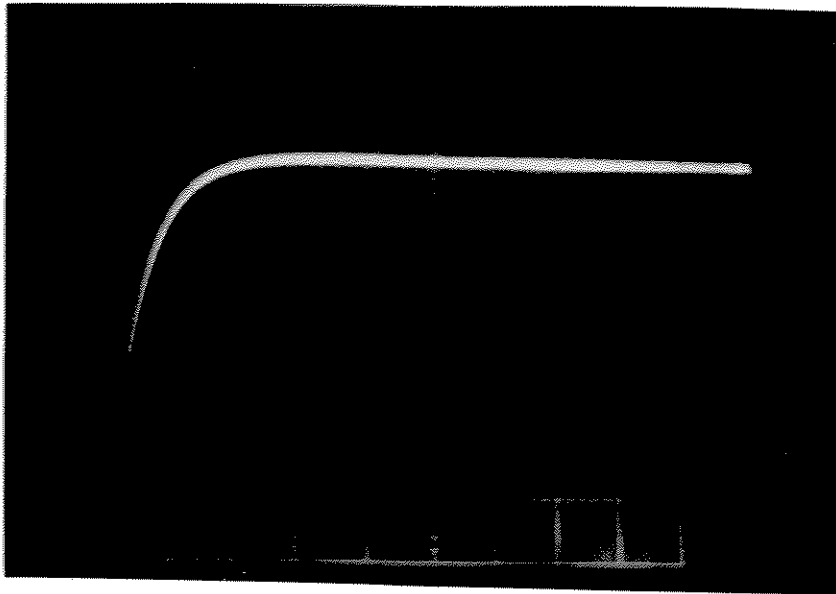


Figura 43 - Forma de onda : 10 / 700 μ s

Indutância máxima teórica : 19,8 μ H

Indutância L_s medida : 20,3 μ H

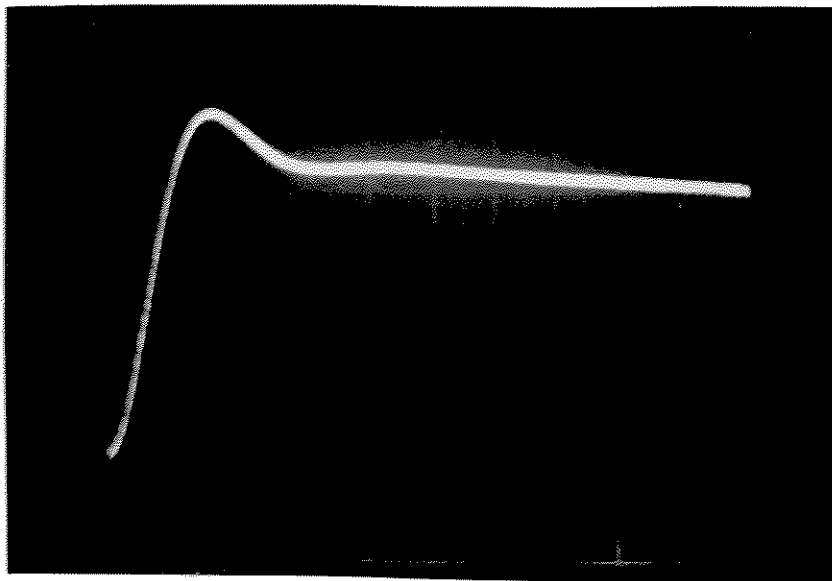


Figura 44 - Forma de onda : 10 / 700 μ s

Indutância máxima teórica : 19,8 μ H

Indutância L_s medida : 35,0 μ H

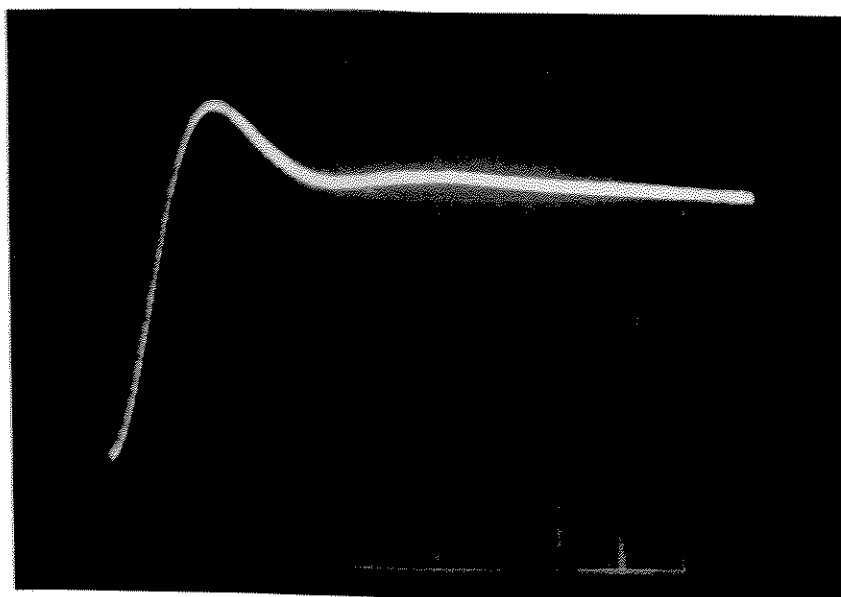


Figura 45 - Forma de onda : 10 / 700 μ s

Indutância máxima teórica : 19,8 μ H

Indutância L_s medida : 52,5 μ H

8.3.3 - Rendimento

A teoria apresentada no item 3.4 do capítulo III deste trabalho pode ser comprovada por inúmeras medidas do rendimento do gerador , através da tensão de pico aplicada sobre a capacitância C_b e da tensão inicial aplicada em C_g .

Apresentamos nos quadros 20 e 21 uma comparação entre os valores teóricos e experimentais dos rendimentos do gerador de 1000 J e 10 J.

Quadro 20 - Valores teóricos e práticos dos rendimentos do gerador de 1000 Joules.

Forma de onda	Valor calculado	Valor medido
1,2 / 50 μ s	95,0 %	93,5 %
10 / 700 μ s	97,0 %	95,3 %
10 / 1000 μ s	97,6 %	95,5 %
100 / 700 μ s	75,2 %	72,1 %
100 / 1000 μ s	80,2 %	78,5 %

Podemos observar a proximidade entre os valores , cuja diferença máxima chega a um erro percentual médio de 2,4 % .

Quadro 21 - Valores teóricos e práticos dos rendimentos do gerador de 10 Joules.

Forma de onda	Valor calculado	Valor medido
1,2 / 50 μ s	96,0 %	94,2 %
10 / 700 μ s	97,1 %	94,8 %
10 / 1000 μ s	97,6 %	95,3 %
100 / 700 μ s	81,9 %	80,2 %
100 / 1000 μ s	87,4 %	85,5 %

6.4 - Particularidades Práticas na Composição do Gerador de Impulso

Descrevemos neste item as principais considerações práticas a serem feitas aos demais sistemas componentes do gerador de impulso [58].

Não é nosso objetivo neste trabalho, detalhar profundamente toda a composição do gerador de impulso.

Daremos uma maior atenção ao sub-item do sistema de medição, pelo fato do mesmo desempenhar uma função importante de confiabilidade e precisão no nosso gerador.

6.4.1 - Circuito de Carregamento

As experiências nos mostraram que o carregamento não deve ser feito arbitrariamente. A utilização de uma fonte de tensão constante, por exemplo, é bastante prejudicial por implicar em altas correntes no início do processo. Por outro lado, a mera utilização de um resistor limitador pode levar ao extremo oposto de aproximação assintótica, demandando um tempo não desprezível. A melhor solução é a utilização de uma fonte de corrente que proporcione um crescimento linear da tensão.

6.4.2 - Transformador de Alta

Ficou demonstrado que é necessário tomar alguns cuidados especiais quando do projeto ou especificação dos transformadores

de alta tensão .

Em particular , as principais deficiências encontradas em alguns dos transformadores analisados foram :

- a) Não-linearidade na característica $V_p \times I_p$ (tensão no primário x corrente no primário) , demonstrando excessivo fator de perda , acima de um certo nível de tensão de entrada (ensaio em aberto).
- b) Má regulação de saída , o que é provocada pelo uso de fios muito finos no enrolamento secundário .
- c) Má resposta em frequência , não permitindo o uso de fontes comutadas de alta frequência no circuito de carregamento .

6.4.3 - Circuito de Disparo do Gerador

Em equipamentos de alta energia , devido ao aquecimento das esferas durante o disparo , ocorre uma rápida degradação do dielétrico isolante do eletrodo de disparo interno . Por tal motivo , usou-se um eletrodo externo no gerador de 1000 Joules , e interno nos geradores de impulsos lineares e de 10 Joules .

O sistema de "trigger" ideal é aquele em que se consegue o disparo independente do distanciamento entre as esferas . Outra alternativa é aquela em que numa determinada distância fixa do "gap" , se consegue o disparo para uma vasta gama de tensões desejadas . Entretanto , pelas próprias características de descarga , este tipo de sistema é bastante difícil de ser viabilizado , a menos que varie a distância do gap , por intermédio de um motor , para cada nível de tensão de impulso ou de carregamento desejado .

O disparo do gerador de impulso , seja ele efetuado por tensões disruptivas ou através de um pulso de trigger , transmitem sinais espúrios ao gerador em menor ou maior intensidade . O sistema de trigger ideal é aquele que não introduz nenhuma perturbação na forma de onda obtida .

Outra observação a ser feita é quanto à dificuldade em se controlar o disparo para tensões baixas , ou seja , para valores menores que 1,0 kV. Neste caso , uma das soluções foi a diminuição do diâmetro da esfera . Porém , isto somente pode ser efetuado até uma determinada dimensão e separação . Uma distância menor aumenta a tensão de descarga estática .

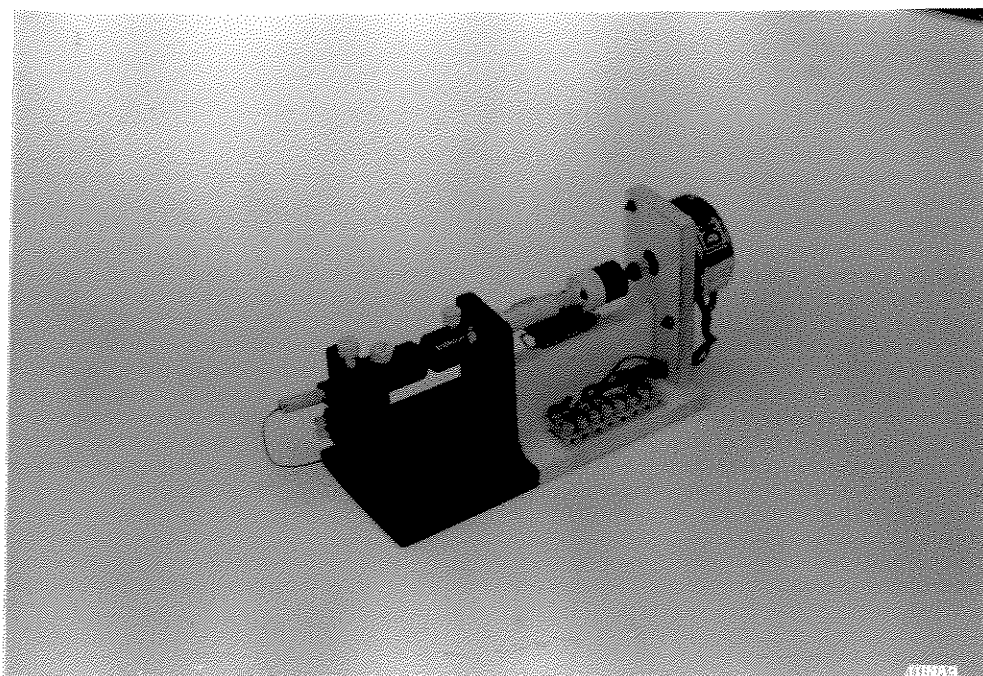


Figura 46 - Foto das esferas (Gerador 1000 J)

6.4.4 - Sistema de Medição

6.4.4.1 - Divisores de Tensão

6.4.4.1.a - Divisor para Tensão Contínua

Uma análise das suas possíveis configurações mostrou que o divisor misto possui uma resposta em frequência muito melhor. Entretanto, especificamente para o gerador de impulso de tensão, vimos que não era interessante ter um divisor com banda passante muito larga. Pelo contrário, é preferível que a frequência de corte seja baixa, pois as oscilações e ruídos presentes na linha de alta tensão (V_{cg}), quando enviados ao controlador de carregamento via divisor, provocam instabilidades no sistema, perdendo-se o controle no nível de carregamento de C_g .

A figura 47 nos mostra um dos protótipos do divisor para tensão contínua construído em nosso laboratório.

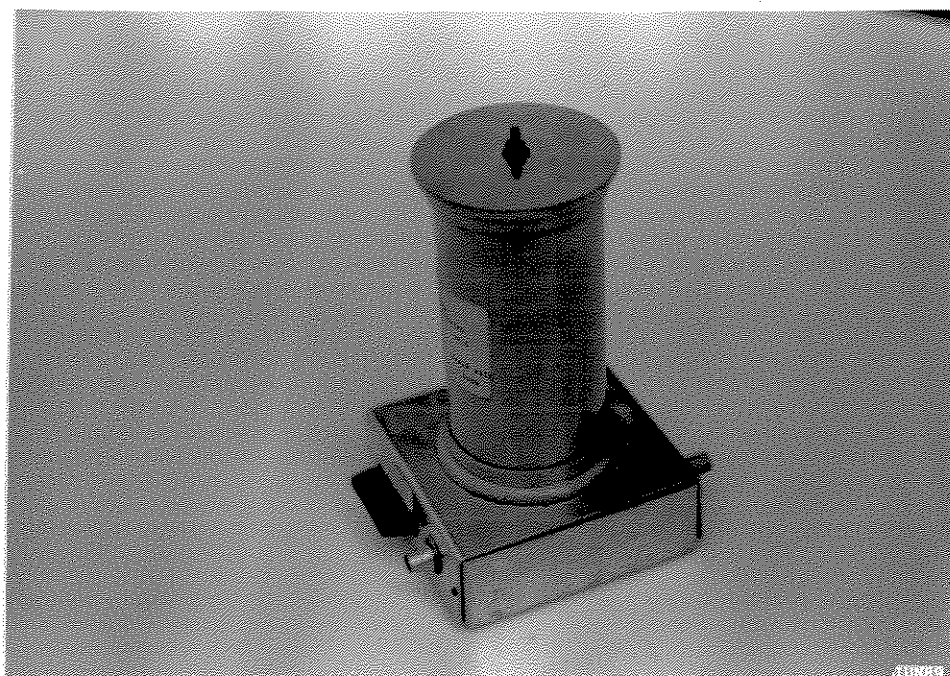


Figura 47 - Foto do divisor para tensão contínua

Em divisores resistivos , deve-se tomar um cuidado muito grande com relação ao eletrodo de alta tensão , sendo de extrema necessidade , em caso de respostas muito oscilatórias , a blindagem do referido divisor .

6.4.4.1.b - Divisor Capacitivo

O desempenho global do divisor vai depender do material com que é feito e da sua geometria . Há pelo menos dois fatores que dependem da geometria do divisor : a indutância parasita e a susceptibilidade e perturbação externas .

Quando temos um divisor comprido , a auto-indutância inerente a todo percurso elétrico começa a afetar seriamente a resposta em frequência e , por extensão , a resposta ao degrau .

O encurtamento físico do divisor está limitado essencialmente pela tensão de isolamento entre o eletrodo de alta tensão e a terra . Por isso , nem sempre podemos reduzir esta dimensão como desejaríamos .

Uma forma de contornar este problema é colocar resistores ao longo da coluna capacitiva , obtendo a configuração de divisor capacitivo atenuado .

Como medida preventiva , procurou-se minimizar todas as conexões , especialmente aquelas que pudessem provocar indutâncias parasitas .

O problema provocado pela indutância parasita é que ela forma um circuito ressonante com a capacitância do divisor , e temos um fenômeno de ondas viajantes ao longo de um circuito LC distribuído . A inclusão dos resistores serve então para atenuar

estas ondas viajantes , conferindo uma maior estabilidade à resposta ao degrau .

Optou-se pelo divisor capacitivo em configuração coaxial por esta permitir uma montagem compacta e , principalmente , blindada . Entretanto , devido a dificuldades construtivas , o braço de baixa tensão foi construído com capacitores discretos dentro de uma câmara blindada (fig. 48) que serve também de base ao conjunto .

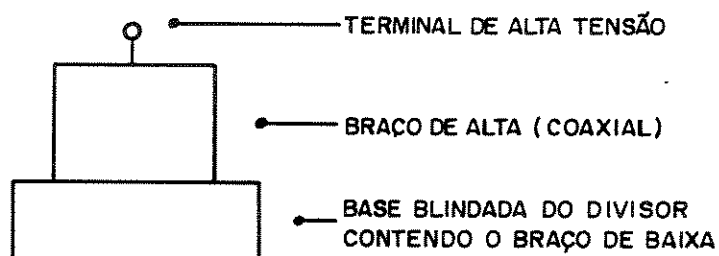


Figura 48 - Configuração externa do divisor capacitivo coaxial para impulsos .

Finalmente , o casamento de impedâncias com o cabo do sistema de medição fora providenciado acrescentando-se um resistor em série , conforme a figura 49.

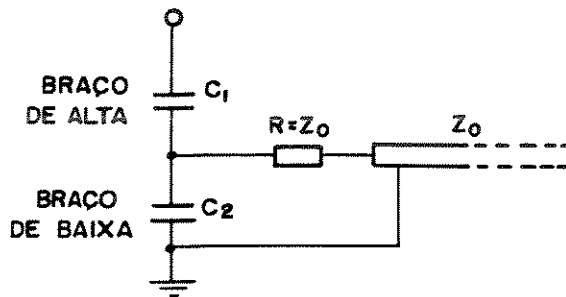


Figura 49 - Diagrama elétrico do divisor capacitivo .

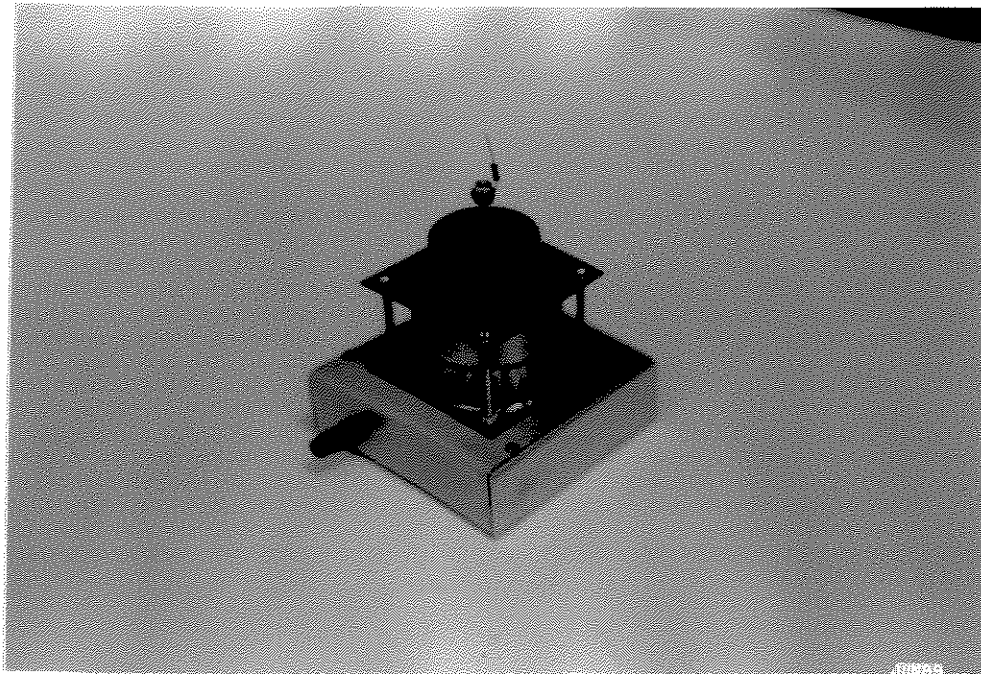


Figura 50 - Foto do divisor capacitivo .

Este tipo de montagem demonstrou ter uma boa imunidade a ruído e uma boa estabilidade na relação de transferência, que foram os primeiros problemas constatados.

Não obstante, constatou-se que o seu desempenho para impulsos muito rápidos ainda deixava a desejar, sobretudo por apresentar um alto índice de oscilações.

As pesquisas desenvolvidas foram no sentido de melhorar esta resposta ao degrau. Foi feita uma análise teórica da influência de possíveis elementos parasitas, tendo-se chegado a importantes conclusões.

Foi constatado que a resposta em frequência dos divisores capacitivos é uma curva similar à figura 51, independente da geometria adotada (montagem coaxial ou linear) ou dos componentes utilizados (capacitores a óleo, cerâmicos ou de material plástico). Tal curva é plana para frequências médias, começando a cair acima de 100 kHz ou 1 MHz, dependendo do tipo de divisor. Tal queda se verifica continuamente até que o ganho atinja uma defasagem de 180 graus. A frequência em que ocorre o mínimo chama-se de frequência de zero.

O primeiro passo dado a partir destas constatações foi no sentido de se obter um modelamento teórico de um divisor que tivesse capacitores ideais associados a elementos parasitas (concentrados) e cuja curva $G_v(f)$ fosse aproximadamente igual a figura 51.

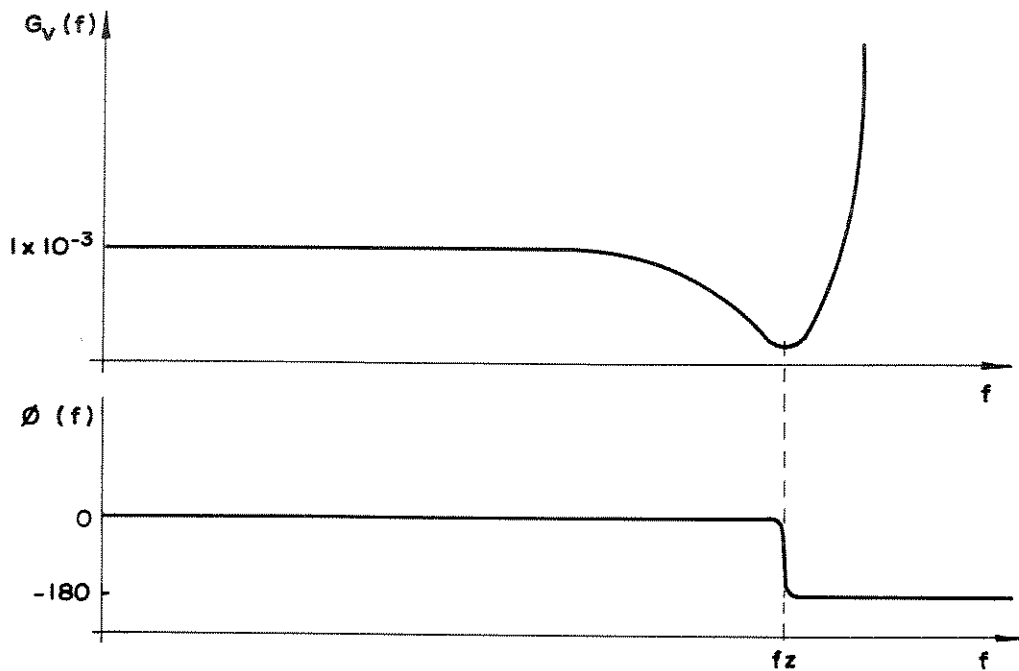


Figura 51 - Resposta em frequência dos divisores capacitivos com relação de 1000 : 1.

Analisou-se modelos de divisores contendo resistores e indutâncias parasitas em associações série e paralelo .

Observou-se que a resposta em frequência que mais se aproxima à figura 51 é dada por um divisor capacitivo que tem uma indutância parasita série no braço de baixa tensão . Tal constatação foi de certo modo surpreendente , pois esperava-se que tivéssemos problemas de indutância parasita série no braço de alta tensão na montagem linear (braço de alta geometricamente longo se comportando como uma linha de transmissão) . Ou ainda devido ao material dielétrico empregado , que apresentasse

problemas de perdas resistivas (tangente delta) igualmente no braço de alta , no caso dos divisores coaxiais .

Uma vez descoberto o modelo adequado , partiu-se para a análise quantitativa , confrontando os cálculos teóricos com os dados experimentais e , a partir daí , para a busca de soluções .

A frequência de vale ou zero ocorre quando :

$$\omega_z^2 = 1 / LC_z^2$$

onde :

ω_z : frequência de vale

L : indutância série do braço de baixa tensão

C_z : capacitância do braço de baixa tensão

Tomando , por exemplo , um dos divisores coaxiais , temos :

$$C_z = 20 \text{ nF} \quad \text{e} \quad f_z = 8,5 \text{ MHz}$$

o que dá uma indutância parasita de :

$$L = 1 / [(2\pi \cdot f_z)^2 \cdot C_z] = 16 \text{ nH}$$

Na figura 52 , temos a curva experimental deste divisor , junto com a curva teórica calculada para este modelo (L_s no braço de baixa tensão) , tendo a frequência de zero em 8,5 MHz . Observa-se assim uma grande similaridade entre ambas as curvas .

Descoberto o principal elemento parasita , partiu-se para a busca das soluções .

Como se pode notar pelo gráfico da figura 52 , o grande inconveniente que , para componentes espectrais de frequências mais elevadas , há uma atenuação menor do que aquela esperada para o divisor . Ou seja , componentes de alta frequência acabam não sendo atenuadas por este divisor .

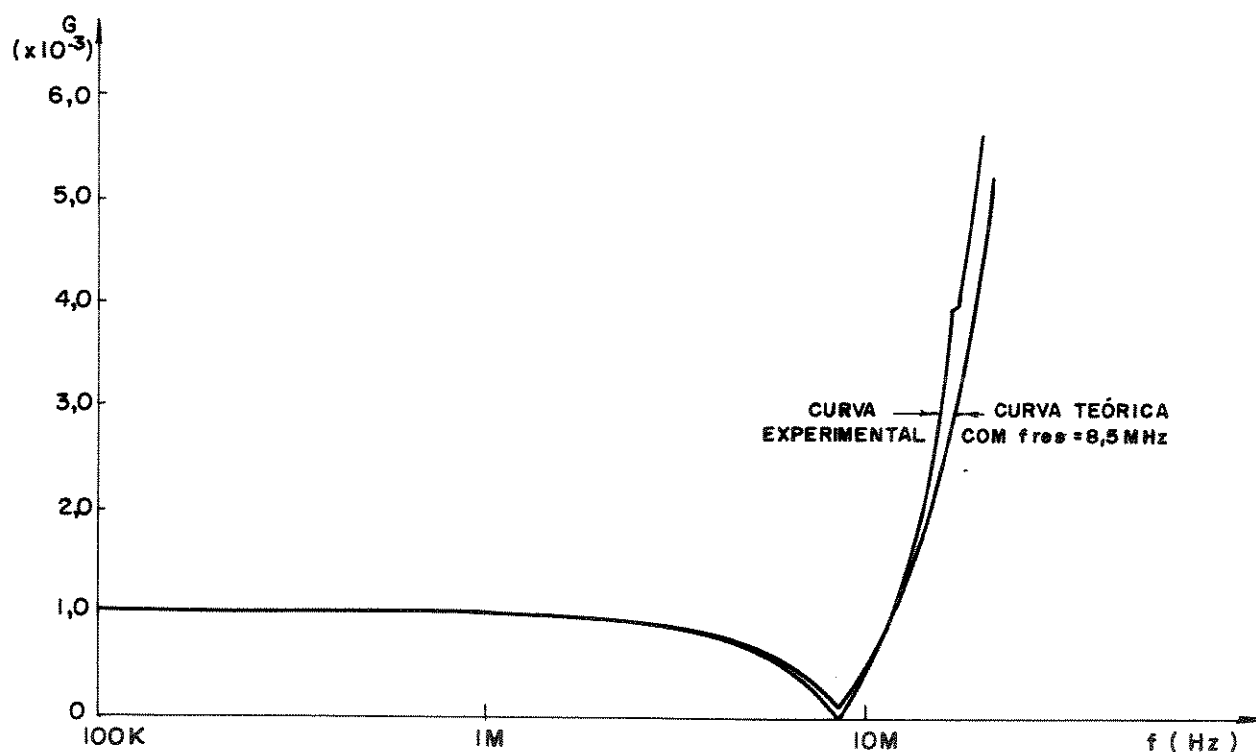
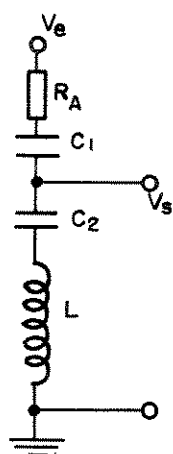


Figura 52 - Curva experimental/teórica do divisor capacitivo.

Para tentar contornar este inconveniente , colocou-se um resistor série no braço de alta tensão (figura 53), o qual deu uma característica de filtro passa-baixas ao divisor .



R_A = RESISTOR DE ATENUAÇÃO DE ALTAS
FREQÜÊNCIAS

C_1 = BRAÇO DE ALTA - 22 pF

C_2 = BRAÇO DE BAIXA - 22 nF

L = INDUTANCIA PARASITA - 16 nH

Figura 53 - Divisor capacitivo com resistor de atenuação para altas frequências .

Na figura 54 , temos a resposta em frequência para este divisor (com resistor de atenuação $R_a = 1 \text{ k}\Omega$) e comparada com a curva teórica . Observamos que até 20 MHz há uma boa aproximação entre as curvas . Para frequências mais elevadas , a curva experimental apresenta uma série de picos e vales , indicando a existência de outros modos de ressonância que precisam ser eliminados .

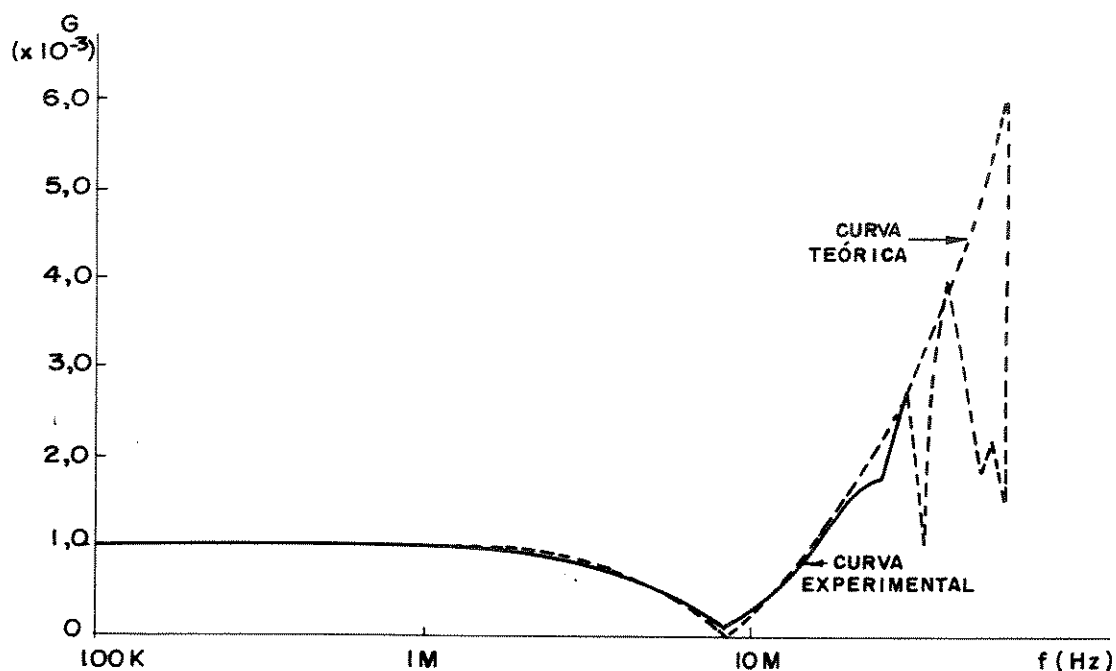


Figura 54 - Resposta em frequência para o divisor com o resistor de amortecimento ($R_a = 1000 \text{ Ohms}$).

Na figura 55 , temos a resposta ao degrau de ambas as configurações , com e sem resistor de atenuação . Observa-se uma drástica redução no "overshoot" com a inclusão do resistor de amortecimento , apesar de ainda existirem oscilações sobrepostas na resposta .

Devemos observar que , ao contrário dos divisores geometricamente longos , onde o resistor de topo serve para casar impedâncias e evitar reflexão de ondas , este resistor neste divisor coaxial serve principalmente para atenuar os componentes de altas frequências , e é em função disto que ele é calculado .

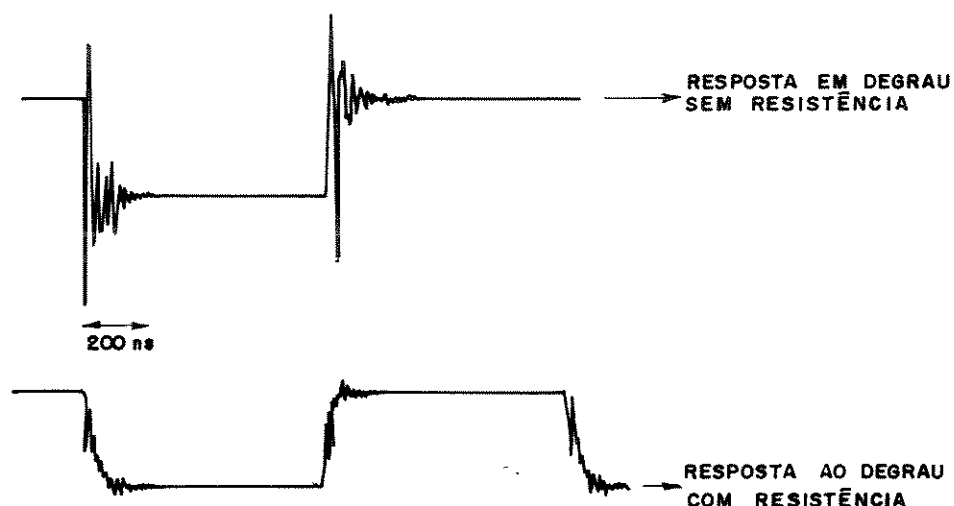


Figura 55 - Resposta ao degrau com e sem resistência de amortecimento.

A outra forma de melhorarmos o desempenho destes divisores é reduzindo a indutância parasita do braço de baixa tensão .

Os cálculos realizados nos levaram a estimar esta indutância como sendo igual a 16 nH . Como isto equivale à indutância intrínseca de um fio condutor com dois centímetros de comprimento , observa-se que não é muito fácil atingir este propósito .

6.4.4.2 - Voltímetro de Pico

Uma observação deve ser feita em relação às ondas cortadas , onde , para tempos de corte menores que 1 μ s , pode se constatar um grande desvio na leitura , fato este provocado pelos mecanismos de limitação de "overshoot" e problemas de interferências .

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e discutidos no capítulo VI , podemos chegar as seguintes conclusões :

- A teoria apresentada para o cálculo dos parâmetros elétricos (resistências , capacitâncias e indutâncias) e do rendimento deste tipo de gerador de impulso é eficiente e precisa para a obtenção dos valores reais correspondentes.
- É possível construir um gerador de impulso de tensão de aceitável qualidade técnica , com as características detalhadas neste trabalho , usando exclusivamente componentes e materiais nacionais.
- Os resultados práticos das cinco formas de onda (1,2 / 50 μ s ; 10 / 700 μ s ; 10 / 1000 μ s ; 100 / 700 μ s e 100 / 1000 μ s) estão muito próximos (erro percentual = 3 %) dos valores teóricos.
- Os materiais : Níquel-Cromo , Manganina e Constantan , podem ser utilizados na fabricação de resistores para conformação de ondas impulsivas , sem qualquer degradação , desde que seguidas as especificações (itens 5.2.1 e 6.2.2).
- A forma de onda de um gerador de impulso é afetada pela indutância total do circuito , resultando em oscilações efetivas quando seu valor máximo estabelecido pela teoria for ultrapassado (item 5.2.1.a.1).

- Pode-se mostrar a viabilidade do uso de microcomputadores para o estudo de circuito de um gerador de impulso. A rapidez e a precisão demonstradas satisfizeram os interesses de nosso trabalho.

- O circuito gerador mais adequado para os nossos objetivos é o circuito "paralelo-série", pois demonstrou vantagens sobre os outros dois circuitos comumente usados na prática (Item 3.7).

- Os divisores para medição de tensões contínuas e tensões impulsivas que conseguimos obter melhores resultados práticos foram, respectivamente, o divisor "misto" e o divisor "capacitivo coaxial".

- Finalmente, a partir da comprovação prática desta teoria, foram construídos 3 (três) geradores de impulso de tensão até 10 kV. Esses geradores possuem funções diferentes entre si.

O primeiro gerador (figura 57) foi desenvolvido para simulação de redes telefônicas convencionais. Ele possui uma capacidade de 1 kJ em 10 kV, e pode reproduzir alguns dos surtos normalizados como 1,2 / 50 μ s, 10 / 700 μ s, 10 / 1000 μ s, 100 / 700 μ s e 100/1000 μ s, com níveis de tensão e energia variáveis.

O segundo gerador (figura 58) foi projetado para satisfazer testes específicos de centelhadores com impulsos lineares de tensão de 100 V/ μ s e 1kV/ μ s.

O terceiro gerador (figura 59) tem capacidade máxima de 10 Joules em 10 kV e foi desenvolvido para testes de outros tipos de dispositivos protetores da rede telefônica.

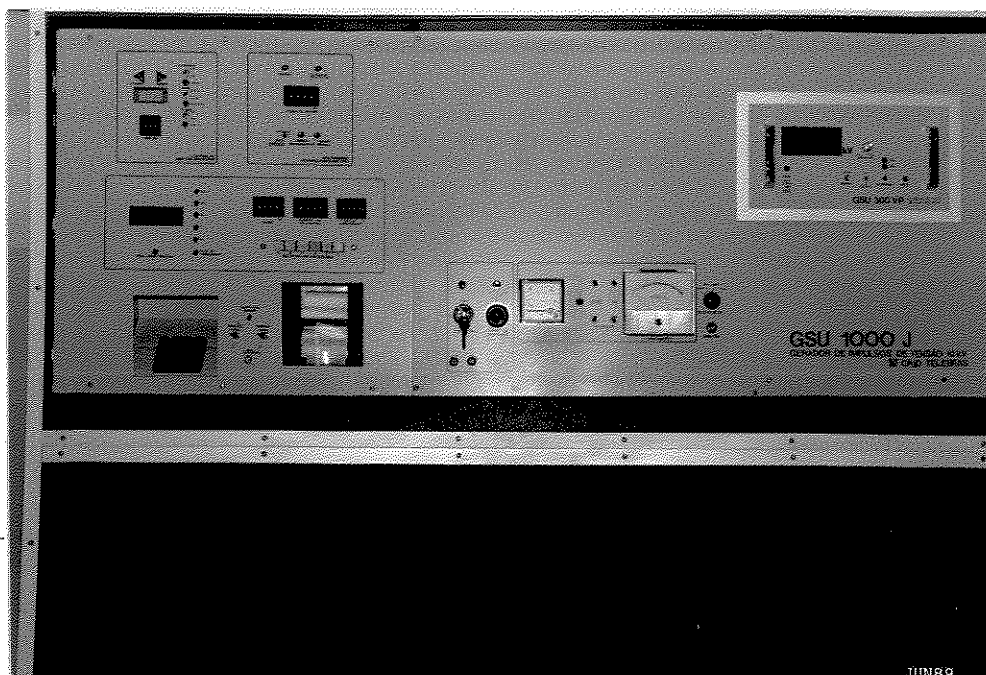


Figura 57 - Gerador de impulso de tensão de 1000 J.

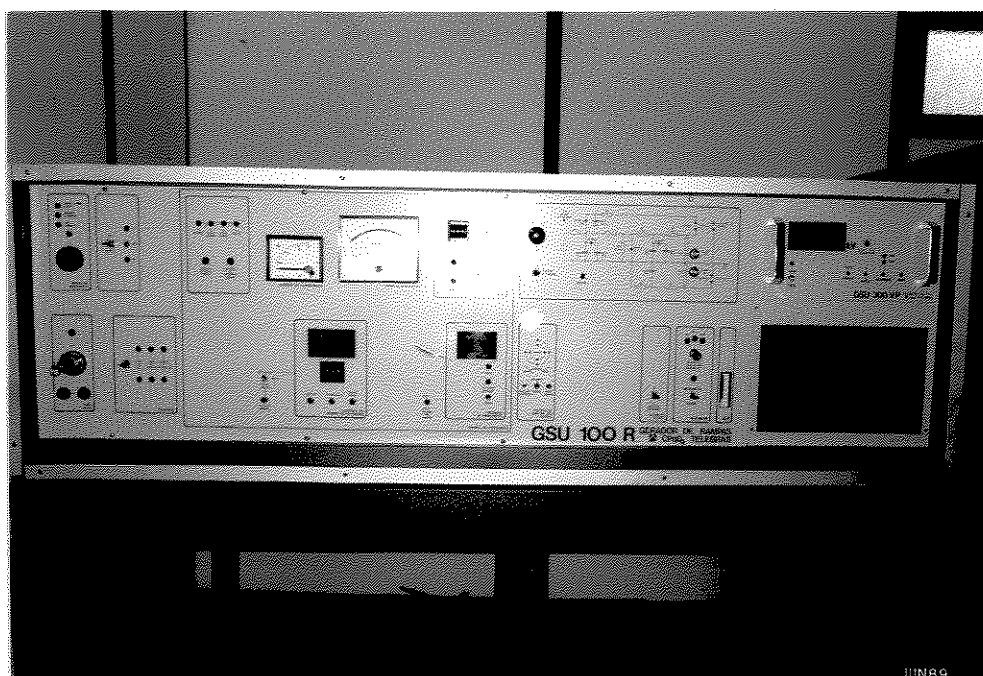


Figura 58 - Gerador de rampas de 100 V/ μ s e 1 kV/ μ s.

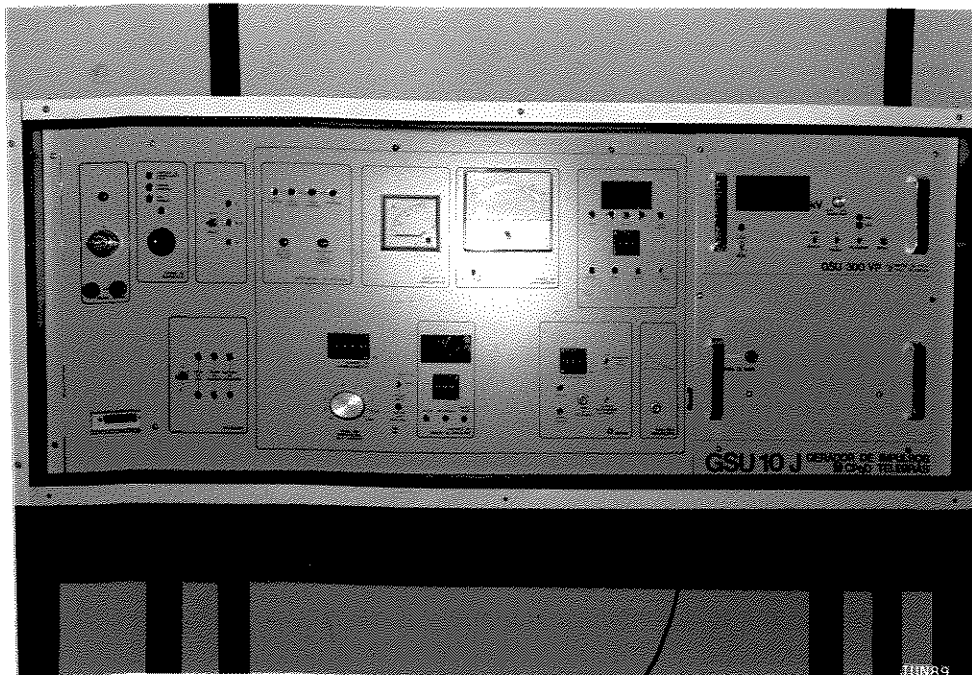


Figura 59 - Gerador de impulso de tensão de 10 J.

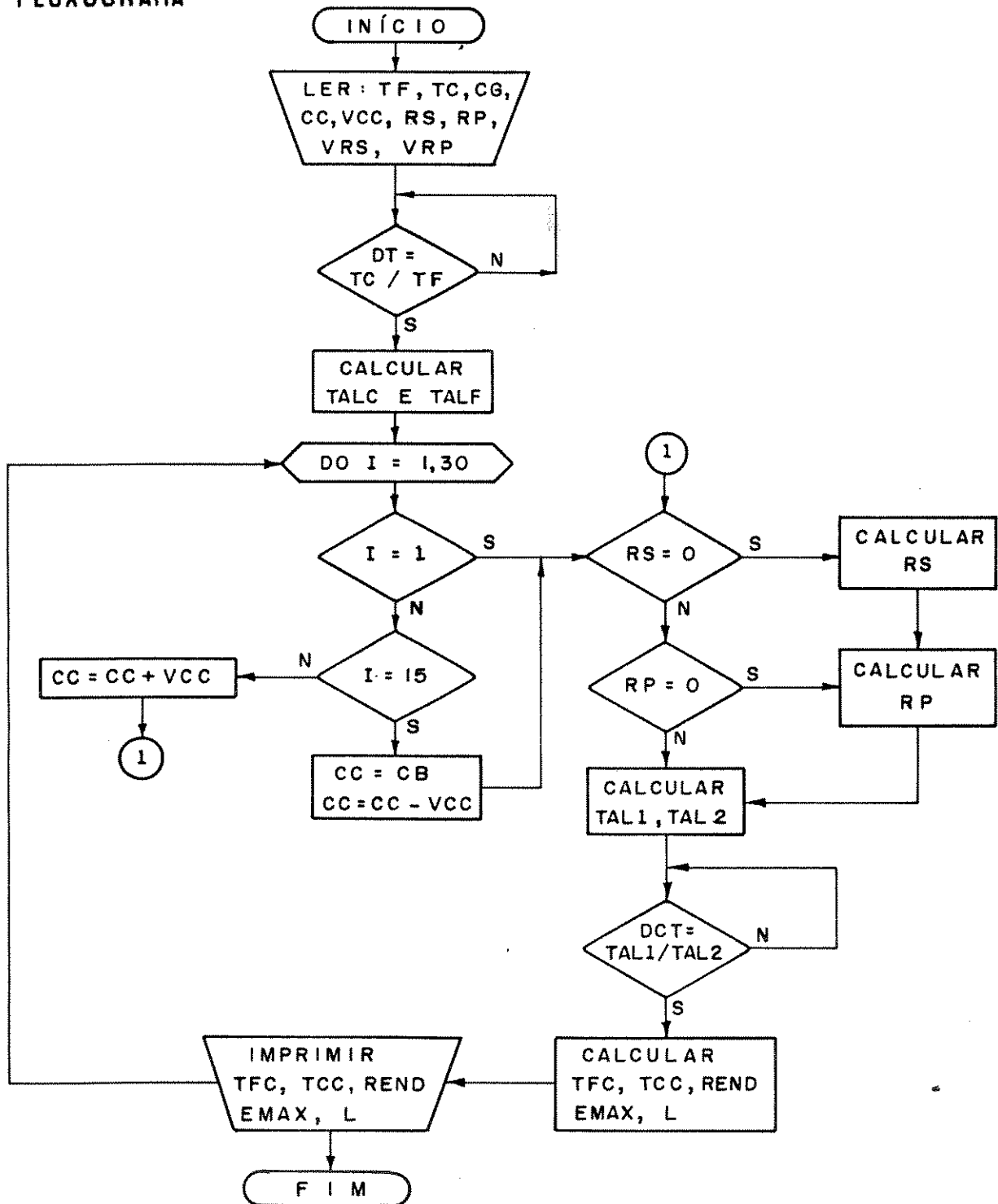
Os três geradores estão sendo utilizados no Laboratório de Proteção Elétrica do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS (Campinas - SP), apresentando uma boa eficiência e bons resultados técnicos aos propósitos a que foram desenvolvidos.

Finalizando a redação deste trabalho, sugerimos a continuidade de pesquisa e desenvolvimento de circuitos geradores, mas para a formação de ondas impulsivas de tensão com frentes menores que 1 μ s. Para um melhor aprimoramento da proteção de redes telefônicas convencionais, deveria-se estudar e desenvolver os circuitos geradores para formação de ondas impulsivas de corrente, compatíveis com os valores normalmente encontrados nas redes convencionais do Brasil.

APÊNDICE A

PROGRAMA PARA ESTUDO DA VARIAÇÃO DA FORMA DE ONDA DE IMPULSO DE TENSÃO

A.1 - FLUXOGRAMA



A.2 - LISTAGEM

Para a obtenção das formas de onda desejadas , recorreu-se ao cálculo computacional , devido à complexidade das equações envolvidas .

Os gráficos que auxiliam na transformação dos tempos reais em constantes de tempo , e vice-versa (gráficos 9 e 10) , foram segmentados , equacionados e sequencialmente incluídos em programas na linguagem FORTRAN .

```
C      Cálculos para um Gerador de Impulso - 10 kV - CIRCUITO B
C      ****
C
C      Entrada de Dados
C
      REAL L
      WRITE(5,1)
1      FORMAT(5X," DIGITE TEMPO DE FRENTE (microsegundos)...")
      READ(5,2)TF
2      FORMAT(F4.1)
      WRITE(5,3)
3      FORMAT(5X,"DIGITE TEMPO DE CAUDA (microsegundos)...")
      READ(5,4)TC
4      FORMAT(F5.0)
      WRITE(5,5)
5      FORMAT(5X,"DIGITE CAPACITANCIA DO GERADOR (microfarads)
*      ...")
      READ(5,6)CG
6      FORMAT(F6.2)
      WRITE(5,7)
7      FORMAT(5X,"DIGITE CAPACITANCIA DA CARGA (microfarads)
*      ...")
      READ(5,8)CC
8      FORMAT(F6.3)
      WRITE(5,9)
9      FORMAT(5X,"DIGITE VARIACAO DA CARGA (microfarads)...")
      READ(5,10)VCC
10     FORMAT(F6.4)
      WRITE(5,11)
11     FORMAT(5X,"DIGITE RESISTENCIA SERIE (ohms)...")
      READ(5,12)RS
12     FORMAT(F7.1)
```

```

WRITE(5,13)
13  FORMAT(5X,"DIGITE RESISTENCIA PARALELA (ohms)...")
    READ(5,14)RP
14  FORMAT(F8.1)
    WRITE(5,73)
73  FORMAT(5X,"DIGITE VARIACAO DE RS (ohms)...")
    READ(5,74)VRS
74  FORMAT(F5.1)
    WRITE(5,75)
75  FORMAT(5X,"DIGITE VARIACAO DE RP (ohms)...")
    READ(5,76)VRP
76  FORMAT(F5.1)
    CB=CC
    IF(RS.EQ.0)GO TO 110
    RD=RS
110  IF(RP.EQ.0)GO TO 111
    RE=RP

C
C  Calculos das Constantes de Tempo
C
111  DT=TC/TF
    X=ALOG10(TC/TF)

C
    IF(DT.GT.5.)GO TO 120
    A=1.7*X-0.33
    B=-3.0*X+3.23
    GO TO 400

C
120  IF(DT.GT.6.)GO TO 121
    A=1.31*X-0.08
    B=-1.58*2.23
    GO TO 400

C
121  IF(DT.GT.7.)GO TO 122
    A=1.0*X+0.19
    B=-1.0*X+1.78
    GO TO 400

C
122  IF(DT.GT.8.)GO TO 123
    A=0.9*X+0.27
    B=-0.9*X+1.70
    GO TO 400

C
123  IF(DT.GT.9.)GO TO 124
    A=0.8*X+0.36
    B=-0.62*X+1.44
    GO TO 400

C
124  IF(DT.GT.10.)GO TO 125
    A=0.6*X+0.55
    B=-0.46*X+1.29
    GO TO 400

C

```

```

125     IF(DT.GT.15.)GO TO 126
        A=0.5*X+0.65
        B=-0.38*X+1.21
        GO TO 400
C
126     IF(DT.GT.20.)GO TO 127
        A=0.41*X+0.76
        B=-0.27*X+1.08
        GO TO 400
C
127     IF(DT.GT.30.)GO TO 128
        A=0.22*X+1.0
        B=-0.19*X+0.98
        GO TO 400
C
128     IF(DT.GT.40.)GO TO 129
        A=0.25*X+0.96
        B=-0.15*X+0.92
        GO TO 400
C
129     IF(DT.GT.50)GO TO 130
        A=0.1*X+1.2
        B=-0.11*X+0.85
        GO TO 400
C
130     IF(DT.GT.60.)GO TO 131
        A=0.13*X+1.16
        B=-0.1*X+0.84
        GO TO 400
C
131     IF(DT.GT.70.)GO TO 132
        A=0.14*X+1.13
        B=-0.06*X+0.76
        GO TO 400
C
132     IF(DT.GT.80.)GO TO 133
        A=0.12*X+1.17
        B=-0.08*X+0.80
        GO TO 400
C
133     IF(DT.GT.90.)GO TO 134
        A=0.08*X+1.24
        B=-0.08*X+0.80
        GO TO 400
C
134     IF(DT.GT.100.)GO TO 135
        A=0.04*X+1.32
        B=-0.08*X+0.80
        GO TO 400
C
135     IF(DT.GT.150.)GO TO 136
        A=0.06*X+1.29
        B=-0.04*X+0.73
        GO TO 400
C

```



```

136      A=0.05*X+1.30
          B=-0.04*X+0.73
C
400      TALC=A*TC
          TALF=(B/2.)*TF
C
C          Variacao da Carga (microfarads)
C
19      DO 25 I=1,30
          IF(I.EQ.1)GO TO 28
          IF(I.EQ.15)GO TO 26
          CC=CC+VCC
          GO TO 28
26      CC=CB
50      CC=CC-VCC
C
C          Inicio dos Calculos dos Parametros Eletricos
C
28      STAL=TALC+TALF
          PTAL=TALC*TALF
          DCAP=CC/CG
          DCAP1=CG/CC
          DTAL=TALC/TALF
          CONST=SQRT((STAL**2)-(4.*PTAL*(DCAP+1.)))
          IF(RS.EQ.0)GO TO 29
          IF(RP.EQ.0)GO TO 30
          GO TO 27
C
C          Calculo das Resistencias (ohms)
C
29      RS=(1.0/(2.0*CC))*(STAL-CONST)
30      RP=(1.0/(2.0*(CG+CC))*(STAL+CONST)
27      TAL1=1./2.*(((RP*CG)+(RS+RP)*CC)+(SQRT((((RP*CG)+
* ((RS+RP)*CC)**2.)-4.*RP*RS*CG*CC)))
* TAL2=1./2.*(((RP*CG)+(RS+RP)*CC)-(SQRT((((RP*CG)+
* ((RS+RP)*CC)**2.)-4.*RP*RS*CG*CC)))
          DCT=TAL1/TAL2
          X=ALOG10(TAL1/TAL2)
          WRITE(3,60)TAL1,TAL2,RS,RP,TALC,TALF
          FORMAT(5X,F9.1,3X,F9.3,3X,F6.1,3X,F6.1,3X,F9.1,3X,F9.3,/)
C
C          Transformacao das Constantes de Tempo em Tempos Reais
C
          IF(DCT.GT.4.)GO TO 800
          A=0.65*X+0.29
C
800      IF(DCT.GT.5.)GO TO 80
          A=0.61*X+0.31
          B=-2.0*X+2.7
          GO TO 300
C
80      IF(DCT.GT.6.)GO TO 81
          A=0.66*X+0.28
          B=-1.2*X+2.14
          GO TO 300

```

```

C
81      IF(DCT.GT.7.)GO TO 82
        A=0.81*X+0.32
        B=-0.8*X+1.83
        GO TO 300

C
82      IF(DCT.GT.8.)GO TO 83
        A=0.72*X+0.23
        B=-0.9*X+1.91
        GO TO 300

C
83      IF(DCT.GT.9.)GO TO 84
        A=0.62*X+0.32
        B=-0.74*X+1.77
        GO TO 300

C
84      IF(DCT.GT.10.)GO TO 85
        A=0.58*X+0.35
        B=-0.48*X+1.52
        GO TO 300

C
85      IF(DCT.GT.15.)GO TO 86
        A=0.52*X+0.41
        B=-0.56*X+1.60
        GO TO 300

C
86      IF(DCT.GT.20.)GO TO 87
        A=0.49*X+0.45
        B=-0.46*X+1.48
        GO TO 300

C
87      IF(DCT.GT.30.)GO TO 88
        A=0.45*X+0.50
        B=-0.37*X+1.36
        GO TO 300

C
88      IF(DCT.GT.40.)GO TO 89
        A=0.39*X+0.59
        B=-0.33*X+1.3
        GO TO 300

C
89      IF(DCT.GT.50.)GO TO 90
        A=0.33*X+0.69
        B=-0.22*X+1.13
        GO TO 300

C
90      IF(DCT.GT.60.)GO TO 91
        A=0.31*X+0.72
        B=-0.23*X+1.15
        GO TO 300

C
91      IF(DCT.GT.70.)GO TO 92
        A=0.23*X+0.86
        B=-0.17*X+1.04
        GO TO 300

```

```

C
92      IF(DCT.GT.80.)GO TO 93
        A=0.34*X+0.68
        B=-0.22*X+1.13
        GO TO 300

C
93      IF(DCT.GT.90.)GO TO 94
        A=0.16*X+1.0
        B=-0.16*X+1.02
        GO TO 300

C
94      IF(DCT.GT.100.)GO TO 95
        A=0.22*X+0.88
        B=-0.16*X+1.02
        GO TO 300

C
95      IF(DCT.GT.150.)GO TO 96
        A=0.18*X+0.97
        B=-0.14*X+0.98
        GO TO 300

C
96      IF(DCT.GT.200.)GO TO 97
        A=0.13*X+1.08
        B=-0.08*X+0.85
        GO TO 300

C
97      IF(DCT.GT.300.)GO TO 98
        A=0.11*X+1.12
        B=-0.09*X+0.87
        GO TO 300

C
98      IF(DCT.GT.400.)GO TO 99
        A=0.08*X+1.21
        B=-0.05*X+0.77
        GO TO 300

C
99      IF(DCT.GT.500.)GO TO 101
        A=0.07*X+1.22
        B=-0.04*X+0.76
        GO TO 300

C
101     IF(DCT.GT.600.)GO TO 102
        A=0.06*X+1.25
        B=-0.04*X+0.75
        GO TO 300

C
102     IF(DCT.GT.700.)GO TO 103
        A=0.06*X+1.25
        B=-0.03*X+0.72
        GO TO 300

C
103     IF(DCT.GT.800.)GO TO 104
        A=0.06*X+1.25
        B=-0.04*X+0.75
        GO TO 300

```

```

C
104  IF(DCT.GT.900.)GO TO 105
      A=0.04*X+1.30
      B=0.63
      GO TO 300
C
105  A=0.04*X+1.30
      B=0.63
C
300  TFC=(2./B)*TAL2
      TGC=(1./A)*TAL1
      WRITE(5,106)TFC,TGC
106  *  FORMAT(20X,"TEMPO DE FRENTE =",F8.3,/,20X,"TEMPO DE MEIO
      *  VALOR =",F7.1,////)
C
35   RAIZ=SQRT((RP*CG)/(RS*CC))
      REND=RAIZ*((DTAL)**((1.+DTAL)/(2.*(1.-DTAL))))
      RENDP=REND*100.
      EM=0.5*CG*100.
      L=(RS**2.)/(4.*((CG+CC)/(CG*CC)))
C
C   Saída dos Resultados
C
      WRITE(1,601)CG,CC,RS,RP,RENDP,L
      FORMAT(2X,F8.2,2X,F8.4,2X,F7.1,3X,F7.1,4X,F6.1,4X,F6.1)
      GO TO 44
100  *  WRITE(5,45)
45   *  FORMAT("***** FORMA DE ONDA IMPULSIVA FORA DA NORMA IEC
      *  60.2 *****")
44   PAUSE
77   CONTINUE
70   CONTINUE
25   CONTINUE
      STOP
      END

```

BIBLIOGRAFIA

- 1 - J. L. Thomason
"Impulse generator circuit formulas"
AIEE - Vol. 53 , n^o 1 , 169-176 (1934)
- 2 - G. S. Sprague
"The production of impulse test voltages"
AIEE - Vol. 54 , October , 1100-1104 (1935)
- 3 - J. L. Thomason
"Impulse generator voltage charts for selecting circuit constants"
AIEE - Vol. 56 , n^o 1 , 183-188 (1937)
- 4 - J. R. Eaton and J. P. Gebelen
"Circuit constants for the production of impulse tests waves"
General Electric Review - Vol.43 , 322 (1940)
- 5 - W. J. John
"Impulse generator , Marx type"
Proc. IEE - Vol. 95 , Part 1 , 169 (1948)
- 6 - F. S. Edwards , A. S. Husbands and F. R. Perry
"The development and design of high voltage impulse generators"
Proc. IEE - Vol. 98 , 155-160 (1951)

- 7 - G. Ellesworth
"Some characteristics of double-exponential pulse-shaping networks in high-voltage impulse generators"
Monograph nº 231 , referência bibli. 621.319.53 , 403-410 ,
Abril (1957)
- 8 - L. Thione
"Lightning and switching impulse generators"
Seminário patrocinado pelo CESI , Milão , Novembro (1980)
- 9 - Omar Etzel and Gunter Helmchen
"Berechnung der elemente des Stoßspannungskreises für die Stoßspannungen 1,2/5 , 1,2/50 und 1,2/200"
ETZ - A Bd 85 , nº18 , 578-582 (1964)
- 10 - F. C. Creed and M. M. Collins
"The systems concept in generating high-voltage impulses"
IEEE Transactions on PAS , Vol. 89 , nº 7 , 1383-1387 (1970)
- 11 - A. Capasso , C. Mazzeti and U. Ratti
"H. V. Impulse generators equivalent circuits"
IEEE Transactions on PAS , Vol. 91 , nº 5 , 2161-2170 (1972)
- 12 - C. Mazzeti , U. Ratti and A. Tomassi
"Criteria for the elimination of high frequency oscillations in step front HV impulses generators"
IEEE Transactions on PAS , Vol. 96 , nº 1 , 116 (1977)

- 13 - E. Sperandeo
"Ensaio de Impulso em Transformadores"
Engenheiro Moderno , 18-23 , Outubro (1967)
- 14 - IEC - 60.2 (1973) - High Voltage Test Techniques
- 15 - IEC - 60.3 (1976) - High Voltage Test Techniques
Part 3 - Measuring Devices
- 16 - IEC - 60.4 (1977) - High Voltage Test Techniques
Part 3 - Measuring Devices Application Guide
- 17 - NBR 6937 (1981)
Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão .
- 18 - NBR 6938 (1981)
Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão
Guia de Aplicação para Dispositivos de Medição
- 19 - CCITT - Recomendações k.12 - Vol. IX
- 20 - CCITT - Recomendações k.15 - Vol. IX
- 21 - CCITT - Recomendações k.17 - Vol. IX
- 22 - Prática Telebrás 235.610-506 (1985)

23 - Prática Telebrás 235.810-706 (1985)

24 - T. Harada and T. Itami

"A new consideration on a resistor divider for impulse voltage measurements"

IEEE Transactions on PAS , Vol. 85 , 511 (1966)

25 - F. C. Creed , T. Kawamura and G. Newi

"Step response of measuring systems for high impulse voltages"

IEEE Transactions on PAS , Vol. 86 , 1408-1420 (1967)

26 - F. C. Creed and M. M. C. Collins

"Transient impedance of high-voltage impulse generating systems"

IEEE Transactions on PAS , vol. 89 , 1387-1392 (1970)

27 - F. C. Creed and M. M. C. Collins

"Shaping circuits for high voltage impulses"

IEEE Transactions on PAS , Vol. 90 , 2239-2245 (1971)

28 - F. C. Creed , M. M. Collins , A. Pedersen and P. Lausen

"Evaluating impulse measurements - a new approach"

IEEE Transactions on PAS , Vol. 91 , 485-494 (1972)

29 - M. F. Simon And G.L. Leroy

"Contribution to a better understanding of impulse voltage measuring systems"

IEEE Transactions on PAS , Vol. 91 , 478-484 (1972)

30 - A. J. Schwab and J. H. W. Pagel

"Precision capacitive divider for impulse voltage measurements"

IEEE Transactions on PAS , Vol. 91 , 2376 (1972)

31 - K. Feser and M. Modrusan

"Errors in the measurement of front time T1 and amplitude of standard lightning impulses"

CIGRÉ - 33-79 , WG 03 - TF 02 , 22.8 (1979)

32 - Qing-Cheng and W. S. Zaengel

"Investigation of errors related to the measured virtual front time T1 of lightning impulses"

IEEE Transactions on PAS , Vol. 102 , 2379 (1983)

33 - O. Frey

"Electromagnetic compatibility testing of electronic components , subassemblies , measuring instruments and systems"

Publicação Haefely E 1 - 82 (1982)

34 - O. Frey

"The origins , the effects and the simulation of transients ,
as well as their international standardization"

Publicação Haefely E 1 - 59 (1982)

35 - E. Haefely

"Impulse Voltage Generators - Type H , V e T"

Publication number 508 DB5/E (1973)

36 - E. Haefely

"High Performance - High Voltage Resistors"

Publication number E 180.9 (1979)

37 - L. L. Alston

"High Voltage Technology"

Oxford University Press , London (1968)

38 - E. Kuffel and M. Abdullah

"High Voltage Engineering"

Pergamon Press , New York (1970)

39 - A. J. Schwab

"High Voltage Measuring Techniques"

MIT Press , Cambridge (1972)

40 - R. H. Golde

"Lightning Vol. 1 - Physics of Lightning"

Academic Press , New York (1977)

41 - R. H. Golde

"Lightning Vol. 2 - Lightning Protection"

Academic Press , New York (1977)

42 - Dieter Kind

"An Introduction to High Voltage Experimental Techniques"

Vieweg , Braunschweig (1978)

43 - D. W. Bodle and P. A. Gresh

"Lightning surges in paired telephone cable facilities"

Bell System Techn. Journal , Vol. 40 , no 2 , 547-576 (1961)

44 - R. Ahlberg

"Overvoltages caused by lightning on telephone lines"

Research Institute of Helsinki Telephone Company ,

Report no 39 (1967)

45 - H. Fielding

"Protection of telecommunication lines from induced voltages
by the use of gas discharge tubes"

Electr. Commun. , 76-80 (1971)

46 - Y. Ishida

"Induced lightning surges in paired telephone cables"

Review of the Electrical Communication Laboratories, Vol. 20
no 3-4 , 254-262 (1972)

47 - E. Bennison , A.J. Ghazi and P. Ferland

"Lightning surge in open wire , coaxial , and paired cables"

IEEE Transactions on Communications , Vol. 21 , no 10 (1973)

48 - Paulo Nunes Richter

"Indução Elétrica : como minimizar seus efeitos"

Anais IV Semin. Rede das Empresas Sistema TELEBRÁS - 1978

49 - J. Dut

"Overvoltages on subscriber lines"

Electr. Commun. - Vol. 54 , no 2 , 115-119 (1979)

50 - N. Kuwabara , H. Koga , F. Ohtsuki and T. Motomitsu

"Lightning surges induced on overhead and underground
transmission lines"

Paper Tech. Group on EMCJ , IECE Japan , EMCJ-79 , 50 (1979)

51 - H. Koga , T. Motomitsu , M. Taguchi , R. Kaizu and H.
Yamaguchi

"Lightning surge wave characteristics induced in transmission
lines"

Trans. IECE - Japan , JB4-b , no 7 , 827 (1981)

- 52 - T. Motomitsu , H. Koga , M. Taguchi , F. Otsuki , Kuwabara
and R. Kaizu
"Lightning surge characteristics induced in transmission
lines"
EGL Tech. Journal , NTT , Japan , Vol. 30 , no 5 , 1157
(1981)
- 53 - H. Koga , T. Motomitsu , M. Taguchi and R. Kaizu
"Lightning surge inducing principle in transmission lines"
EGL Tech. Journal , NTT , Japan , Vol. 30 , no 5 , 1145
(1981)
- 54 - H. Koga and T. Motomitsu
"Lightning induced surges in paired telephone subscriber
cable in Japan"
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility , Vol. 27
no 3 , 152-161 (1985)
- 55 - T. Suzuki , K. Miyabe and I. Kishizima
"Study on experimental simulation of lightning strokes"
IEEE Transactions - PAS-100 , no 4 , 1703-1711 (1981)
- 56 - H. Fukutomi and I. Tsuboya
"A general view of lightning protection technology"
Japan Telecommunication Review , April 1981 , II 31-38

57 - H. Fukutomi

"Telecommunication outside plant engineering in NTT"

Publicação da NTT - Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation - Japan - May 1983

58 - Relatórios de Pesquisa

"Desenvolvimento de Geradores de Surtos para Testes de Centelhadores"

Contrato Telebrás / Unicamp / FTPT - 046/83

Relatório 1 : Julho / Setembro 1984

2 : Outubro / Dezembro 1984

3 : Janeiro / Março 1985

4 : Abril / Junho 1985

5 : Julho / Setembro 1985

6 : Outubro / Dezembro 1985.

59 - Ioshiaki Doi

"Equipamentos para Ensaio e Simulação em Proteção Elétrica"

Anais do I Simpósio Internacional sobre Novas Tecnologias em Redes Telefônicas - 1985 - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS, Campinas - SP, páginas 119-128.

60 - Ioshiaki Doi e Augusto César Miele

"Desenvolvimento de um Gerador de Impulso de 10 kV, 1000 J"

Anais do IV Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro Agosto de 1987, páginas 798-807.