

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE
UM GERADOR DE IMPULSO DE CORRENTE DE LONGA DURAÇÃO

CARLOS CAIADO BARBOSA ZAGO

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE
UM GERADOR DE IMPULSO DE CORRENTE DE LONGA DURAÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de MESTRADO em
ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DE ENERGIA

Prof.Dr.-Ing.KLAUS NOWACKI
Orientador

Prof.UBIRAJARA ROCHA MEIRA
Orientador

CAMPINA GRANDE

JULHO - 1988



Z18d	<p>Zago, Carlos Caiado Barbosa. Determinação dos parâmetros elétricos de um gerador de impulso de corrente de longa duração / Carlos Caiado Barbosa Zago. - Campina Grande, 1988. 95 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1988. "Orientação : Prof. Dr. Klaus Nowacki, Prof. Ubirajara Rocha Meira". Referências.</p> <p>1. Potência - Energia Elétrica - Correntes. 2. Correntes de Longa Duração. 3. Gerador de Impulso. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Nowacki, Klaus. II. Meira, Ubirajara Rocha. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.3.016.2(043)</p>
------	--

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE
UM GERADOR DE IMPULSO DE CORRENTE DE LONGA DURAÇÃO

CARLOS CAIADO BARBOSA ZAGO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/07/88

Prof.Dr.-Ing.KLAUS NOWACKI
Orientador

Ubirajara Rocha Meira
Prof.UBIRAJARA ROCHA MEIRA
Orientador

E. Costa
Prof.EDSON GUEDES DA COSTA
Componente da Banca

Eng.REGINALDO FREIRE DE SANTANA
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE

JULHO - 1988

SUMÁRIO:

1-INTRODUÇÃO

2-TEORIA

2.1-Sobretensões de manobra e o impulso de corrente de longa duração

2.2-O ensaio de impulso de corrente de longa duração

2.3-Estudo preliminar da possibilidade de adaptação do gerador

2.4.Projeto computacional do gerador de impulso de corrente de longa duração

3.RESULTADOS

3.1-Geradores Projetados: Programa 2

3.2-Impulso de saída: Programas 3 e 4

3.3-Impulso de saída do gerador de corrente do Laboratório de Alta Tensão da UFPB

4-ANÁLISE E CONCLUSÕES

4.1-Análise da forma de onda da corrente com dispositivo linear

4.2-Análise da forma de onda da corrente com dispositivo não-linear

4.3-Conclusões

5-APÊNDICE

5.1-O impulso

5.2-Ensaio com corrente de impulso Retangular

5.3-Projeto das bobinas

5.4-Programa 1

5.5-Programa 2

5.6-Programa 3

5.7-Programa 4

5.8-Programa 5

5.9-Programas TESE1.DAT, TESE2.DAT, PRAIOS.DAT

5.10-Curva Vxt e lxt do Pára-Raios de ZnO tipo XAP ASEA

5.11-Curva Vxt e lxt com Rnão-linear para Gerador GAT2

6-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RESUMO:

A diminuição dos níveis de isolamento dos aparelhos de extra-alta tensão, devido a fatores econômicos e construtivos, motivaram o uso de Pára-Raios como limitadores de sobretensão de manobra. Estas sobretensões provocam correntes de longa duração que, nos níveis de extra-alta tensão, solicitam termicamente os Pára-Raios mais intensamente do que as solicitações provocadas por impulsos atmosféricos.

Para simular estas condições de trabalho dos Pára-Raios, foram desenvolvidos então testes para verificar sua capacidade de escoar correntes desta natureza que, em laboratórios, são geradas por fontes de energia equivalentes a modelos T ou PI das várias seções de uma linha de transmissão.

Este trabalho estuda a possibilidade e as condições para adaptar o gerador de impulso de corrente exponencial do Laboratório de Alta Tensão da UFPB, como gerador de impulso de corrente de longa duração; tomando por base os parâmetros de prova de ensaio de descarga de linhas de transmissão da IEC 99.1/1970. É projetado, com o uso de computador, um gerador de impulso de corrente de longa duração e o seu desempenho é avaliado com carga linear e não-linear segundo os critérios da Norma, e comparado com o gerador de impulso de corrente de longa duração, recentemente adquirido pela Universidade.

1. INTRODUÇÃO:

Desde o início do século tem-se observado defeitos em Pára-Raios devido a baixas correntes de longa duração. Investigações concluíram que estas correntes são fornecidas pelo sistemas de potência, seja a corrente associada a uma descarga atmosférica, seja a corrente associada a uma sobretensão de manobra de amplitude suficiente a causar a operação do Pára-Raios.

Pesquisas iniciadas em 1920 resultaram na primeira norma americana de ensaios de Pára-Raios para correntes de longa duração (NEMA-1952). Entretanto, nesta época já se reconhecia sua limitação, pois especificação apenas de amplitude e duração da corrente de longa duração eram inadequadas para sistemas de extra-alta tensão, não considerando as características dos sistemas de potência.

Paralelamente ao crescimento das tensões nos sistemas elétricos, razões econômicas e construtivas provocaram a diminuição dos níveis de isolamento dos equipamentos de extra-alta tensão. Aos Pára-Raios, que eram usados somente para proteger os sistemas e equipamentos elétricos contra sobretensões devido a descargas atmosféricas, atribuiu-se a função de proteção contra impulsos de manobra, coordenados com os equipamentos protegidos.

Para a simulação das condições de serviço dos Pára-Raios, foi desenvolvido então um teste que o sujeita a uma fonte de energia equivalente à energia armazenada numa linha de transmissão. Esta fonte de energia é um dispositivo de

criação de impulso, onde a energia armazenada em um campo elétrico é descarregada no corpo de prova (Pára-Raios). Fontes de energia deste tipo podem ser feitas de várias maneiras e, a forma escolhida para ensaios com energia de valor elevado, foi a que consiste de uma associação de elementos ressonantes LC (Figura 1.1), que é o equivalente T ou PI das várias seções de uma linha de transmissão (denominado Gerador de Constantes Distribuídas).

Este trabalho estuda a possibilidade e as condições para adaptar o gerador de impulso de corrente exponencial do Laboratório de Alta Tensão da UFPB, como gerador de impulso de corrente de longa duração, tomando por base os parâmetros de prova de ensaio de descarga de linhas de transmissão da IEC 99.1/1970. É projetado, com o uso de computador, um gerador de impulso de corrente de longa duração e o seu desempenho é avaliado com carga linear e não-linear segundo os critérios da norma, e comparado com o gerador de impulso de corrente de longa duração recentemente adquirido pela Universidade.

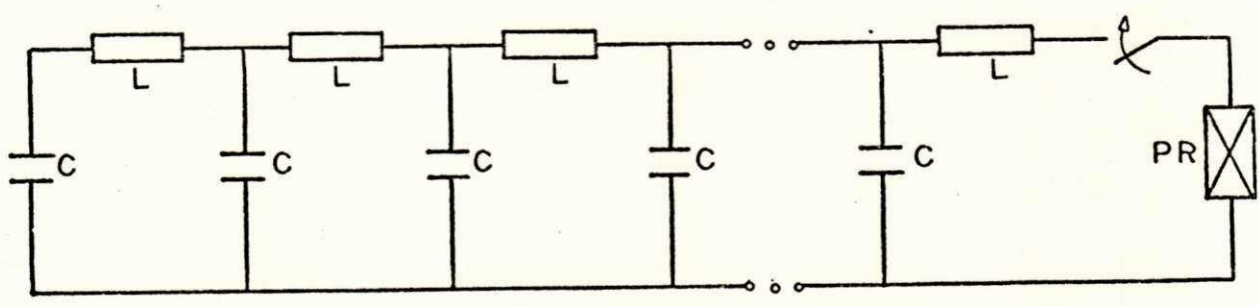


Figura 1.1 - Gerador de Constantes Distribuídas

2. TEORIA:

2.1. Sobretensões de manobra e o impulso de corrente de longa duração:

Impulsos de corrente de longa duração são gerados em sistemas de potência por sobretensões de manobra, que podem ser produzidas de diversas maneiras [1]:

- a) Interrupção de correntes indutivas por disjuntores;
- b) Restabelecimento do arco no disjuntor durante a interrupção de correntes capacitivas, por ocasião do desligamento de linhas longas, de cabos ou de banco de capacitores;
- c) Restabelecimento do arco em seccionadores durante o desligamento de barramentos;
- d) Prestabelecimento do arco ao energizar circuitos capacitivos por meio de seccionadores;
- e) Energização de uma linha ou de um conjunto linha-transformador sem carga inicial;
- f) Religamento de uma linha com carga estática residual;
- g) Energização, desenergização ou rejeição de carga de um conjunto linha-transformador;
- h) Amplificação da tensão por ocasião de energização de circuitos ou do restabelecimento de arcos;
- i) Retirada de faltas trifásicas em linhas defeituosas somente numa extremidade, ou não simultaneamente na abertura das duas extremidades, especialmente no caso de linhas com falta para a terra;
- j) Retirada em seguida à rejeição de carga com regulação de

tensão e sobrevelocidade das máquinas de corrente alternada;

k) Energização quando em discordância de fase;

l) Efeitos de ressonância-lineares, envolvendo interação de componentes lineares indutivos e capacitivos do sistema, como consequência de energização de partes do sistema;

m) Oscilações não-lineares de ferro-ressonância, causadas pela interação de energização ou desenergização entre a capacitância do sistema e a impedância de magnetização do transformador.

Atualmente estas sobretensões são limitadas por meio de procedimentos adequados de manobra nos sistemas de potência, no uso de resistores de pré-inserção e de abertura nos disjuntores, entre outras. A sobretensão de manobra que provoca as condições mais severas para os Pára-Raios, é a gerada no desligamento de longas linhas de transmissão.

O impulso de corrente causada pela sobretensão de manobra, depende das condições do sistema e determina as circunstâncias de trabalho do Pára-Raios; estas condições são [5]:

- A tensão da sobretensão de manobra;
- A impedância de surto e a capacitância para a terra da linha de transmissão, que dependem da tensão do sistema e da construção da linha;
- A resistência não-linear do Pára-Raios;
- O tempo de duração do impulso de corrente, que depende do comprimento da linha de transmissão.

No caso particular da descarga de uma linha de transmissão longa, sobre uma impedância igual a sua impedância de surto, a corrente é um impulso retangular de duração igual a duas vezes ao tempo de viagem da onda transversal na linha e amplitude igual à razão da tensão de carga na linha pelo dobro da impedância de surto.

Se vê das considerações acima que especificações somente de corrente e tempo não representam as condições de serviço dos Pára-Raios em extra-alta tensão; estas só representarão as condições de serviço se levarem em consideração os parâmetros da linha, tensão de serviço e a impedância de surto.

2.2. O ensaio de impulso de corrente de longa duração:

A IEC 99-1/1970 [2] prevê dois métodos de ensaio de correntes de longa duração:

- a) Um ensaio com corrente de impulso retangular para Pára-Raios de 2500 A, 5000 A e 10000 A serviço leve;
- b) Um ensaio que simula a descarga de longas linhas de transmissão para Pára-Raios de 10000 A ou 20000 A serviço pesado.

Veremos, por enquanto, as características do ensaio que simula a descarga de longas linhas de transmissão. O ensaio com impulso de corrente retangular será apresentado no Anexo 5.2.

A finalidade deste ensaio é verificar a capacidade

térmica do elemento não-linear quanto à possibilidade de escoar a corrente de descarga de longas linhas de transmissão. Neste ensaio, a energia armazenada no gerador de impulso de constantes distribuídas, carregado para uma tensão de chaveamento especificada, é descarregada sobre o Pára-Raios.

De acordo com [2], as características dos Sistemas de Potência e dos geradores de constantes distribuídas devem ser as seguintes:

Tabela 2.1 - Características dos Sistemas de Potência

CLASSIFICAÇÃO DO PÁRA-RAIOS OU DE DESCARGA (CLASSE)	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA			
	TENSÃO (KV) *2	LINHA COMP. (KM)	*2 IMP. (OHM)	FATOR DE SOBRETENSÃO (PU) *1
1	até 245	300	450	3,0
2	até 300	300	400	2,6
3	até 420	360	350	2,6
4	até 525	420	325	2,4
5	até 765	480	300	2,2

Obs.: *1 - a base para o valor por unidade é o valor de pico da maior tensão fase-terra do sistema.

*2 - valores aproximados.

Tabela 2.2 - Características dos geradores de constantes distribuídas

CLASSIFICAÇÃO DO PÁRA-RAIOS OU DE DESCARGA (CLASSE)	RESISTÊNCIA CARGA (OHM)	DURAÇÃO VIRTUAL (microsegundos)	TENSÃO DC DE CARREG. (KV)
1	3,3 Vs	2000	3,0 Vs
2	1,8 Vs	2000	2,6 Vs
3	1,2 Vs	2400	2,6 Vs
4	0,8 Vs	2800	2,4 Vs
5	0,5 Vs	3200	2,2 Vs

Obs.: Vs - tensão máxima (KVrms) nominal sobre o Pára-Raios ou seção sem que haja descarga.

A conformidade de um Pára-Raios a um dado serviço está perfeitamente referenciada quando conhecemos sua capacidade em tensão e corrente (amplitude e duração). A tabela acima relaciona tensão e corrente para várias classes de descarga, só que através da resistência, da sobretensão possível e do tempo de duração do impulso de corrente correspondente.

Há uma correlação entre as características dos sistemas e dos geradores de constantes distribuídas; entretanto, não é descrito um método exato de ensaio. A norma IEC propõe apenas o princípio de um circuito de teste e os requisitos da forma de onda, tensão de carregamento, resistor

de carga, impulsos entre intervalos, etc, existindo muitas ⁸ variações possíveis tanto no circuito como na escolha de valores dos vários componentes.

CALIBRAÇÃO:

Antes de efetuar o ensaio, o gerador deve ser calibrado; consiste na aplicação de uma tensão de carregamento igual ou superior a 50% da tensão de carga especificada, e em seguida descarregada através de um resistor de carga.

As características do gerador são consideradas corretas quando $0,95 < K < 1,05$, sendo

$$K = \frac{V_c}{2 \cdot I \cdot R} \quad (2.1)$$

onde: V_c - tensão de carga do gerador (KV)

I - valor de pico da corrente de descarga do gerador (KA)

R - resistência do resistor de carga (ohm), igual a impedância de surto do gerador

O IMPULSO DE CORRENTE:

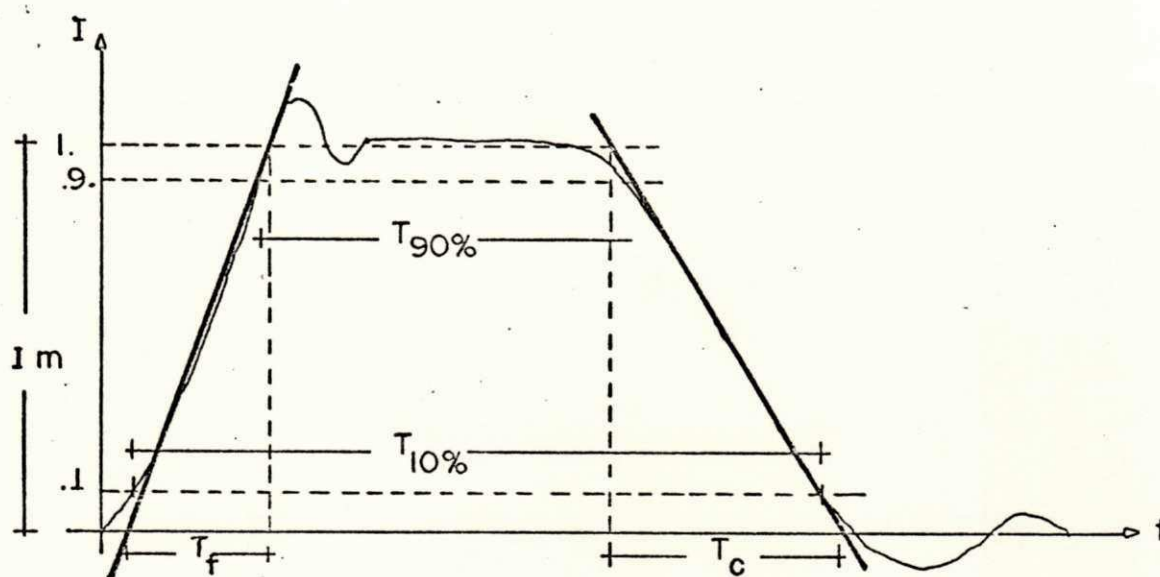
A corrente de descarga deve atender às seguintes condições (ver Figura 2.2):

- a) A duração virtual do pico deve estar entre 100% e 120% do valor especificado na Tabela 2.2;
- b) O tempo virtual total da corrente de descarga não deve ser superior a 150% do tempo de duração virtual do pico

especificado na Tabela 2.2;

c) As oscilações no início da descarga não devem ser superiores a 10% do valor de pico da corrente;

d) Se houver um pulso seguinte de polaridade oposta, o valor de pico deste pulso não deve ser superior a 10% do valor de pico do primeiro.



$T_{90\%}$ - duração virtual do pico

I_m - valor de pico

$T_{10\%}$ - tempo virtual total

O - overshoot

t_f - tempo de frente

U - undershoot

t_c - tempo de cauda

Figura 2.2

PROCEDIMENTO DE ENSAIO:

Antes do ensaio, deve-se determinar o valor da tensão disruptiva de frequência industrial a seco e de tensão residual.

O procedimento de ensaio consiste na aplicação da tensão de carregamento corrigida do fator K, em 20 operações de descarga, dividida em 4 conjuntos de 5 operações. As operações de descarga devem ser espaçadas de 50 a 60 segundos, e entre cada conjunto de operações deve ter 25 a 30 minutos de intervalo. O registro da corrente que circula pelo corpo de prova deve ser obtida na primeira e vigésima operações de cada ensaio.

Após a última operação, o corpo de prova deve esfriar até a temperatura ambiente; após o que repetem-se os ensaios de tensão disruptiva de frequência industrial a seco e de tensão residual.

2.3. Estudo preliminar da possibilidade de adaptação do gerador:

O gerador de impulso de corrente exponencial do Laboratório de Alta-Tensão da UFPB tem as seguintes características:

número de estágios.....	5	
capacitância de 1 estágio.....	1,96	microFarads
capacitância total.....	9,80	microFarads
indutância própria.....	0,725	microHenrys
resistência própria.....	33,5	milhoHms
tensão máxima de carregamento.....	100	KV

Para adaptar este gerador para ensaios de impulso de corrente de longa duração, serão mantidos os valores dos

elementos capacitivos e dimensionados os elementos indutivos e resistivos.

O modelo do gerador adotado não reproduz adequadamente a descarga real de uma linha de transmissão, devido à discretização e à necessidade das capacitâncias dos diversos estágios serem iguais (por razões econômicas e práticas). Tudo isto faz com que seja necessário um número mínimo de estágios para o gerador, para que seja atendida as condições de uniformidade do pulso, e a adaptação dos valores de indutância e resistência de um modelo de estágios iguais (modelo escada) inicialmente proposto.

Da literatura referenciada [3,6], podemos fazer uma análise inicial de um gerador de estágios iguais.

Usando as relações:

$$T_{90\%} = 2 * \frac{n-1}{n} * \sqrt{L * C} \quad (2.2)$$

$$T_d = 2 * \sqrt{L * C} \quad (2.3)$$

$$R = \sqrt{L / C} \quad (2.4)$$

pode-se obter a indutância por estágio em função do número de estágios, do valor conhecido da capacitância e dos critérios da Tabela 2.2; neste caso:

$$R = \frac{T_{90\%}}{2 * (n-1) * C} \quad (2.5)$$

$$Ll = \left| \frac{T90\%}{2 * (n-1)} \right|^2 * \frac{1}{Cl} \quad (2.6)$$

$$Td = T90\% * \frac{n}{(n-1)} \quad (2.7)$$

$$C = \sum_{i=1}^n Cl \quad (2.8)$$

$$L = \sum_{i=1}^n Ll \quad (2.9)$$

onde: T90% - duração virtual do pico da corrente

Td - duração total teórica do impulso (toda a energia do gerador seria descarregada neste intervalo)

n - número de estágios do gerador

C - capacitância total do gerador

Cl - capacitância por estágio do gerador

L - indutância total do gerador

Ll - indutância por estágio do gerador

R - impedância de surto do gerador

Do exposto, pode-se montar um quadro de valores comparativos para várias classes de descarga de Pára-Raios, tanto para Pára-Raios em serviço pesado (Tabela 2.3) como Pára-Raios serviço leve (Tabela 2.4) (Feita para geradores

de 5, 8 e 12 estágios e $C1 = 1,96$ microFarads).

Pelas condições da norma (Tabela 2.2) e do quadro de valores comparativos (Tabela 2.3), pode-se determinar as condições mínimas para calibração do gerador, a tensão nominal e o número de seções do corpo de prova. Usando as relações:

$$V_s = \frac{R}{F_1} \quad (2.10)$$

$$V_c = F_2 * V_s = R * \frac{F_2}{F_1} \quad (2.11)$$

onde: V_s - tensão máxima eficaz nominal do Pára-Raios ou seção sem que haja descarga (KV)

V_c - tensão DC de carregamento do gerador (KV)

F_1 e F_2 - fatores tirados dos coeficientes da resistência de carga e da tensão de carregamento da Tabela 2.2

R - resistência de carga (Ohm)

têm-se, para cada classe de descarga, o seguinte conjunto de valores (Tabela 2.5), seguindo os procedimentos da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Quadro de valores comparativos para as diferentes classes de descarga da Tabela 2.2

CLASSE	T90% microseg	n	R (ohm)	Li (microH)	Td microseg
1	2000	5	127,55	31887	2500
		8	72,89	10413	2286
		12	46,38	4216	2182
2	2000	5	127,55	31887	2500
		8	72,89	10413	2286
		12	46,38	4216	2182
3	2400	5	153,06	45918	3000
		8	87,46	14993	2742
		12	55,66	6072	2618
4	2800	5	178,57	62499	3500
		8	102,04	20408	3200
		12	64,94	8266	3055
5	3200	5	204,08	81631	4000
		8	116,62	26656	3658
		12	74,21	10794	3491

Tabela 2.4 - Quadro de valores comparativos para diferentes classes de descarga da Tabela 4 da IEC 99-1/1970.

CLASSE (KA)	T90% microseg	n	R (ohm)	LI (microH)	Td microseg
10	2000	5	127,55	31887	2500
		8	72,89	10413	2286
		12	46,38	4216	2182
5	1000	5	63,78	7973	1250
		8	36,44	2603	1142
		12	23,19	1054	1091
2,5	500	5	31,89	1993	625
		8	18,22	651	572
		12	11,60	264	545

Tabela 2.5 - Quadro de valores mínimos para as diferentes classes de descarga da Tabela 2.2, segundo os procedimentos da Tabela 2.3.

CLASSE	T90% (microseg)	F1	F2	n	R (ohm)	Vs (KV)	Vc (KV)
1	2000	3.3	3.0	5	127.55	38.65	115.95
				8	72.89	22.09	66.27
				12	46.38	14.05	42.15
2	2000	1.8	2.6	5	127.55	70.86	184.24
				8	72.89	40.49	105.27
				12	46.38	25.77	67.00
3	2400	1.2	2.6	5	153.06	127.55	331.63
				8	87.46	72.89	189.51
				12	55.66	46.38	120.59
4	2800	0.8	2.4	5	178.57	223.21	535.70
				8	102.04	127.55	306.12
				12	64.94	81.18	194.83
5	3200	0.5	2.2	5	204.08	408.16	897.95
				8	116.62	233.24	513.13
				12	74.21	148.42	326.52

Das Tabelas 2.3 e 2.4 e das equações 2.2 a 2.11, pode-se tirar as seguintes consequências:

- a) Quanto maior o número de seções, mais regular é o pulso, ou seja, T_d se aproxima de T90%;
- b) O número de seções afeta significativamente o valor das indutâncias, com forte implicação na construção destes dispositivos;
- c) Quanto maior C, menor o número de seções do Pára-Raios ou a tensão nominal do corpo de prova;
- d) Quanto maior C, menor a indutância por estágio e a impedância de surto do gerador.

Na Tabela 2.5 observa-se a primeira dificuldade na adaptação do gerador, mantidos fixos os elementos capacitivos: - A tensão máxima de carregamento de cada elemento em 100KV e sua baixa capacitância, condiciona a um número elevado de estágios o gerador de cada classe.

Pode-se determinar o número mínimo de estágios em cada classe e a tensão nominal máxima do corpo de prova, caminhando na ordem inversa, ou seja, fixando $C_i = 1,96$ microFarads e $V_c = 100KV$. Com o uso das equações 2.6 e 2.10, e modificando as equações 2.5 e 2.11 (mostradas abaixo), pode-se montar a seguinte tabela (Tabela 2.6):

$$R = V_c * \frac{F_1}{F_2} \quad (2.12)$$

$$V_s = \frac{R}{F_1} \quad (2.10)$$

$$n = 1 + \frac{F2 * T90\%}{2 * Vc * F1 * C1} \quad (2.13)$$

$$L1 = \frac{T90\%}{2 * (n-1)}^2 * \frac{1}{C1} \quad (2.6)$$

Tabela 2.6 - Número mínimo de estágios e tensão nominal do corpo de prova para $C1 = 1.96 \text{ microF}$ e $Vc = 100KV$

CLASSE	T90% (microseg)	F1	F2	R (Ohm)	Vs (KV)	n	L1 (mH)
1	2000	3.3	3.0	110.00	33.33	6	20.41
2	2000	1.8	2.6	69.23	38.46	9	7.97
3	2400	1.2	2.6	46.15	38.46	15	3.75
4	2800	0.8	2.4	33.33	41.66	23	2.07
5	3200	0.5	2.2	22.73	45.45	37	1.00

2.4. Projeto Computacional do Gerador de Impulso de Corrente de longa duração:

No projeto computacional do gerador, foi utilizado o modelo de gerador de constantes distribuídas, cujo diagrama básico é mostrado na Figura 2.3.

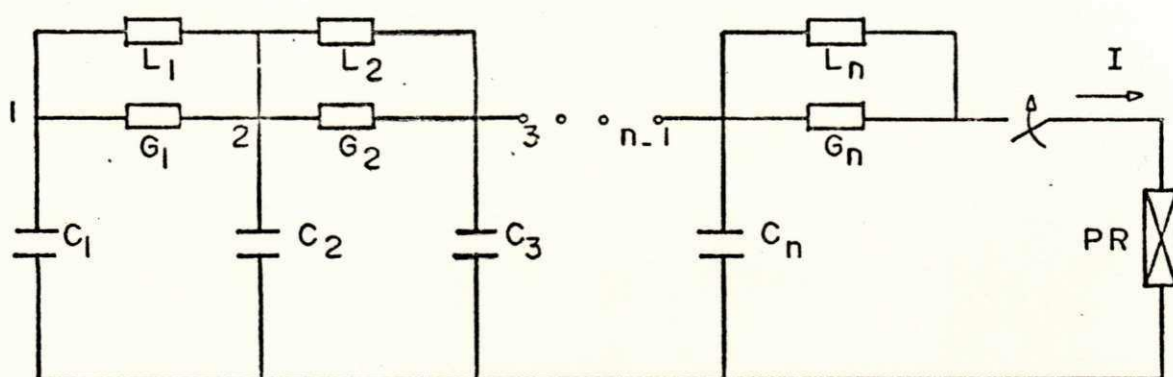
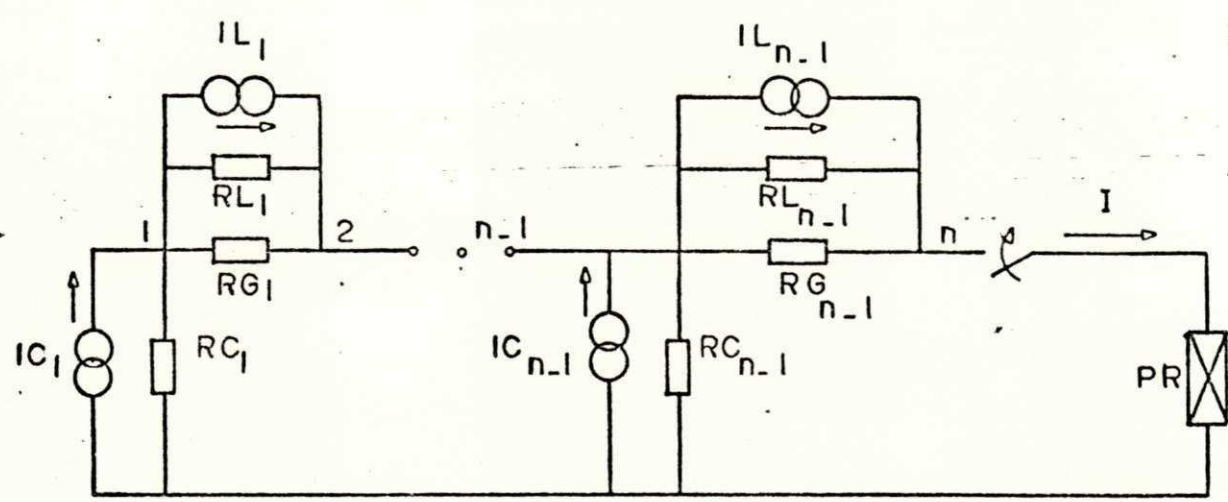


Figura 2.3 - Diagrama básico do gerador de constante distribuídas.

Segundo as referências [3,4], não foram consideradas a resistência própria das bobinas, bem como a resistência própria e a indutância dos capacitores; outra simplificação, foi desconsiderar o acoplamento magnético das bobinas, irrelevante para o arranjo adotado [3,4].

A solução do circuito transitório utiliza a técnica de modelo equivalente [7,16] para os elementos do circuito; o circuito equivalente e a equação dos nós para 5 estágios é mostrado na Figura 2.4.



$$\left| \begin{array}{c} 1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{RL_1+RG_1}{RL_1*RG_1} \left| \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \right| *V_1 - \frac{RL_1+RG_1}{RL_1*RG_1} *V_2 = IC_1(t-dt) - IL_1(t-dt) \quad [1]$$

$$\begin{aligned} -\frac{RL_1+RG_1}{RL_1*RG_1} *V_1 + \left| \begin{array}{c} RL_1+RG_1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{1}{RL_1*RG_1} + \left| \begin{array}{c} 1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{RL_2+RG_2}{RL_2*RG_2} \left| \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \right| *V_2 - \frac{RL_2+RG_2}{RL_2*RG_2} *V_3 = \\ = IL_1(t-dt) + IC_2(t-dt) - IL_2(t-dt) \quad [2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\frac{RL_2+RG_2}{RL_2*RG_2} *V_2 + \left| \begin{array}{c} RL_2+RG_2 \\ \hline \end{array} \right| \frac{1}{RL_2*RG_2} + \left| \begin{array}{c} 1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{RL_3+RG_3}{RL_3*RG_3} \left| \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \right| *V_3 - \frac{RL_3+RG_3}{RL_3*RG_3} *V_4 = \\ = IL_2(t-dt) + IC_3(t-dt) - IL_3(t-dt) \quad [3] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\frac{RL_3+RG_3}{RL_3*RG_3} *V_3 + \left| \begin{array}{c} RL_3+RG_3 \\ \hline \end{array} \right| \frac{1}{RL_3*RG_3} + \left| \begin{array}{c} 1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{RL_4+RG_4}{RL_4*RG_4} \left| \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \right| *V_4 - \frac{RL_4+RG_4}{RL_4*RG_4} *V_5 = \\ = IL_3(t-dt) + IC_4(t-dt) - IL_4(t-dt) \quad [4] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\frac{RL_4+RG_4}{RL_4*RG_4} *V_4 + \left| \begin{array}{c} RL_4+RG_4 \\ \hline \end{array} \right| \frac{1}{RL_4*RG_4} + \left| \begin{array}{c} 1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{RL_5+RG_5}{RL_5*RG_5} \left| \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \right| *V_5 - \frac{RL_5+RG_5}{RL_5*RG_5} *V_6 = \\ = IL_4(t-dt) + IC_5(t-dt) - IL_5(t-dt) \quad [5] \end{aligned}$$

$$-\frac{RL_5+RG_5}{RL_5*RG_5} *V_5 + \left| \begin{array}{c} RL_5+RG_5 \\ \hline \end{array} \right| \frac{1}{RL_5*RG_5} + \left| \begin{array}{c} 1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{1}{R_v} \left| \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \right| *V_6 - \frac{1}{R_v} *V_7 = IL_5(t-dt) \quad [6]$$

$$-\frac{1}{R_v} *V_6 + \left| \begin{array}{c} 1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{1}{R} + \left| \begin{array}{c} 1 \\ \hline \end{array} \right| \frac{1}{R_v} \left| \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \right| *V_7 = 0 \quad [7]$$

Figura 2.4 - Circuito equivalente em regime transitório e equação dos nós para n = 5.

O método de solução da matriz do sistema linear $AX=B$ é o iterativo de Gauss-Seidel com aceleração (SOR).

O intervalo de tempo dt é obtido a partir de um subrotina, que determina os passos computacionais segundo critérios de erro [9].

Montou-se quatro programas computacionais:

a) Programa 1:

Sua finalidade é avaliar o efeito da variação dos elementos do gerador (indutâncias e condutâncias em paralelo) na forma do impulso de corrente de saída.

Para isto, utiliza duas subrotinas denominadas INDUT e CONDUT que incrementam, separadamente e em passos sucessivos, os parâmetros dos diversos estágios do gerador.

Os efeitos dessa variações são avaliados pelos parâmetros do impulso estabelecidos pela IEC, tais como, tempo virtual, eficiência, perda de energia, overshoot, etc.

b) Programa 2:

Simulação feita a partir dos resultados do programa 1, com a finalidade de obter conjunto de valores de parâmetros de geradores, que atendam as condições da IEC. Da análise dos efeitos da variação dos elementos do gerador, foram programadas várias subrotinas que incrementam ou decrementam os diversos elementos; na procura de um impulso de corrente de saída dentro dos limites estabelecidos pela norma.

Das referências [3,4] sabe-se que valores diferentes para as bobinas modificam o impulso de corrente, principalmente na frente e na cauda do impulso; do uso de

resistências em paralelo com as bobinas, obtém-se uma diminuição das oscilações frontais do impulso.

A simulação é iniciada com valores aleatórios de indutância e condutância em paralelo, que são modificados no desenvolvimento da simulação. Quando para um conjunto de valores dos elementos, os diversos parâmetros limitantes da IEC (overshoot, T90%, T10%, etc) são satisfeitos, o programa imprime os resultados e retorna à simulação, procurando um novo conjunto de valores de elementos (ver Tabela 3.1).

c) Programa 3:

Programa que obtém a corrente de saída, para resistência de carga igual à impedância de surto do gerador, a partir do conjunto de valores obtidos do programa 2 (Tabela 3.2 a 3.5).

Tem a mesma estrutura que os programas 1 e 2 na solução da matriz do sistema e obtenção dos parâmetros do impulso estabelecidos pela IEC.

d) Programa 4:

Programa que obtém a corrente de saída do gerador, para resistência de carga igual a uma resistência não-linear, a partir do conjunto de valores obtidos do programa 2.

Como resistência não-linear utilizou-se um Para-Raios de Óxido de Zinco, cuja curva característica é mostrada na Figura 2.5 abaixo.

Este programa tem solução semelhante aos outros na parte linear da matriz. Com a introdução do elemento não-linear, utiliza adicionalmente o Método da Compensação [7,8];

entretanto, este método falha pois o ramo aberto reflete o pulso com o dobro de seu valor incidente, não permitindo a solução do circuito resultante. Foi utilizado o seguinte artifício (8): - O ramo não-linear é dividido em dois ramos paralelos, um com características lineares para permitir a solução em circuito aberto e o outro com uma característica não-linear (ver Figura 2.6).

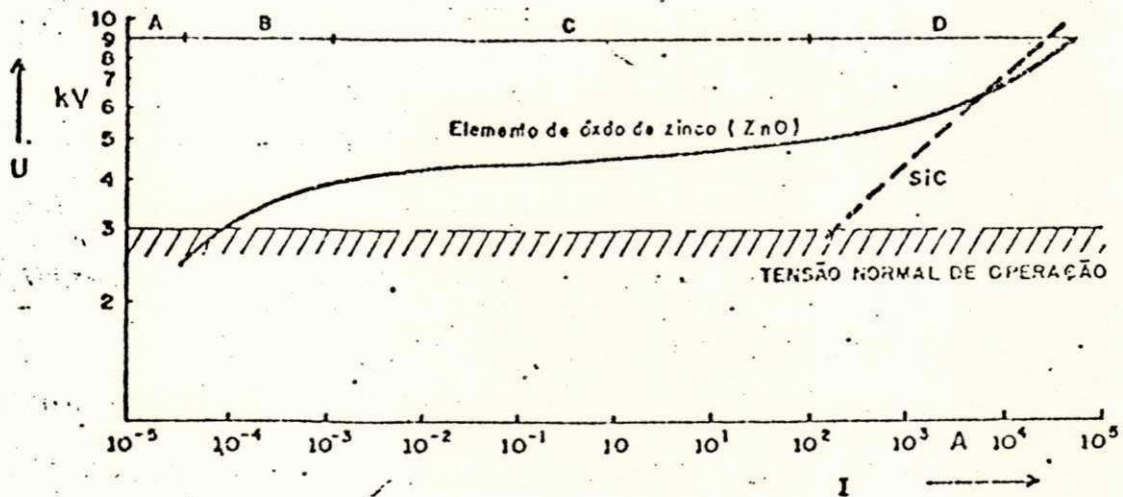
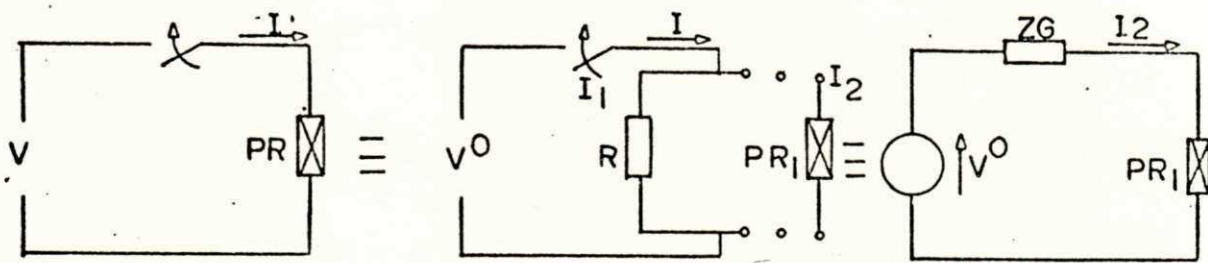


Figura 2.5 - Curva Característica tensão \times corrente do Pára-Raios de Óxido de Zinco

Outra solução importante foi considerar a inversão no sentido da corrente com a mudança no sinal da tensão, com a divisão do Pára-Raios em dois elementos.



$$V = V_0 - Z_g \cdot I_2 \quad (2.14)$$

$$V = f(I_2) \quad (2.15)$$

$$I_1 = \frac{V}{R} \quad (2.16)$$

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.17)$$

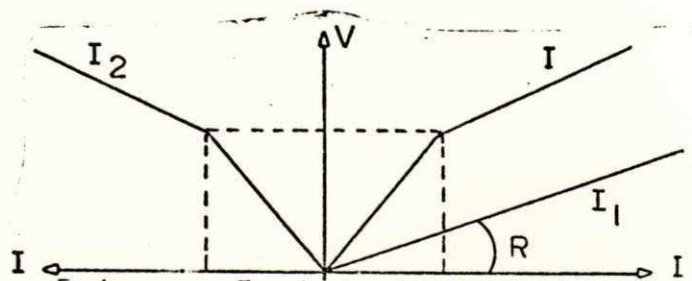


Figura 2.6 - Divisão do Pára-Raios em 2 elementos: um linear (R) e o outro não-linear ($V=f(I_2)$).
Curva dos elementos.

Observações:

- a) O gerador descarrega a energia armazenada em seus capacitores no objeto de teste, partindo portanto de condições iniciais diferentes de zero; nestas condições, foi previsto a possibilidade da última resistência de amortecimento $R_G(n-1)$ ser igual a zero.
- b) Como no primeiro instante de tempo (após $t=0$), as correntes

nas fontes fictícias dos circuitos equivalentes dos capacitores já foram calculadas pelo circuito de condições iniciais, o coeficiente das equações de atualização das fontes fictícias foi modificado para $1/RC$ ou $1/RL$, respectivamente, para os capacitores e indutores.

3. RESULTADOS:

3.1. Geradores projetados: Programa 2

Como resultado do Programa 2, foram obtidos vários circuitos que atendem adequadamente as características da corrente de impulso fixadas pela IEC.

Na Tabela 3.1 estão resumidos alguns conjuntos de parâmetros dos geradores calculados, em ordem crescente de otimização do pulso, tanto para 8 estágios (geradores números 1 a 6), como para 5 estágios (geradores números 7 a 10).

Tabela 3.1 - Geradores projetados

GER	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1								1,5								
2								1,4								
3	1,4	0,8						1,5								
4	0,4	1,1					0,9	1,4								
5	0,5							1,5							0,2	0,1
6	0,4	1,1					0,9	1,4							0,2	0,2
7					1,4	-	-	-						-	-	-
8	0,4	0,8			1,5	-	-	-						-	-	-
9	1,4	0,8			1,5	-	-	-				0,2	0,2	-	-	-
10	0,4	1,1		0,9	1,4	-	-	-				0,2	0,2	-	-	-

Obs.: Todas as indutâncias e condutâncias não especificadas são 1,0 pu e zero respectivamente.

Grandezas Base: $C_b = 1.98 \text{ microF}$ $V_b = 1000 \text{ V}$

$T_b = T_{90\%}$ em cada classe

3.2. Impulso de saída: Programas 3 e 4

Com a finalidade de avaliar os programas 3 e 4, se obteve a corrente de saída dos geradores números 4 e 6 com carga linear e não-linear; os resultados estão resumidos nas Tabelas 3.2 e 3.3 e Figuras 3.1 e 3.2.

Também com a finalidade de comparar o desempenho dos programas com um gerador real, obteve-se a corrente de saída de dois conjuntos de valores de indutância e capacitância (conjuntos denominados geradores GAT 1 e GAT 2), do gerador de impulso de corrente de longa duração do Laboratório de Alta Tensão da UFPB, com carga linear e não-linear; os resultados estão resumidos nas Tabelas 3.4 e 3.5 e Figuras 3.3 e 3.4.

Observações:

Para as Tabelas 3.2 a 3.5 valem as seguintes observações:

- . t90 - Tempo virtual (microseg.)
- . t90p - Tempo virtual padrão (microseg.)
- . t10 - Tempo virtual total (microseg.)
- . tf - Tempo de frente (microseg.)
- . tc - Tempo de cauda (microseg.)
- . td - Tempo total do primeiro pulso (microseg.)
- . t5 - Tempo em que ocorre o overshoot (microseg.)
- . t6 - Tempo em que ocorre o undershoot (microseg.)
- . t7 - Tempo em que ocorre o CISMAX (microseg.)
- . t8 - Tempo em que ocorre o CISMIN (microseg.)
- . cismax - valor máximo da corrente

- . cismin - valor mínimo da corrente no primeiro pulso negativo (A)
- . cim - valor de pico da corrente (A)
- . overs - Overshoot (%)
- . u - Undershoot (%)
- . kk - Tolerância de saída do dispositivo (%)
- . e - Perda de energia do gerador (%)
- . R - Impedância de surto do gerador (Ohm)
- . vc - Tensão de carregamento (V)
- . tfl - Tempo total (microseg.)
- . Kmax - Limitador de tempo de máquina (loop)
- . erro - precisão
- . dt - Intervalo de tempo (microseg.)
- . C - Capacitância (microF)
- . L - Indutância (microH)
- . G - Condutância (S)

Tabela 3.2 - Gerador 4

RESISTOR LINEAR				GERADOR 4			
A) PARÂMETROS PARA COMPUTAÇÃO:							
tfl=	4500.00	kmax=	250	erro=	.0010	dt=	8.00
B) PARÂMETROS PADRÃO:							
t90p=	2400.00	R=	88.36	Vc=	16200.00		
C) PARÂMETROS DO GERADOR:							
C:	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
G:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L:	6.00	16.49	14.99	14.99	14.99	14.99	20.99
D) PARÂMETROS DO PULSO:							
t90=	2488.00	t10=	3080.00				
overs=	4.13	t5=	312.00				
u=	-11.25	t6=	3304.00				
tf=	193.94	tc=	544.00				
kk=	100.20	e=	1.44				
cim=	93.97	td=	3152.00				
t7=	40.00	cismax=	97.66				
t8=	3004.00	cismin=	-10.56				

Obs.: 1) Tensão de carregamento do gerador = 25000 V

2) Vc = 16200 V para atender a condição de calibração do gerador

Tabela 3.3 - Gerador 6

RESISTOR LINEAR				GERADOR 6			
A) PARÂMETRO PARA COMPUTAÇÃO:							
tfl=	4500.00	kmax=	250	erro=	.0010	dt=	8.00
B) PARÂMETROS PADRÃO:							
t90p=	2400.00	R=	86.36	vc=	16200.00		
C) PARÂMETROS DO GERADOR:							
C:	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
G:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.002
L:	6.00	16.49	14.99	14.99	14.99	14.99	13.49 20.99
D) PARÂMETROS DO PULSO:							
t90=	2408.00	t10=	3128.00				
overs=	-2.37	t5=	2440.00				
u=	-1.29	t6=	3360.00				
tf=	224.40	tc=	672.23				
kk=	100.87	e=	3.98				
cim=	93.79	td=	3280.00				
t7=	282.00	cismax=	93.12				
t8=	3360.00	cismin=	-1.21				

Obs.: 1) Tensão de carregamento do gerador = 25000 V

2) Vc = 16200 V para atender a condição de calibração do gerador

Tabela 3.4 - Gerador GAT 1

RESISTOR LINEAR				GERADOR GAT1			
A) PARÂMETROS PARA COMPUTAÇÃO:							
tfl=	4500.00	kmax=	250	erro=	.0010	dt=	8.00
B) PARÂMETROS PADRÃO:							
t90p=	2400.00	R=	86.86	vc=	16200.00		
C) PARÂMETROS DO GERADOR:							
C1	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
G:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L:	10.20	11.39	13.79	14.09	14.09	14.54	25.49
D) PARÂMETROS DO PULSO:							
t90=	2392.00	t10=	3048.00				
overs=	4.92	t5=	2296.00				
u=	-12.54	t6=	3312.00				
tf=	266.48	tc=	551.43				
kk=	98.26	e=	2.84				
cim=	101.50	td=	3136.00				
t7=	288.00	cismax=	106.50				
t8=	3312.00	cismin=	-12.73				

Obs.: 1) Tensão de carregamento do gerador = 25000 V

2) Vc = 16200 V para atender a condição de calibração do gerador

Tabela 3.5 - Gerador GAT 2

RESISTOR LINEAR				GERADOR GAT 2			
A) PARÂMETROS PARA COMPUTAÇÃO:							
tfl=	4500.00	kmax=	250	erro=	.00010	dt=	8.00
B) PARÂMETROS PADRÃO:							
t90p=	2000.00	R=	83.38	vc=	16200.00		
C) PARÂMETROS DO GERADOR:							
C:	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
G:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L:	10.20	11.45	11.45	12.29	12.29	12.81	12.81 25.72
D) PARÂMETROS DO PULSO:							
t90=	2240.00	t10=	2928.00				
overs=	4.24	t5=	1984.00				
u=	-10.10	t6=	3168.00				
tf=	283.91	tc=	569.90				
kk=	96.91	e=	2.72				
clm=	104.21	td=	3016.00				
t7=	249.00	clsm=	108.63				
t8=	3168.00	clsmn=	-10.53				

Obs.: 1) Tensão de carregamento do gerador = 25000 V

2) Vc = 16200 V para atender a condição de calibração do gerador

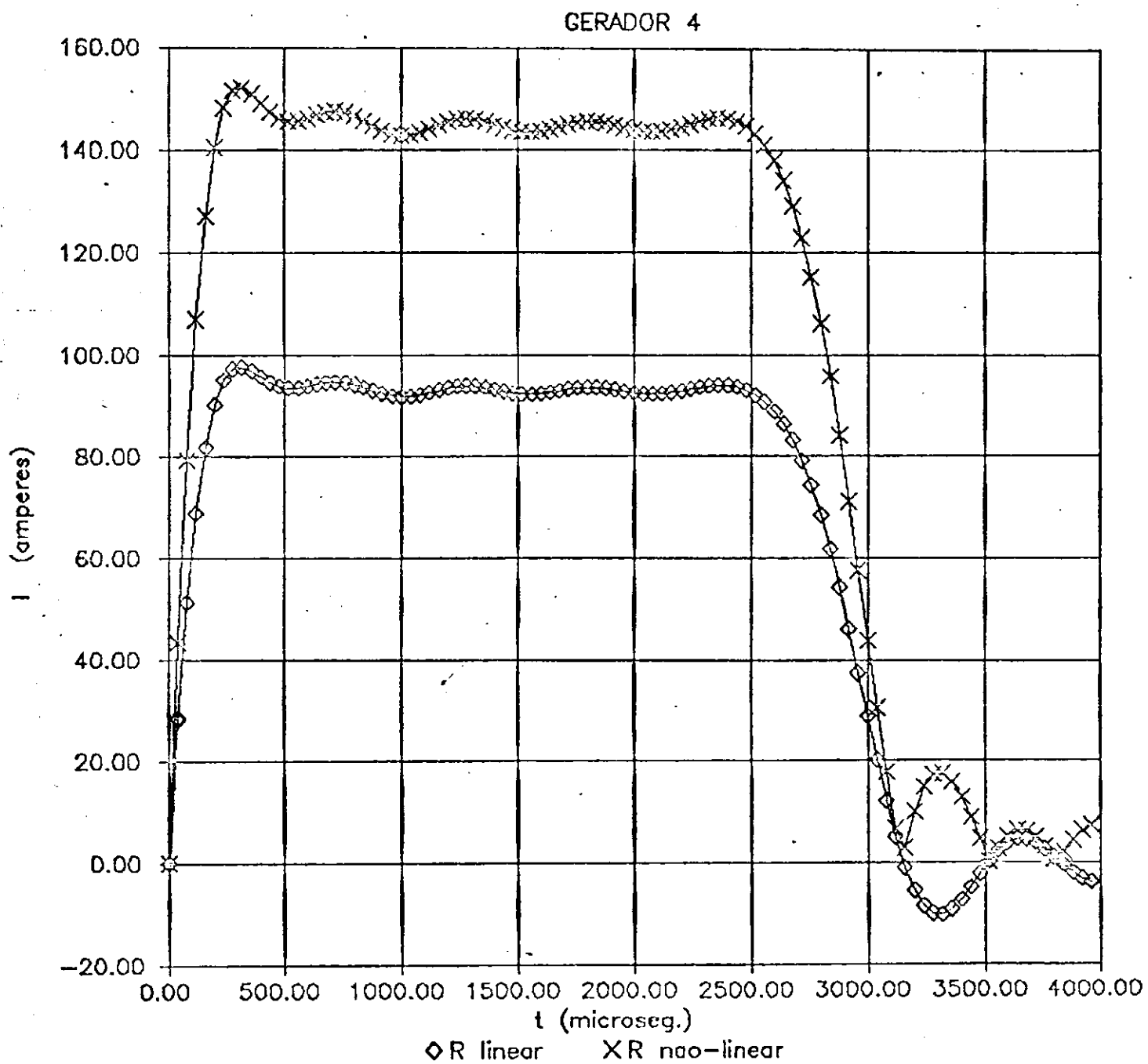


Figura 3.1

GERADOR 6

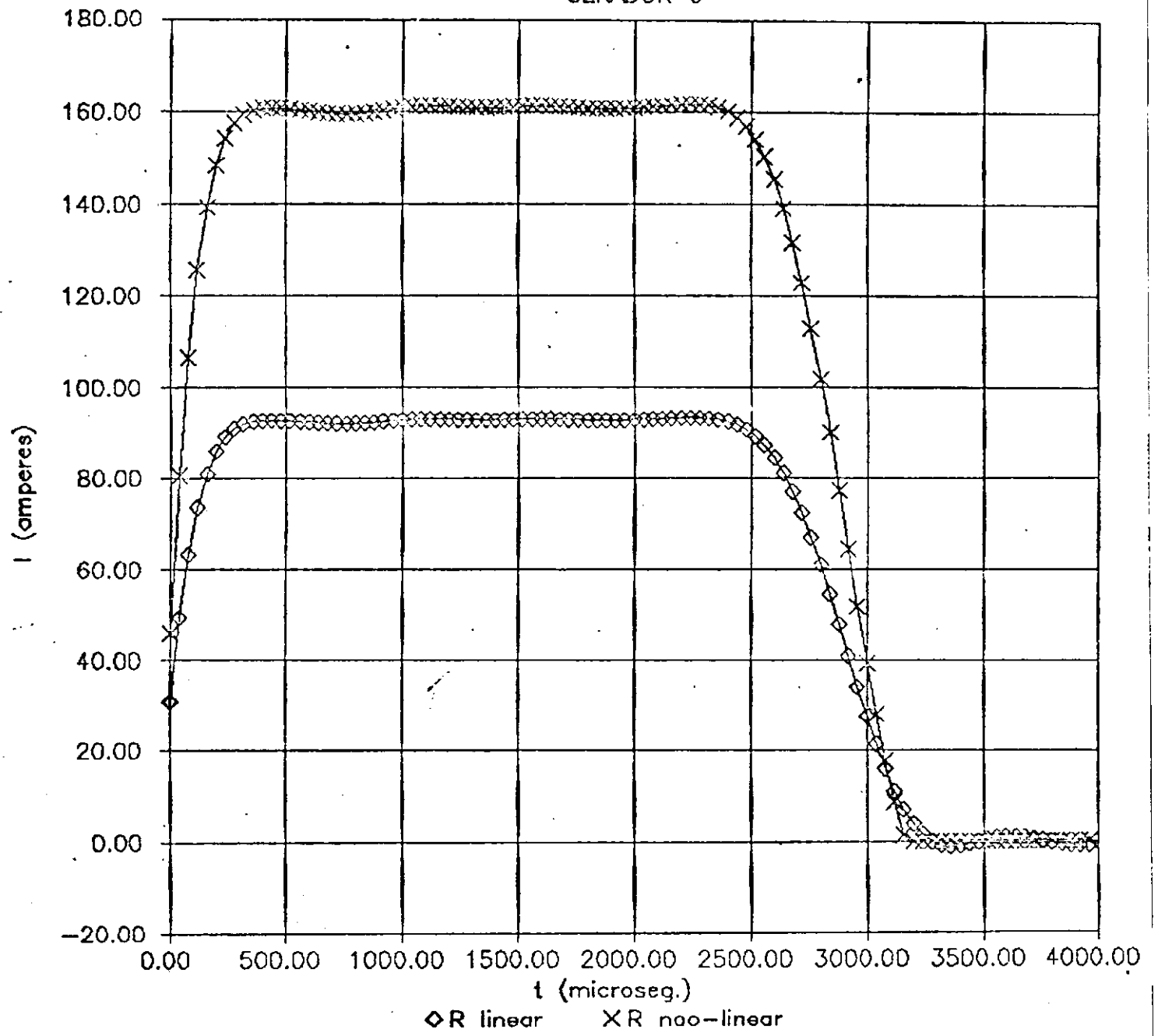


Figura 3.2

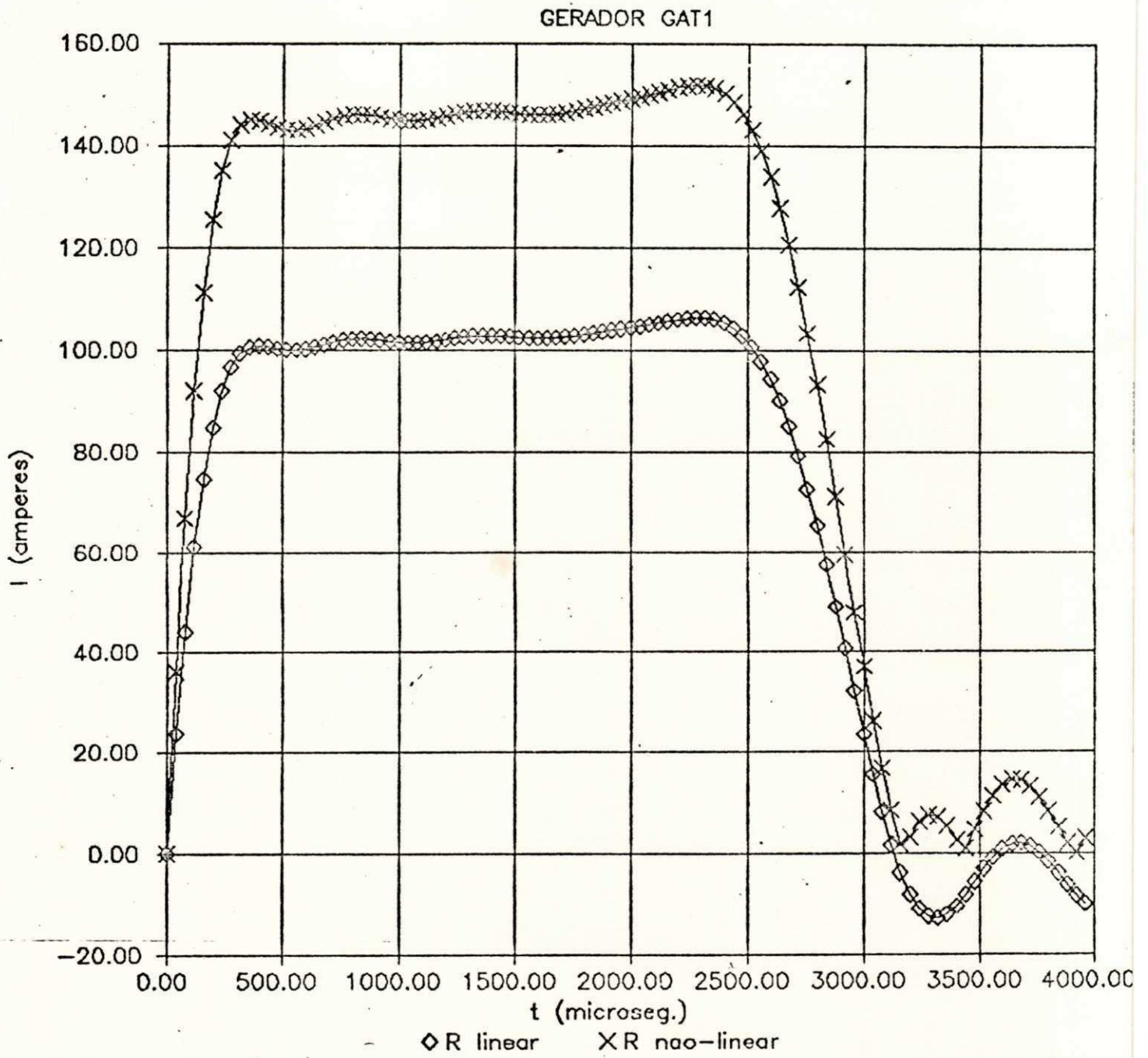


Figura 3.3

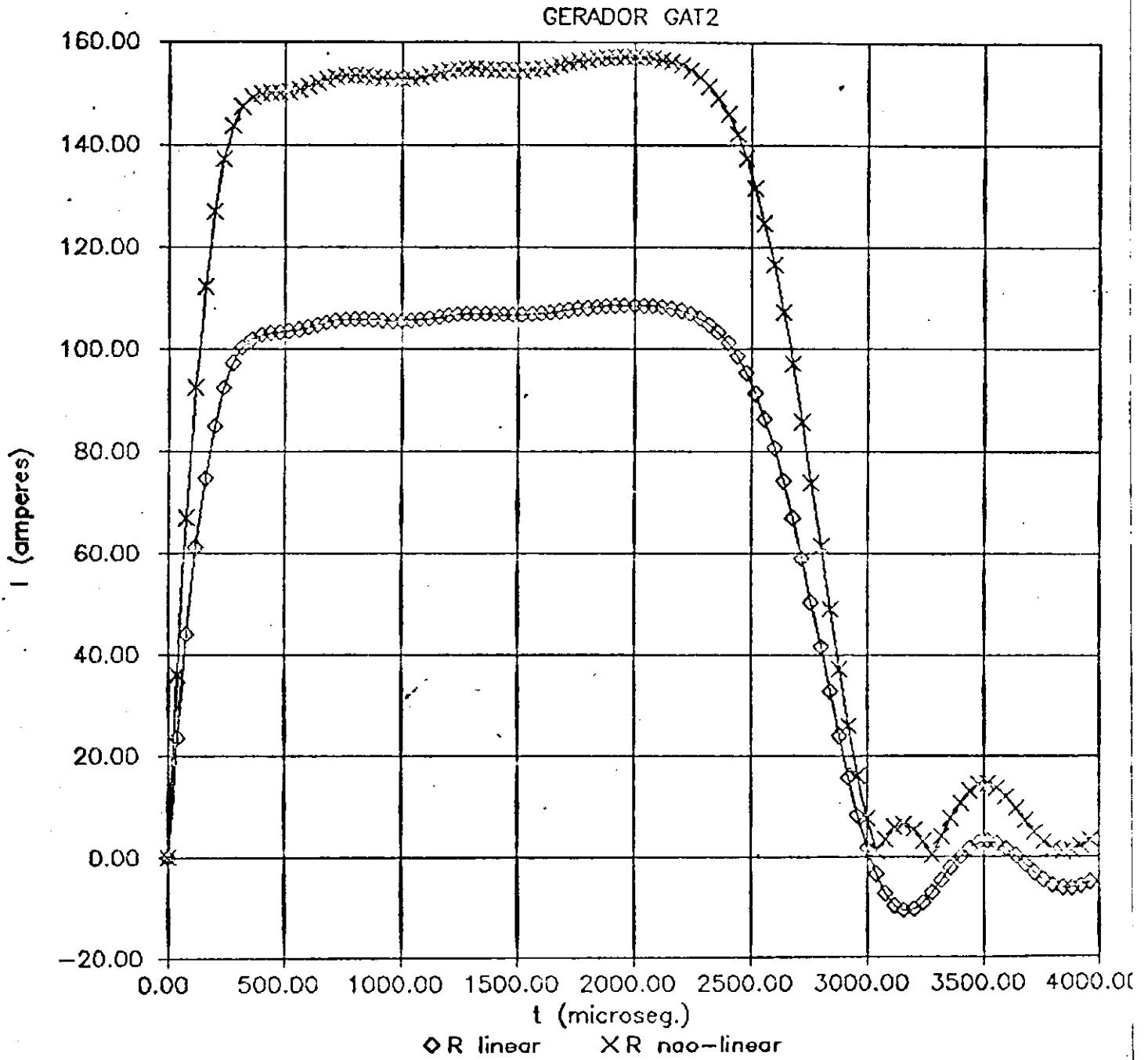


Figura 3.4

3.3. Impulsos de saída dos geradores de corrente do
Laboratório de Alta-Tensão da UFPB:

Do gerador denominado GAT1 foi obtido o impulso de corrente com carga linear mostrado na Figura 3.5.

Da mesma forma, foi obtido o impulso de corrente com carga não-linear para o gerador denominado GAT2, mostrado na Figura 3.6.

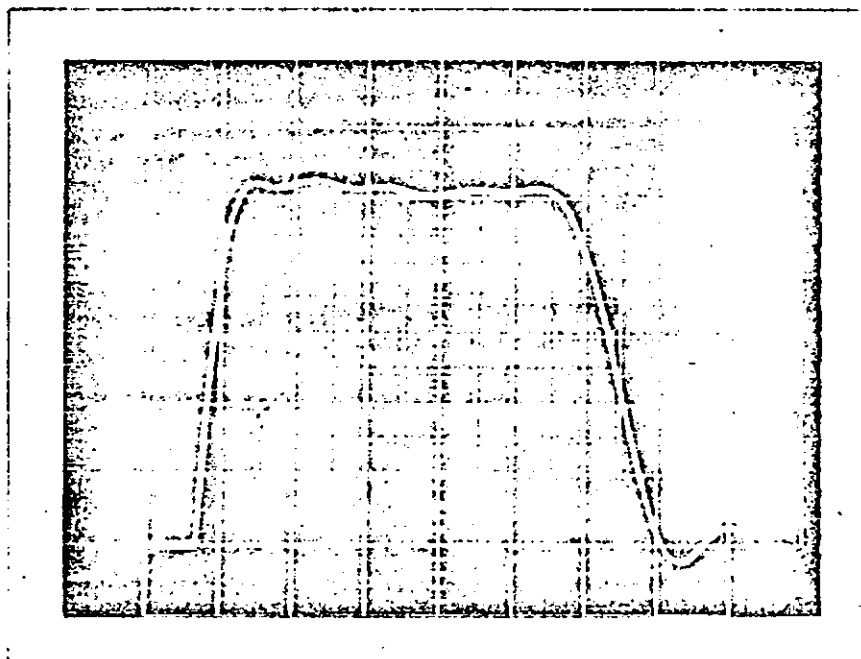


Figura 3.5 - Impulso de corrente do gerador GAT 1

T_{90P} = 2400 microseg. R = 72.80 Ohms

Calibração horizontal = 500 microseg./divisão

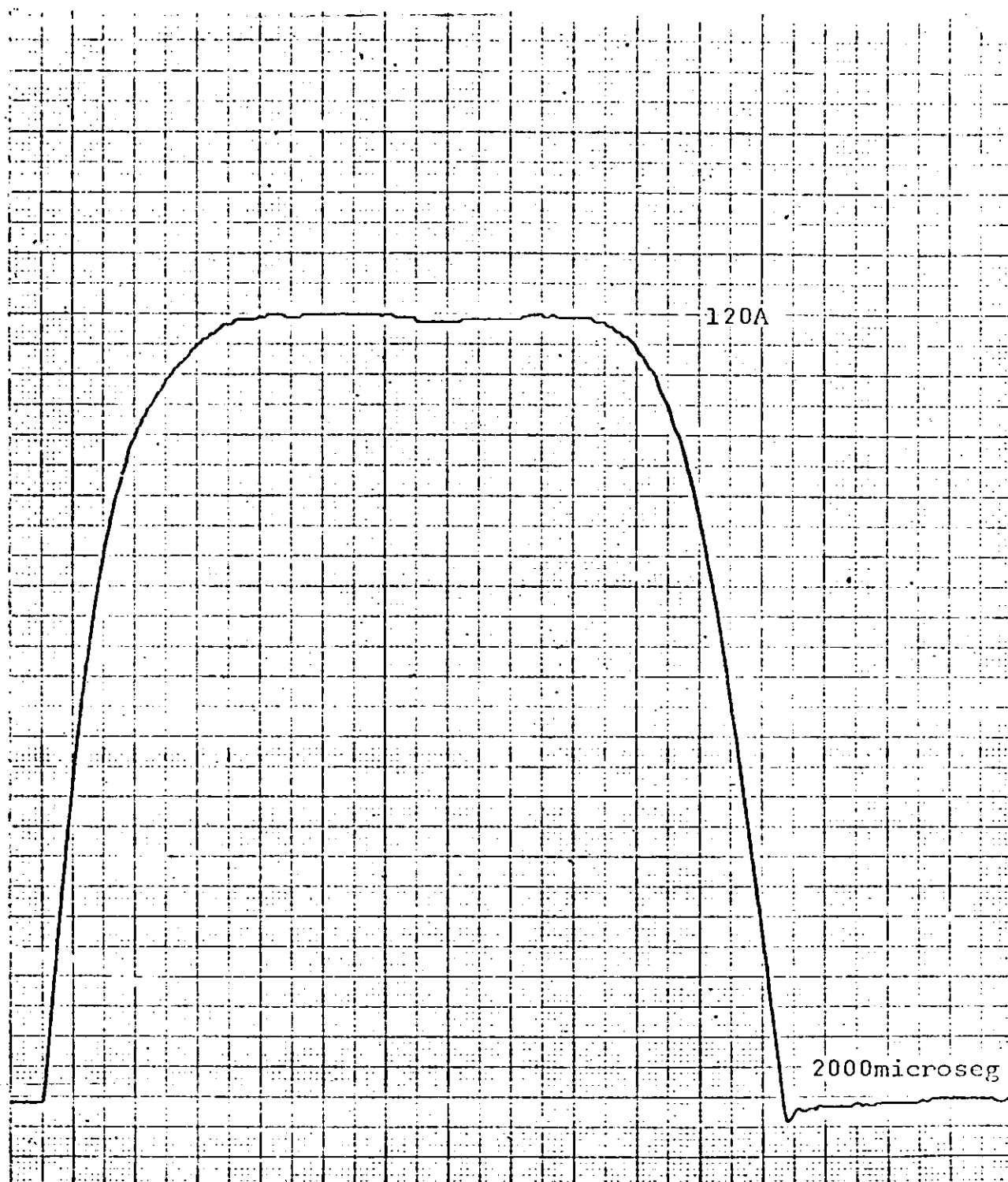


Figura 3.6 - Impulso de corrente do gerador GAT 2

$T_{90P} = 2000$ microseg. $R = 72.00$ Ohms

4. ANÁLISE E CONCLUSÕES:

4.1. Análise da forma de onda da corrente com dispositivo linear:

Com o uso do Programa 1, verifica-se o efeito de variação dos elementos (indutância e condutância em paralelo) na forma do impulso de corrente de saída.

O impulso é afetado significativamente somente pelos valores de indutância e condutância em paralelo das seções iniciais e finais do gerador; entretanto, independente de seus valores, um mesmo produto LC total da linha é mantido. Estas observações foram usadas para montar as sub-rotinas do Programa 2, na simulação à procura de valores otimizados de geradores.

A taxa de caída da corrente para zero e o undershoot do pulso de polaridade oposta são afetados pela indutância $L1$ e $L2$. As condutâncias $G1$ e $G2$ não afetam significativamente o pulso.

Valores elevados da indutância $L8$ limitam o overshoot no início do pulso; a indutância $L7$ (também elevada) não permite grandes oscilações na parte plana do pulso. As condutâncias $G7$ e $G8$ aplanam as oscilações do pico e limitam o undershoot do pulso de polaridade oposta (nas Figuras 3.1 e 3.2 pode-se ver claramente este efeito).

4.2. Análise da forma de onda da corrente com dispositivo não-linear:

Computacionalmente dois problemas foram detectados:

- 1- Passos computacionais grandes fazem com que o programa perca informações na sua amostragem de pontos discretos, acarretando saltos na forma da onda de saída.
- 2- O valor do último elemento da diagonal principal é crucial para a solução do sistema de equações. O artifício de dividir o Pára-Raios em dois elementos, no Programa 4, fica condicionado a valores de R próximo à impedância de surto do gerador, para que YAA convirja.

Finalmente, nos anexos 5.10 e 5.11 não se nota diferença relevante nas curvas de saída (tensão e corrente) do gerador projetado comparado a um dispositivo semelhante da ASEA (ver páginas 92 e 93).

4.3. Conclusões:

O valor baixo das capacitâncias do gerador de impulso de corrente exponencial, dificultam a sua adaptação para um gerador de impulso de corrente de longa duração.

Das equações 2.6 e 2.13, procurou-se um compromisso entre um número mínimo de estágios em cada classe de descarga, sob os parâmetros de prova IEC e os valores dos elementos capacitivos: $C1 = 1.96 \text{ microF}$ e $Vc = 100KV$. Os resultados estão resumidos na Tabela 2.6.

Para ensaios de corrente de impulso retangular para Pára-Raios de serviço leve, não há maiores dificuldades na adaptação do gerador; desde que sejam atendidas as condições da Tabela 5.1.

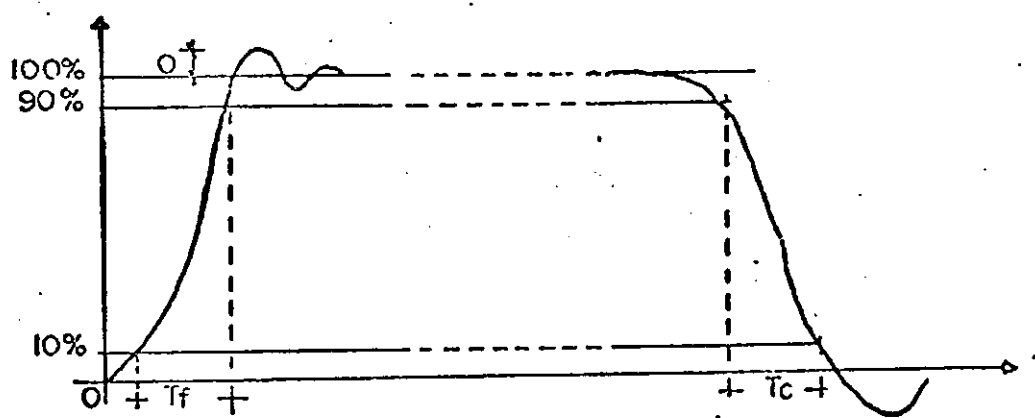
5. APÊNDICE:

5.1. O Impulso:

O impulso é definido como um distúrbio elétrico cuja duração é curta em relação à escala de tempo de interesse, e cujos valores inicial e final são os mesmos. É obtido da função degrau positiva (HEAVISIDE) seguida por uma função degrau negativa de amplitude igual.

Como os circuitos têm resposta transitória limitada, o impulso ideal é modificado e a natureza da modificação revela o desempenho do circuito. Considerando a Figura 5.1 abaixo, podemos identificar três partes principais:

- o tempo de crescimento da frente do impulso;
- o pico plano;
- o tempo de queda da cauda do pulso.



O - Overshoot

U - Undershoot

T_f - Tempo de Frente

T_c - Tempo de Cauda

Figura 5.1 - Partes principais de um impulso

O tempo de crescimento é o tempo que o impulso leva para crescer de 10% a 90% do valor de pico; o tempo de queda é medido de maneira igual.

O overshoot é o crescimento do impulso acima do valor de pico e é medido pela razão do valor em excesso e o valor de pico, em percentagem.

O undershoot é a queda do valor do impulso abaixo do valor de pico, criando uma pequena depressão na forma da onda; como o Overshoot, é medido em percentagem do valor de pico.

A duração do impulso é dada pela duração do pico; quando T_f e T_c são grandes, é definido a duração de meia altura ou a 50% como duração do impulso.

Pode acontecer um calamento no pico, próximo à cauda do impulso, devido ao desempenho limitado em baixas frequências.

5.2. Ensaio com corrente de impulso retangular:

Como é um ensaio de corrente de longa duração, seu objetivo é verificar a capacidade térmica do elemento não-linear. É um ensaio representativo dos esforços em Pára-Raios, causados por descargas devido à sobretensões internas em operações de manobras.

Não é exigido o ajuste do gerador antes do ensaio; é necessário apenas a verificação da forma de onda.

A fonte para o ensaio é um gerador de constantes distribuídas e as características do ensaio devem atender à Tabela 5.1 abaixo [2]:

Tabela 5.1 - Exigência para ensaio de corrente de longa duração em Pára-Raios para serviço leve

CLASSE DO PÁRA-RAIOS (A)	CORRENTE DO PICO (A)	DURAÇÃO VIRTUAL DO PICO microsegundos
10000 serviço leve	150	2000
5000	75	1000
2500	50	500

O corpo de prova deve ser constituído apenas de resistores não-lineares, ligados em série ou série-paralelo com outros resistores (lineares ou não-lineares). A tensão de carga e o número de resistores adicionais, devem ser tais que a corrente sobre a amostra não varia em 10%, para mais ou para menos, dos valores da Tabela 5.1.

Antes do ensaio, deve-se determinar o valor da tensão disruptiva de frequência industrial a seco e de tensão residual.

O procedimento de ensaio consiste em 20 aplicações da corrente especificada, dividida em 4 conjunto de 5 operações. As operações de descarga devem ser espaçadas de 50 a 60 segundos, e entre cada conjunto de operações deve ter 25 a 30 minutos de intervalo. O registro da corrente que circula pelo corpo de prova deve ser obtida na primeira e vigésima operações de cada ensaio.

Após a última operação, o corpo de prova deve esfriar até a temperatura ambiente; após o que repetem-se os ensaios de tensão disruptiva de frequência industrial a seco e de tensão residual.

5.3. Projeto das bobinas:

No projeto das bobinas (solenoídes) foi escolhido o gerador número 6 (Tabela 3.1) e utilizou-se as seguintes fórmulas [10]:

$$N = \frac{\sqrt{\frac{L \cdot I \cdot 10^9}{4 \cdot \pi \cdot r^2}}}{} \quad (5.1)$$

$$K_n = \frac{1}{\left[1 + 0.9 \cdot \frac{r}{l} - 0.02 \cdot \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right]} \quad \text{para 1 camada} \quad (5.2)$$

$$K_n = \frac{1}{\left[1 + 0.9 \cdot \frac{r}{l} + 0.32 \cdot \left(\frac{t}{r} \right)^2 + 0.84 \cdot \frac{t}{l} \right]} \quad (5.3)$$

para diversas camadas

$$F = 1 - \frac{l \cdot (A+B)}{\pi \cdot r \cdot N \cdot K_n} \quad (5.4)$$

$$A = 2,3 \log 1,73 \frac{d}{c} \quad (5.5)$$

$$B = 0,336 \cdot \left[1 - \frac{2,5}{N} + \frac{3,8}{n^2} \right] \quad (5.6)$$

onde:

N - número de espiras

L - Indutância em Henrys. [H]

l - comprimento da bobina em centímetros [cm]

r - raio em centímetro [cm], medido do eixo ao centro da bobina

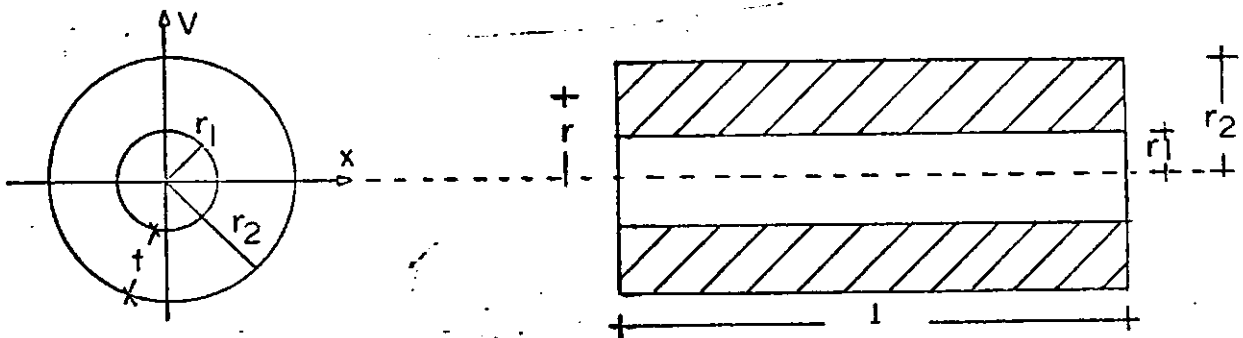
t - espessura do enrolamento

K_n - constante de NAGAOKA, para corrigir o fluxo disperso em bobinas curtas

d - diâmetro do condutor

c - passo entre espiras

F - fator de correção da Indutância devido ao fluxo disperso



$$t = r_2 - r_1$$

$$r = r_1 + \frac{t}{2}$$

Figura 5.2 - Dimensões da bobina solenoidal

O programa computacional do cálculo das bobinas está no apêndice 5.8; foram feitas as seguintes adaptações nas fórmulas (5.1) e (5.2), para levar em consideração a bitola do fio adotado:

$$c = 2 \times \pi \times \frac{(d + a)}{2} = \pi \times (d + a) \quad (5.7)$$

$$l_{cu} = N_1 \times c \quad (5.8)$$

$$l = N_1 \times a \quad (5.9)$$

$$b = \frac{N}{N_1} \quad (5.10)$$

$$\text{diâmetro da bobina} = d + b \times a \quad (5.11)$$

$$N = \frac{L \times I \times 10^9}{[\pi \times (d + b \times a)]^2} \quad (5.12)$$

$$K_n = \frac{1}{1 + 0.45 \times \frac{(d+b \times a)}{l} + 0.64 \times \frac{b \times a}{(d+b \times a)} + 0.84 \times \frac{(b \times a)}{l}} \quad (5.13)$$

$$t = r_2 - r_1 = b \times a \quad (5.14)$$

$$r = r_1 + \frac{t}{2} = \frac{(d + b \times a)}{2} \quad (5.15)$$

onde:

- a - diâmetro do fio
- c - comprimento do fio de 1 espira
- l_{cu} - comprimento do fio de 1 camada
- l - comprimento da bobina
- N_1 - número de espiras de 1 camada
- b - número de camadas

Escolhendo o fio PIREFORM bitola 23 AWG da PIRELLI, cujos diâmetros nú e esmaltado são, respectivamente, 0,574 mm e 0,630 mm, foram obtidos os resultados resumidos na tabela 5.2.

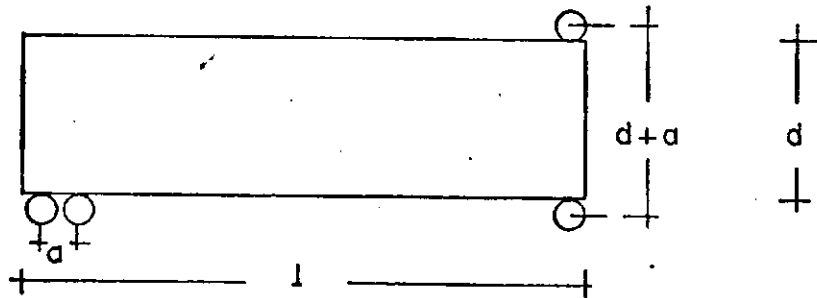


Figura 5.3 - Dimensões da bobina solenoidal levando em consideração a bitola do fio

Tabela 5.2 - Resultados numéricos e experimentais das bobinas do gerador 6.

BOBINA	VALORES CALCULADOS		VALORES MEDIDOS		b
	L(mH)	N	L(mH)	R(ohm)	
L1	1,04	321	0,98	3,3	0,84
L2	2,86	528	2,90	5,97	1,39
L3	2,6	504	2,61	5,70	1,32
L4	2,6	504	2,60	5,75	1,32
L5	2,6	504	2,58	5,77	1,32
L6	2,6	504	2,60	5,70	1,32
L7	2,34	478	2,34	5,4	1,25
L8	3,64	596	3,70	6,70	1,56

5.4 Programa 1:
program 1

```

C
C
C A)COMENTÁRIOS:
C   * método de solução do sistema de equações: SQR
C   * antes de rodar o programa, atualizar valores de entrada:
C     KLAUS1.DAT
C B)DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:
C   * APONTADORES:
C     . n - número de estágios do gerador
C     . l1 - ciclo de tempo
C     . l2,l3 - cálculo do passo ótimo dt
C     . l4 a l7 - cálculo de tf e tc
C     . l8 - cálculo de td (aponta o início do pulso
C           negativo)
C     . l9 - desvia o programa da subrotina INDUT
C           para a subrotina CONDUT
C     . l10- número de incrementos nas indutâncias
C           ou condutâncias (máximo de 15)
C     . l11- incremento de 10% nas indutâncias ou
C           condutâncias
C     . l12- no cuja indutância ou condutância esta sendo
C           incrementada
C     . l13- mostra a passagem do programa ao final de um
C           ciclo
C     . l14- desvia o programa do dispositivo escada para
C           as subrotinas INDUT ou CONDUT
C   * PARÂMETROS PARA COMPUTAÇÃO:
C     . tfl - número total de iterações - ATENÇÃO: tfl
C           sempre maior que 4000 microsegundos
C     . kmax- limitador de tempo de máquina (loop)
C     . erro- precisão
C     . dt - intervalo de tempo
C     . w - fator de aceleracao
C   * GRANDEZAS ELÉTRICAS:
C     . C - capacitância
C     . L - indutância
C     . G - condutância
C     . RV - resistência das conexões
C     . R - impedância de onda do gerador (resistiva)
C     . CIC - corrente no capacitor
C     . CIL - corrente no indutor
C     . VN2 - tensão de saída
C     . CIS - corrente de saída
C     . VC - tensão de carregamento
C     . VB - tensão base (20 VOLTS)
C     . CB - capacitância base (1.96 MICROFARADS)
C     . GB - condutância base
C     . LB - indutância base
C     . TB - tempo base
C     . CIB - corrente base
C   * SISTEMA DE EQUAÇÕES:
C     . YAA - matriz dos coeficientes (tri-diagonal)
C

```

```

C          . B - vetor conhecido ou da iteração anterior
C          . V - vetor temporário
C      * PARÂMETROS DO PULSO:
C          . T90 - tempo virtual
C          . T90P- tempo virtual padrão
C          . T10 - tempo virtual total
C          . T10P- tempo virtual total padrão
C          . TF - tempo de frente
C          . TC - tempo de cauda
C          . TD - tempo total do pulso
C          . T1 - tempo de início da frente de onda
C          . T2 - tempo final da frente da onda
C          . T3 - tempo de cauda da onda
C          . T4 - tempo final da cauda da onda
C          . T5 - tempo que ocorre o overshoot
C          . T6 - tempo que ocorre o undershoot
C          . U - undershoot
C          . KK - tolerância de saída do dispositivo
C          . CIM - valor de topo da corrente
C          . OVERS - overshoot
C          . CISMAX - valor máximo da corrente, no crescimento
C          . CISMIN - valor mínimo da corrente no primeiro
C                      pulso negativo
C
C      C) PROGRAMAS/SUBROTINAS:
C          * KLAUS1.DAT - armazena os parâmetros para leitura
C          * KLAUS1.LST - armazena as saídas t(i) e cis(i)
C          * KLAUS1.SAI - armazena os parâmetros do gerador, do pulso
C                      e de computação
C          * PASSO - procura o passo ótimo dt
C          * INDUT - incrementa os valores de indutância
C          * CONDOT - incrementa os valores de condutância
C      real vn2(2050),cis(2050),t(2050),c(8),l(8),g(8),rc(8),rl(8),kk
C      real rg(8),rlg(8),b(10),z(10,10),d(10),v(10),cli(10),clic(10)
C      open(unit=1,file='klaus1.dat',status='old')
C      open(unit=3,file='klaus1.sai',status='new')
C
C      leitura dos valores dos componentes, tempo final, tensão de
C      carregamento, tempo virtual padrão, número de estágios do
C      gerador, dt, kmax e erro
C
C      read (1,*)fr,tfl,rv,vc,t90p,n,dt,kmax,w,erro
C      do 100 i=1,n
C          c(i)=1.
C          l(i)=1.
C          g(i)=0.
C
100  continue
C
C      grandezas base
C
C      vb=1000.
C      cb=1.96
C      rb=t90p/(2*(n-1)*cb)
C      gb=1/rb

```

```

    lb=cb*rb*rb
    tb=sqrt(lb*cb)
    cib=vb/rb
c
c   cálculo de r
c
    a=0
    aa=0
    do 130 i=1,n
    a=a+l(i)
    aa=aa+c(i)
130  continue
c
    zonda=sqrt(a/aa)*rb
    r=fr*zonda
    rv=a*rv*rb
    cim=vc/(zonda+r)
c
c   apontadores
c
    n2=n+2
    n4=n+1
c
    l9=0
    l10=0
    l11=0
    l12=n
    l13=0
    l14=0
c
140  l2=1
    l3=1
c
150  l1=1
    l4=0
    l5=0
    l6=0
    l7=0
    l8=0
    t10=0
    t90=0
    clsmax=0
    clsmín=0
c
c   cálculo de ri,rg e ri//rg
c
    do 160 i=1,n
    ri(i)=2*l(i)*lb/dt
    rc(i)=dt/(2*c(i)*cb)
    if (g(i).ne.0) then
    rg(i)=1./(g(i)*gb)
    rig(i)=ri(i)*rg(i)/(ri(i)+rg(i))
    go to 160

```

```

end if
rig(i)=ri(i)
160 continue
c
c condições iniciais
c
do 170 i=1,n
b(i)=vc
cii(i)=0
cic(i)=0
170 continue
if (g(n).ne.0) then
b(n2)=b(n)*r/(r+rv+rg(n))
b(n4)=b(n)*(r+rv)/(r+rv+rg(n))
cic(n)=(b(n)-b(n4))/rg(n)
cis(i1)=b(n2)/r
go to 190
180 end if
cic(n)=0
b(n2)=0
b(n4)=0
cis(i1)=0
c
190 vn2(i1)=b(n2)
t(i1)=0
c
c atualização das fontes fictícias no primeiro ciclo de tempo
c
do 200 i=1,n
cic(i)=1/rc(i)*b(i)+cic(i)
cii(i)=1/ri(i)*(B(i)-b(i+1))+cii(i)
200 continue
c
c Inicialização de yaa
c
do 220 i=1,10
do 210 j=1,10
z(i,j)=0.
210 continue
220 continue
c
c montagem de yaa
c
do 240 i=1,n
z(i,i+1)=-1/rig(i)
z(i+1,i)=z(i,i+1)
if (i.eq.1) then
go to 240
230 end if
z(i,i)=1/rig(i-1)+1/rc(i)+1/rig(i)
240 continue
z(1,1)=1/rc(1)+1/rig(1)
z(n4,n4)=1/rig(n)+1/rv

```

```

z(n2,n2)=1/r+1/rv
z(n4,n2)=-1/rv
z(n2,n4)=z(n4,n2)
c
c inicio do ciclo de tempo
c
250 i1=i1+1
c
write(*,*)i1
c
c montagem de d
c
do 260 i=2,n
i1=i-1
d(i)=cii(i1)+cic(i)-cii(i)
260 continue
d(1)=cic(1)-cii(1)
d(n4)=cii(n)
d(n2)=0.
c
c resolução do sistema ax=b. método de gauss-seidel
c
do 400 k=1,kmax
c
c montagem do vetor temporário
c
do 300 i=1,n2
v(i)=b(i)
300 continue
c
b(1)=(-v(2)*z(1,2)+d(1))/z(1,1)
b(1)=v(1)+w*(b(1)-v(1))
do 310 i=2,n4
b(i)=(-b(i-1)*z(1,i-1)-v(i+1)*z(1,i+1)+d(i))/z(1,i)
b(i)=v(i)+w*(b(i)-v(i))
310 continue
c
b(n2)=(-b(n4)*z(n2,n4)+d(n2))/z(n2,n2)
b(n2)=v(n2)+w*(b(n2)-v(n2))
c
c teste de convergência
c
do 320 i=1,n2
if (abs((b(i)-v(i))/b(i)).gt.erro) then
go to 400
end if
320 continue
go to 410
c
400 continue
c
if (k.ge.kmax) then
c

```

```

write(*,405)k
405 format(4x,'k= ',15,'
c
c
c go to 1830
c
c end if
c
c atualização das fontes fictícias
c
c
410 do 420 i=1,n
c11(i)=2/r1(i)*(b(i)-b(i+1))+c11(i)
c1c(i)=2/rc(i)*b(i)-c1c(i)
420 continue
c
c vn2(i1)=b(n2)
c1s(i1)=b(n2)/r
t(i1)=(i1-1)*dt
c
c cálculo de c1smax
c
c
c if (c1s(i1).ge.c1smax) then
c1smax=c1s(i1)
t7=i1
430 end if
c
c cálculo de t90 e t10
c
c
c if (i8.ne.0) then
go to 530
c
c else if ((c1s(i1).lt..1*c1m).and.(c1s(i1).lt.0)) then
i8=1
i1=i1
td=t(i1)
go to 530
c
c else if (c1s(i1).lt..1*c1m) then
go to 530
c
c else if ((c1s(i1).ge..1*c1m).and.(c1s(i1).lt..9*c1m)) then
go to 520
c
c else if ((c1s(i1).ge..9*c1m).and.(i6.eq.0)) then
i7=i1
i4=i4+1
i6=i6+1
t10=t10+dt
t90=t90+dt
go to 530
c
c else
c
c i4=i4+1

```

NÃO CONVERGIU

)

```

16=16+1
t10=t10+dt
t90=t90+dt
go to 530
c
510 end if
c
520 if (i4.eq.0) then
15=i1
i4=i4+1
t10=t10+dt
go to 530
c
else
c
i4=i4+1
t10=t10+dt
c
end if
c
teste de overflow
c
530 if (i1.ge.2048) then
write(*,540) i1
540 format(10x,'i1= ',i4,' OVERFLOW -> O PROGRAMA CONTINUA')
go to 550
end if
c
teste do fim do ciclo de tempo
c
if (t(i1).lt.tfi) then
go to 250
end if
c
chama a subrotina passo
c
i3=i3+1
call passo (i1,i2,vn2,dt)
if (dt.lt.1.9) then
write(3,10000)
10000 format(4x,' DT É MENOR DO QUE 1.9 ',/)
go to 1810
else if (i3.eq.i2) then
go to 150
end if
c
cálculo de tf e tc
c
550 a=(cis(i7)-cis(i5))/(t(i7)-t(i5))
aa=cis(i7)-a*t(i7)
t2=(cim-aa)/a
tf=t2
a=(cis(i7+i6-1)-cis(i5+i4-1))/(t(i7+i6-1)-t(i5+i4-1))

```

```

aa=cis(17+16-1)-a*t(17+16-1)
t4=-aa/a
t3=(cim-aa)/a
tc=t4-t3
c
c cálculo do overshoot e de kk (integração trapezoidal)
c
do 600 i=1,11
if ((cis(i)-cis(i+1)).gt.0) then
go to 610
end if
600 continue
c
610 i2=i
i3=int(t3/dt)-10
f=cis(i2)/2.
overs=0
do 620 i=i2,i3
f=cis(i)+f
xx=(cis(i)-cim)*100./cim
if ((abs(overs)).gt.(abs(xx))) then
go to 620
end if
overs=xx
t5=t(i)
620 continue
f=(cis(i3+1)/2.+f)/float(i3+1-i2)
kk=100.*vc/(f*(zonda+r))
c
c cálculo do undershoot
c
u=0
do 630 i=11,11
if (cis(i).gt.0) then
go to 640
end if
c
if (abs(u).gt.abs(cis(i)*100./cim)) then
go to 630
end if
u=cis(i)*100./cim
t6=t(i)
630 continue
c
c cálculo de cismin
c
640 do 650 i=11,11
if (cis(i).gt.cismin) then
go to 650
end if
cismin=cis(i)
t8=t(i)
650 continue

```



```

c
c      cálculo da perda de energia do gerador (Integração trapezoidal)
c
e1=.5*n*c(1)*cb*vc*vc
e2=vn2(1)*cis(1)*dt/2.
do 700 i=2,i1-1
e2=e2+vn2(i)*cis(i)*dt
700 continue
e2=e2+vn2(i1)*cis(i1)*dt/2.
e=(e1-e2)*100./e1

c
  if (i14.ne.0) then
go to 1810
end if

c
c      saída
c
write(3,2000)
1810 write(3,2020)dt,t90,t10,overs,t5,u,t6,kk,e,tf,tc
c
1830 i13=i13+1
write(*,2030) i13
2030 format(10x,'i13=',i10)
c
  if (i14.eq.0) then
write(3,2010)i12
end if
2000 format(//,4x,'dispositivo escada',)
2010 format(//,4x,'dispositivo modificado: bobinas',/,4x,'i(',i2,')',
* '*****')
2020 format(/,7x,'dt=',f8.2,12x,'t90=',f8.2,12x,'t10=',f8.2,/,4x,
*'overs=',f5.2,18x,'t5=',f8.2,/,8x,'u=',f6.2,15x,'t6=',f8.2,/,
*7x,'kk=',f6.2,16x,'e=',f8.2,/,7x,'tf=',f8.2,13x,'tc=',f8.2)
c
  i14=1
  if (i19.ne.0) then
go to 1820
end if

c
c      chama a subrotina Indut
c
call Indut(i,n,i10,i11,i12)
dt=250.
  if (i12.ne.0) then
go to 140
end if

c
  i9=1
  i10=0
  i11=0
  i12=n
write(3,2100) i12
2100 format(//,4x,'dispositivo modificado: condutância',/,4x,'g(',i2,

```

```

*)', ' *****')
c   chama a subrotina condut
1820 call condut(g,n,i10,i11,i12)
    dt=250.
    if(i12.ne.0) then
    go to 140
    end if
    stop
    end

subroutine passo1 (i1,i2,vn2,dt)
real vn2(i1),vv(1025)
if (i2.eq.1) then
go to 10
end if
m=i1/2
do 20 i=1,m
if (vv(i).eq.0) then
go to 20
else if (vn2(i*2-1).lt.0) then
go to 40
else if (abs((vn2(i*2-1)-vv(i))*100./vv(i)).gt.20.) then
go to 10
end if
20  continue
go to 40
10  i2=i2+1
do 50 i=1,i1
vv(i)=vn2(i)
50  continue
dt=dt/2.
40  return
end

subroutine indut(i,n,i10,i11,i12)
real i(n),i11
i10=i10+1
i11=i11+.1
if (i10.le.15) then
go to 10
end if
i(i12)=1.
i12=i12-1
if (i12.eq.0) then
go to 20
end if
write(3,30) i12
30  format(//,4x,'i(',i12,')', ' *****',/)
i10=0
i11=0
i10=i10+1
i11=i11+.1
10  i(i12)=i11

```

```
write(3,40) l11
40 format(/,4x,'l(',f4.1,')')
20 return
end

subroutine condut(g,n,l10,l11,l12)
real g(n),l11
l10=l10+1
l11=l11+.1
if (l10.le.3) then
go to 10
end if
g(l12)=0
l12=l12-1
if (l12.eq.0) then
go to 20
end if
write(3,30) l12
30 format(/,4x,'g(',l2,')', ' *****',/)
l10=0
l11=0
l10=l10+1
l11=l11+.1
10 g(l12)=l11
c
write(3,40) l11
40 format(4x,'g(',f7.5,')')
20 return
end
```

5.5 Programa 2:

```

program 2

```

```

c
c
c  A)COMENTÁRIOS:
c    * método de solução do sistema de equações: SOR
c    * antes de rodar o programa, atualizar valores de entrada:
c      KLAUSZ.DAT
c  B)DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:
c    * APONTADORES:
c      . n - número de estágios do gerador
c      . I1 - ciclo de tempo
c      . I2,I3 - cálculo do passo ótimo dt
c      . I4 a I7 - cálculo de tf e tc
c      . I8 - cálculo de td (aponta o início do pulso
c              negativo)
c      . I9 - limitador do tempo de máquina para a
c              subrotina InIngn(50)
c      . I10- Idem I1I3g1 (30)
c      . I11- Idem I1I2 (30)
c      . I12- Idem I3I1 (30)
c      . I13- Idem I1I1I1 (30)
c      . I15- mostra o início de um novo ciclo no programa
c    * PARÂMETROS PARA COMPUTAÇÃO:
c      . tfl - número total de iterações - ATENÇÃO: tfl
c              sempre maior que 4000 microsegundos
c      . kmax- limitador de tempo de máquina (loop)
c      . erro- precisão
c      . dt - intervalo de tempo
c      . w - fator de aceleracao
c    * GRANDEZAS ELÉTRICAS:
c      . C - capacitância
c      . L - indutância
c      . G - condutância
c      . RV - resistência das conexões
c      . R - impedância de onda do gerador (resistiva)
c      . CIC - corrente no capacitor
c      . CIL - corrente no indutor
c      . VN2 - tensão de saída
c      . CIS - corrente de saída
c      . VC - tensão de carregamento
c      . VB - tensão base (20 VOLTS)
c      . CB - capacitância base (1.96 MICROFARADS)
c      . GB - condutância base
c      . LB - indutância base
c      . TB - tempo base
c      . CIB - corrente base
c    * SISTEMA DE EQUAÇÕES:
c      . YAA - matriz dos coeficientes (tri-diagonal)
c      . B - vetor conhecido ou da iteração anterior
c      . V - vetor temporário
c    * PARÂMETROS DO PULSO:
c      . T9D - tempo virtual

```

```

C      . T90P- tempo virtual padrão
C      . T10 - tempo virtual total
C      . T10P- tempo virtual total padrão
C      . TF - tempo de frente
C      . TC - tempo de cauda
C      . TD - tempo total do pulso
C      . T1 - tempo de início da frente de onda
C      . T2 - tempo final da frente da onda
C      . T3 - tempo de cauda da onda
C      . T4 - tempo final da cauda da onda
C      . T5 - tempo que ocorre o overshoot
C      . T6 - tempo que ocorre o undershoot
C      . U - undershoot
C      . KK - tolerância de saída do dispositivo
C      . OP1 - parâmetro limite para teste do overshoot
C      mínimo
C      . OP2 - idem (máximo)
C      . KKP1- parâmetro limite para teste da eficiência
C      do gerador (mínimo)
C      . KKP2- idem (máximo)
C      . CIM - valor de topo da corrente
C      . OVERS - overshoot
C      . CISMÁX - valor máximo da corrente, no crescimento
C      . CISMIN - valor mínimo da corrente no primeiro pulso
C      negativo

```

C) PROGRAMAS/SUBROTINAS:

```

C      * KLAUS2.DAT - armazena os parâmetros para leitura
C      * KLAUS2.SAI - armazena os parâmetros do gerador, do pulso e de
C      computação
C      *PASSO - procura o passo ótimo dt
C      *LNLNGN - altera os valores de ln e gn em função do valor
C      adequado do overshoot
C      *L1L3G1 - idem l1, l3 e g1 em função do valor adequado do
C      undershoot
C      *LNL2 - idem ln e l2 em função do valor adequado de t90
C      *L3L1 - idem l3 e l1 em função do valor adequado de t10
C      *LNLN1 - idem ln e ln1 em função do valor adequado de kk

```

```

C      real vn2(2050), cis(2050), t(2050), c(8), l(8), g(8), rc(8), rl(8), kk
C      real rg(8), rlg(8), b(10), z(10,10), d(10), v(10), cil(10), clic(10)
C      real overp1, overp2, kkp1, kkp2
C      open(unit=1, file='klaus2.dat', status='old')
C      open(unit=3, file='klaus2.sai', status='new')

```

```

C      leitura dos valores dos componentes, tempo final, tensão de
C      carregamento, tempo virtual padrão, número de estágios do
C      gerador, dt, kmax e erro

```

```

C      read (1,*)fr, tfl, rv, vc, t90p, n, dt, kmax, w, erro
C      read (1,*)op1, op2, up, kkp1, kkp2
C      do 100 i=1, n
C          c(i)=1.
C          l(i)=1.

```

```

                g(i)=0.
100  continue
c
c  grandezas base
c
vb=1000.
cb=1.96
rb=t90p/(2*(n-1)*cb)
gb=1/rb
lb=cb*rb*rb
tb=sqrt(lb*cb)
cib=vb/rb

c
c  cálculo de r
c
a=0
aa=0
do 130 i=1,n
a=a+l(i)
aa=aa+c(i)
130 continue
c
zonda=sqrt(a/aa)*rb
r=fr*zonda
rv=a*rv*rb
cim=vc/(zonda+r)

c
c  apontadores
c
n2=n+2
n4=n+1

c
i9=0
i10=0
i11=0
i12=n
i13=0
i15=0

c
140 i2=1
i3=1

c
i15=i15+1
write(*,145) i15
145 format(4x,i10)
c
150 i1=1
i4=0
i5=0
i6=0
i7=0
i8=0
t10=0

```

```

t90=0
cismax=0
cismin=0

```

```

c
c
c

```

```

cálculo de ri,rg e ri//rg

```

```

do 160 i=1,n
ri(i)=2*i(i)*ib/dt
rc(i)=dt/(2*c(i)*cb)
if (g(i).ne.0) then
rg(i)=1./(g(i)*gb)
rig(i)=ri(i)*rg(i)/(ri(i)+rg(i))
go to 160
end if
rig(i)=ri(i)
160 continue

```

```

160

```

```

c
c
c

```

```

condições iniciais

```

```

do 170 i=1,n
b(i)=vc
cii(i)=0
cic(i)=0
170 continue
if (g(n).ne.0) then
b(n2)=b(n)*r/(r+rv+rg(n))
b(n4)=b(n)*(r+rv)/(r+rv+rg(n))
cic(n)=(b(n)-b(n4))/rg(n)
cis(i1)=b(n2)/r
go to 190
180 end if
cic(n)=0
b(n2)=0
b(n4)=0
cis(i1)=0

```

```

180

```

```

c

```

```

190

```

```

vn2(i1)=b(n2)
t(i1)=0

```

```

c
c
c

```

```

atualização das fontes fictícias no primeiro ciclo de tempo

```

```

do 200 i=1,n
cic(i)=1/rc(i)*b(i)+cic(i)
cii(i)=1/ri(i)*(B(i)-b(i+1))+cii(i)
200 continue

```

```

200

```

```

c
c
c

```

```

inicialização de yaa

```

```

do 220 i=1,10
do 210 j=1,10
z(i,j)=0.

```

```

210

```

```

220

```

```

continue
continue

```

```

c
c   montagem de yaa
c
do 240 i=1,n
      z(i,i+1)=-1/rlg(i)
      z(i+1,i)=z(i,i+1)
if (i.eq.1) then
go to 240
230 end if
z(i,i)=1/rlg(i-1)+1/rc(i)+1/rlg(i)
240 continue
z(1,1)=1/rc(1)+1/rlg(1)
z(n4,n4)=1/rlg(n)+1/rv
z(n2,n2)=1/r+1/rv
z(n4,n2)=-1/rv
z(n2,n4)=z(n4,n2)

c
c   início do ciclo de tempo
c
250 i1=i1+1
c
write(*,*)i1

c
c   montagem de d
c
do 260 i=2,n
  i1=i-1
d(i)=cii(i1)+cic(i)-cii(i)
260 continue
d(1)=cic(1)-cii(1)
d(n4)=cii(n)
d(n2)=0.

c
c   resolução do sistema ax=b. método de gauss-seidel
c
do 400 k=1,kmax
c
c   montagem do vetor temporário
c
do 300 i=1,n2
v(i)=b(i)
300 continue
c
b(1)=(-v(2)*z(1,2)+d(1))/z(1,1)
b(1)=v(1)+w*(b(1)-v(1))
do 310 i=2,n4
b(i)=(-b(i-1)*z(i,i-1)-v(i+1)*z(i,i+1)+d(i))/z(i,i)
b(i)=v(i)+w*(b(i)-v(i))
310 continue
c
b(n2)=(-b(n4)*z(n2,n4)+d(n2))/z(n2,n2)
b(n2)=v(n2)+w*(b(n2)-v(n2))
c

```



```

c   teste de convergência
c
do 320 i=1,n2
  if (abs((b(i)-v(i))/b(i)).gt.erro) then
    go to 400
  end if
320 continue
go to 410
c
400 continue
c
  if (k.ge.kmax) then
c
  write(*,405)k
405 format(4x,'k= ',15,'          NÃO CONVERGIU          ')
c
  stop
c
  end if
c
c   atualização das fontes fictícias
c
410 do 420 i=1,n
  c11(i)=2/r1(i)*(b(i)-b(i+1))+c11(i)
  c1c(i)=2/rc(i)*b(i)-c1c(i)
420 continue
c
  vn2(i1)=b(n2)
  cis(i1)=b(n2)/r
  t(i1)=(i1-1)*dt
c
c   cálculo de cismax
c
c
  if (cis(i1).ge.cismax) then
    cismax=cis(i1)
    t7=i1
430 end if
c
c   cálculo de t90 e t10
c
  if (i8.ne.0) then
    go to 530
c
  else if ((cis(i1).lt..1*cim).and.(cis(i1).lt.0)) then
    i8=1
    i1=i1
    td=t(i1)
    go to 530
c
  else if (cis(i1).lt..1*cim) then
    go to 530
c
  else if ((cis(i1).ge..1*cim).and.(cis(i1).lt..9*cim)) then

```

```
      go to 520
c
      else if ((cls(11).ge..9*clm).and.(16.eq.0)) then
      17=11
      14=14+1
      16=16+1
      t10=t10+dt
      t90=t90+dt
      go to 530
c
      else
c
      14=14+1
      16=16+1
      t10=t10+dt
      t90=t90+dt
      go to 530
c
510  end if
c
520  if (14.eq.0) then
      15=11
      14=14+1
      t10=t10+dt
      go to 530
c
      else
c
      14=14+1
      t10=t10+dt
c
      end if
c
c  teste de overflow
c
530  if (11.ge.2049) then
      write(*,540)11
540  format(10x,'11=  ',14,' OVERFLOW -> O PROGRAMA CONTINUA')
      go to 550
      end if
c
c  teste do fim do ciclo de tempo
c
      if (t(11).lt.tfl) then
      go to 250
      end if
c
c  chama a subrotina passo
c
      13=13+1
      call passo (11,12,vn2,dt)
      if (dt.lt.1.9) then
      write(3,10000)
```

```

10000 format(4x,' DT É MENOR DO QUE 1.9 ',/)
      go to 550
      else if (i3.eq.i2) then
      go to 150
      end if

c
c   cálculo de tf e tc
c
550   a=(cis(i7)-cis(i5))/(t(i7)-t(i5))
      aa=cis(i7)-a*t(i7)
      t2=(cim-aa)/a
      tf=t2
      a=(cis(i7+i6-1)-cis(i5+i4-1))/(t(i7+i6-1)-t(i5+i4-1))
      aa=cis(i7+i6-1)-a*t(i7+i6-1)
      t4=-aa/a
      t3=(cim-aa)/a
      tc=t4-t3

c
c   cálculo do overshoot e de kk (integração trapezoidal)
c
      do 600 i=1,i1
      if ((cis(i)-cis(i+1)).gt.0) then
      go to 610
      end if
600   continue
c
610   i2=i
      i3=int(t3/dt)-10
      f=cis(i2)/2.
      overs=0
      do 620 i=i2,i3
      f=cis(i)+f
      xx=(cis(i)-cim)*100./cim
      if ((abs(overs)).gt.(abs(xx))) then
      go to 620
      end if
      overs=xx
      t5=t(i)
620   continue
      f=(cis(i3+1)/2.+f)/float(i3+1-i2)
      kk=100.*vc/(f*(zonda+r))

c
c   cálculo do undershoot
c
      u=0
      do 630 i=i1,i1
      if (cis(i).gt.0) then
      go to 640
      end if
c
      if (abs(u).gt.abs(cis(i)*100./cim)) then
      go to 630
      end if

```

```

u=cis(1)*100./cim
t6=t(1)
630 continue
c
c cálculo de cismin
c
640 do 650 i=11,11
if (cis(1).gt.cismin) then
go to 650
end if
cismin=cis(1)
t8=t(1)
650 continue
c
c cálculo da perda de energia do gerador (integração trapezoidal)
c
e1=.5*n*c(1)*cb*vc*vc
e2=vn2(1)*cis(1)*dt/2.
do 700 i=2,11-1
e2=e2+vn2(i)*cis(i)*dt
700 continue
e2=e2+vn2(11)*cis(11)*dt/2.
e=(e1-e2)*100./e1
c
c teste de t90 e t10
c
if ((t90.lt.t90p).or.(t90.gt.1.2*t90p)) then
go to 1300
else if (t10.gt.1.5*t90p) then
go to 1350
end if
c
c teste do overshoot
c
if ((overs.gt.overp1).or.(overs.lt.overp2)) then
go to 1400
end if
c
c teste do undershoot
c
if (u.lt.up) then
go to 1500
end if
c
c teste da eficiência do gerador kk
c
if ((kk.lt.kkp1).or.(kk.gt.kkp2)) then
go to 1550
end if
c
c saída
c
write(3,1000)dt,t90,t10,overs,t5,u,t6,kk,e,tf,tc

```

```

1000  format(/,7x,'dt=',f8.2,12x,'t90=',f8.2,12x,'t10=',f8.2,/,4x,
      *'overs=',f5.2,16x,'t5=',f8.2,/,8x,'u=',f6.2,15x,'t6=',f8.2,/,
      *7x,'kk=',f6.2,16x,'e=',f8.2,/,7x,'tf=',f8.2,13x,'tc=',f8.2)
c
      if ((kk.lt.98).or.(kk.gt.102)) then
      go to 1550
      end if
c
      stop
c
      teste de t90
c
1300  call lnl2(l,n,l11,t90,t90p,g)
      dt=250.
      go to 140
c
      teste de t10
c
1350  call l3l1(l,n,l12,g)
      dt=250.
      go to 140
c
      teste do overshoot
c
1400  call lningn(l,n,n1,l9,overs,g)
      dt=250.
      go to 140
c
      teste do undershoot
c
1500  call l1l3g1(l,n,l10,g)
      dt=250.
      go to 140
c
      teste de kk
c
1550  call lnln1(l,n,n1,l13,g)
      dt=250.
      go to 140
c
      end

      subroutine passo(l1,l2,vn2,dt)
      real vn2(l1),vv(1025)
      if (l2.eq.1) then
      go to 10
      end if
      m=l1/2
      do 20 i=1,m
      if (vv(i).eq.0) then
      go to 20
      else if (vn2(i*2-1).lt.0) then
      go to 40

```

```

else if (abs((vn2(i*2-1)-vv(i))*100./vv(i)).gt.20.) then
go to 10
end if
20 continue
go to 40
10 i2=i2+1
do 50 i=1,i1
vv(i)=vn2(i)
50 continue
dt=dt/2.
40 return
end

```

```

subroutine l113g1(i,n,i10,g)
real i(n),g(n)
i10=i10+1
if (i10.eq.30) then
go to 20
else if (i(1).le..1) then
go to 10
end if
i(1)=i(1)-.1
return
10 if (i(3).le..1) then
go to 40
end if
i(3)=i(3)-.1
return
40 if (g(1).gt..3) then
go to 20
end if
g(1)=g(1)+.1
return
20 write(3,30)(i(i),i=1,n)
write(3,50)(g(i),i=1,n)
30 format(//,5x,5(f8.4,1x))
50 format(5x,5(f8.4,1x),//,20x,'STOP 2',//)
stop
end

```

```

subroutine lni2(i,n,i11,t90,t90p,tb,g)
real i(n),g(n),t90,t90p,tb
if (t90.gt.1.2*t90p/tb) then
k=-1
end if
i11=i11+1
if (i11.eq.30) then
go to 20
else if (i(n).ge.2.) then
go to 10
end if
i(n)=i(n)+.1*k
return

```

```

10  if (l(2).ge.1.2) then
    go to 20
    end if
    l(2)=l(2)+.1*k
    return
20  write(3,30)(l(i),i=1,n)
    write(3,50)(g(i),i=1,n)
30  format(//,5x,5(f8.4,1x))
50  format(5x,5(f8.4,1x),//,20x,'STOP 3',//)
    stop
    end

```

```

subroutine lnln1(l,n,n1,l13,g)
real l(n),g(n)
l13=l13+1
if (l13.eq.30) then
go to 20
else if (l(n).gt.2.) then
go to 10
end if
l(n)=l(n)+.1
return
10  if (l(n1).gt.1.5) then
    go to 20
    end if
    l(n1)=l(n1)+.1
    return
20  write(3,30)(l(i),i=1,n)
    write(3,50)(g(i),i=1,n)
30  format(//,5x,5(f8.4,1x))
50  format(5x,5(f8.4,1x),//,20x,'STOP 5',//)
    stop
    end

```

```

subroutine lnlnn(l,n,n1,l9,overs,g)
real l(n),g(n),overs
if (overs.lt.0) then
k=-1
end if
l9=l9+1
if(l9.ge.50) then
go to 20
else if (l(n).gt.2.) then
go to 10
end if
l(n)=l(n)+.1*k
return
10  if (l(n1).gt.1.5) then
    go to 40
    end if
    l(n1)=l(n1)+.1*k
    return
40  if ((g(n).eq.0).and.(k.lt.0)) then

```

```
go to 20
else if (g(n).gt..3) then
go to 20
end if
g(n)=g(n)+.1*k
return
20 write(3,30)(i(i),i=1,n)
write(3,50)(g(i),i=1,n)
30 format(//,5x,5(f8.4,1x))
50 format(5x,5(f8.4,1x),//,20x,'STOP 1',//)
stop
end
```


5.6 Programa 3:

```

program 3
c ////////////////////////////////////////////////////////////////////
c //                                                                    //
c //              RESISTOR LINEAR                                     //
c //                                                                    //
c ////////////////////////////////////////////////////////////////////
c
c A)COMENTÁRIOS:
c * método de solução do sistema de equações: SOR
c * antes de rodar o programa, atualizar valores de entrada:
c   TESE1.DAT
c * software gráfico usado: PLOT CALL
c B)DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:
c * APONTADORES:
c   . ng- número do gerador
c   . nn- fator de escala para o software PLOT CALL
c         ATENÇÃO: - tfl/(100.*dt) deve ser sempre
c         maior que 1
c   . n - número de estágios do gerador
c   . l1- ciclo de tempo
c   . l4 a l7 - cálculo de tf e tc
c   . l8 - cálculo de td (aponta o início do pulso
c         negativo)
c * PARÂMETROS PARA COMPUTAÇÃO:
c   . tfl - número total de iterações - ATENÇÃO: tfl
c         sempre maior que 4000 microsegundos
c   . kmax- limitador de tempo de máquina (loop)
c   . erro- precisão
c   . dt - intervalo de tempo
c   . w - fator de aceleracao
c * GRANDEZAS ELÉTRICAS:
c   . C - capacitância
c   . L - indutância
c   . G - condutância
c   . RV - resistência das conexões
c   . R - impedância de onda do gerador (resistiva)
c   . CIG - corrente no capacitor
c   . CIL - corrente no indutor
c   . VN2 - tensão de saída
c   . CIS - corrente de saída
c   . VC - tensão de carregamento
c   . VB - tensão base (20 VOLTS)
c   . CB - capacitância base (1.96 MICROFARADS)
c   . GB - condutância base
c   . LB - indutância base
c   . TB - tempo base
c   . CIB - corrente base
c * SISTEMA DE EQUAÇÕES:
c   . YAA - matriz dos coeficientes (tri-diagonal)
c   . B - vetor conhecido ou da iteração anterior
c   . V - vetor temporário

```

```

C      * PARÂMETROS DO PULSO:
C      . T90 - tempo virtual
C      . T90P- tempo virtual padrão
C      . T10 - tempo virtual total
C      . T10P- tempo virtual total padrão
C      . TF - tempo de frente
C      . TC - tempo de cauda
C      . TD - tempo total do pulso
C      . T1 - tempo de início da frente de onda
C      . T2 - tempo final da frente da onda
C      . T3 - tempo de cauda da onda
C      . T4 - tempo final da cauda da onda
C      . T5 - tempo que ocorre o overshoot
C      . T6 - tempo que ocorre o undershoot
C      . U - undershoot
C      . KK - tolerância de saída do dispositivo
C      . CIM - valor de topo da corrente
C      . OVERS - overshoot
C      . CISMÁX- valor máximo da corrente, no crescimento
C      . CISMÍN- valor mínimo da corrente no primeiro pulso
C              negativo
C
C    C)PROGRAMAS:
C      * TESE1.DAT - armazena os parâmetros para leitura
C      * TESE1.LST - armazena as saídas t(i) e cis(i)
C      * TESE1.SAI - armazena os parâmetros do gerador, do pulso e de
C              computação
C      * PLOT CALL - software gráfico (sequência de operações):
C              GRAFIT: opções + comando PLOT
C              PC + operações
C              PLOT + operações
C
C      real vn2(600),cis(600),t(600),c(8),l(8),g(8),rc(8),rl(8),kk
C      real rg(8),rig(8),b(10),z(10,10),d(10),v(10),cil(10),clic(10)
C      open(unit=1,file='tese1.dat',status='old')
C      open(unit=2,file='tese1.lst',status='new')
C      open(unit=3,file='tese1.sai',status='new')
C
C      leitura dos valores dos componentes, tempo final, tensão de
C      carregamento, tempo virtual padrão, número de estágios
C      do gerador, dt, kmax e erro
C
C      read (1,*)ng,fr,tfl,rv,vc,t90p,n,dt,kmax,w,erro
C      do 100 l=1,n
C          c(l)=1.
C
100  continue
C      read(1,*)(l(l),l=1,n)
C      read(1,*)(g(l),l=1,n)
C
C      grandezas base
C
C      vb=1000.
C      cb=1.96
C      rb=t90p/(2*(n-1)*cb)

```

```

gb=1/rb
lb=cb*rb*rb
tb=sqrt(lb*cb)
cib=vb/rb
c
c cálculo de r
c
a=0
aa=0
do 130 i=1,n
a=a+l(i)
aa=aa+c(i)
130 continue
c
zonda=sqrt(a/aa)*rb
r=fr*zonda
rv=a*rv*rb
cim=vc/(zonda+r)
c
c apontadores
c
n2=n+2
n4=n+1
l1=1
l4=0
l5=0
l6=0
l7=0
l8=0
t10=0
t90=0
cismax=0
cismin=0
c
c cálculo de ri,rg e ri//rg
c
do 160 i=1,n
ri(i)=2*l(i)*lb/dt
rc(i)=dt/(2*c(i)*cb)
if (g(i).ne.0) then
rg(i)=1./(g(i)*gb)
rig(i)=ri(i)*rg(i)/(ri(i)+rg(i))
go to 160
end if
rig(i)=ri(i)
160 continue
c
c condições iniciais
c
do 170 i=1,n
b(i)=vc
cii(i)=0
cic(i)=0

```

```

170  continue
      if (g(n).ne.0) then
      b(n2)=b(n)*r/(r+rv+rg(n))
      b(n4)=b(n)*(r+rv)/(r+rv+rg(n))
      clic(n)=(b(n)-b(n4))/rg(n)
      clic(11)=b(n2)/r
      go to 190
180  end if
      clic(n)=0
      b(n2)=0
      b(n4)=0
      clic(11)=0

c
190  vn2(11)=b(n2)
      t(11)=0

c
c  atualização das fontes fictícias no primeiro ciclo de tempo
c
      do 200 i=1,n
      clic(i)=1/rc(i)*b(i)+clic(i)
      clic(11)=1/r1(i)*(B(i)-b(i+1))+clic(i)
200  continue

c
c  Inicialização de yaa
c
      do 220 i=1,10
      do 210 j=1,10
          z(i,j)=0.
210  continue
220  continue

c
c  montagem de yaa
c
      do 240 i=1,n
          z(i,i+1)=-1/rig(i)
          z(i+1,i)=z(i,i+1)
      if (i.eq.1) then
      go to 240
230  end if
      z(i,i)=1/rig(i-1)+1/rc(i)+1/rig(i)
240  continue
      z(1,1)=1/rc(1)+1/rig(1)
      z(n4,n4)=1/rig(n)+1/rv
      z(n2,n2)=1/r+1/rv
      z(n4,n2)=-1/rv
      z(n2,n4)=z(n4,n2)

c
c  Início do ciclo de tempo
c
250  i1=i1+1
c
      write(*,*)i1
c

```

```

c      montagem de d
c
do 260 i=2,n
  li=i-1
  d(i)=c11(li)+c1c(i)-c1i(i)
260  continue
  d(1)=c1c(1)-c1i(1)
  d(n4)=c1i(n)
  d(n2)=0.

c
c      resolução do sistema ax=b. método de gauss-seidel
c
do 400 k=1,kmax

c      montagem do vetor temporário
c
do 300 i=1,n2
  v(i)=b(i)
300  continue
c
  b(1)=(-v(2)*z(1,2)+d(1))/z(1,1)
  b(1)=v(1)+w*(b(1)-v(1))
  do 310 i=2,n4
  b(i)=(-b(i-1)*z(i,i-1)-v(i+1)*z(i,i+1)+d(i))/z(i,i)
  b(i)=v(i)+w*(b(i)-v(i))
310  continue
c
  b(n2)=(-b(n4)*z(n2,n4)+d(n2))/z(n2,n2)
  b(n2)=v(n2)+w*(b(n2)-v(n2))

c
c      teste de convergência
c
do 320 i=1,n2
  if (abs((b(i)-v(i))/b(i)).gt.erro) then
  go to 400
  end if
320  continue
  go to 410

c
400  continue
c
  if (k.ge.kmax) then
c
  write(*,405)k
405  format(4x,15,'          NÃO CONVERGIU          ')
c
  stop
c
  end if

c
c      atualização das fontes fictícias
c
410  do 420 i=1,n

```

```

c11(1)=2/r1(1)*(b(1)-b(1+1))+c11(1)
c1c(1)=2/rc(1)*b(1)-c1c(1)
420 continue
c
vn2(11)=b(n2)
cis(11)=b(n2)/r
t(11)=(11-1)*dt
c
c cálculo de cismax
c
if (cis(11).ge.cismax) then
cismax=cis(11)
t7=11
430 end if
c
c cálculo de t90 e t10
c
if (18.ne.0) then
go to 530
c
else if ((cis(11).lt..1*cim).and.(cis(11).lt.0)) then
18=1
11=11
td=t(11)
go to 530
c
else if (cis(11).lt..1*cim) then
go to 530
c
else if ((cis(11).ge..1*cim).and.(cis(11).lt..9*cim)) then
go to 520
c
else if ((cis(11).ge..9*cim).and.(16.eq.0)) then
17=11
14=14+1
16=16+1
t10=t10+dt
t90=t90+dt
go to 530
c
else
c
14=14+1
16=16+1
t10=t10+dt
t90=t90+dt
go to 530
c
510 end if
c
520 if (14.eq.0) then
15=11
14=14+1

```

```

t10=t10+dt
go to 530
c
else
c
  i4=i4+1
  t10=t10+dt
c
end if
c
teste do fim do ciclo de tempo
c
530 if (t(i1).lt.tfi) then
go to 250
end if
c
c cálculo de tf e tc
c
a=(cis(i7)-cis(i5))/(t(i7)-t(i5))
aa=cis(i7)-a*t(i7)
t2=(clm-aa)/a
tf=t2
a=(cis(i7+i6-1)-cis(i5+i4-1))/(t(i7+i6-1)-t(i5+i4-1))
aa=cis(i7+i6-1)-a*t(i7+i6-1)
t4=-aa/a
t3=(clm-aa)/a
tc=t4-t3
c
c cálculo do overshoot e de kk (integração trapezoidal)
c
do 600 i=1,i1
if (cis(i)-cis(i+1).gt.0) then
go to 610
end if
600 continue
c
610 i2=i
i3=int(t3/dt)-10
f=cis(i2)/2.
overs=0
do 620 i=i2,i3
f=cis(i)+f
xx=(cis(i)-clm)*100./clm
if (abs(overs).gt.abs(xx)) then
go to 620
end if
overs=xx
t5=t(i)
620 continue
f=(cis(i3+1)/2.+f)/float(i3+1-i2)
kk=100.*vc/(f*(zonda+r))
c
c cálculo do undershoot

```

```

c
  u=0
  do 630 i=11,11
  if (cis(i).gt.0) then
  go to 640
  end if

c
  if (abs(u).gt.abs(cis(i)*100./cim)) then
  go to 630
  end if
  u=cis(i)*100./cim
  t6=t(i)
630 continue

c
c   cálculo de cismin
c
640 do 650 i=11,11
  if (cis(i).gt.cismin) then
  go to 650
  end if
  cismin=cis(i)
  t8=t(i)
650 continue

c
c   cálculo da perda de energia do gerador (integração trapezoidal)
c
  e1=.5*n*c(1)*cb*vc*vc
  e2=vn2(1)*cis(1)*dt/2.
  do 700 i=2,11-1
  e2=e2+vn2(i)*cis(i)*dt
700 continue
  e2=e2+vn2(11)*cis(11)*dt/2.
  e=100.*(e1-e2)/e1

c
c   saída: . L em mH
c           . G em S
c           . C em microF
c           . tempo em microsegundos
c           . E,U,KK,OVERS em %
c
  nn=int(tfi/(100.*dt))
  write(2,900)(t(i),cis(i),i=1,11,nn)

c
  do 950 i=1,n
  l(i)=l(i)*lb*.001
  g(i)=g(i)*gb
  c(i)=c(i)*cb
950 continue
  write(3,1000)ng
  write(3,1010)tfi,kmax,erro,dt
  write(3,1020)t90p,zonda,vc
  write(3,1030)(c(i),i=1,n)
  write(3,1040)(g(i),i=1,n)

```



```
write(3,1050)(I(I),I=1,n)
write(3,1060)t90,t10,overs,t5,u,t6,tf,tc,kk,e,cim,td,t7,cismax
write(3,1070)t8,cismin

c
900  format(4x,g10.3,10x,g15.5)
1000  format(////////,15x,' RESISTOR LINEAR          GERADOR ',i4,
*/,4x,'A)PARÂMETROS PARA COMPUTAÇÃO:')
1010  format(/,6x,'tfl=',f8.2,2x,'kmax=',i4,2x,'erro=',f8.5,2x,
*'dt=',f8.2)
1020  format(/,4x,'B)PARÂMETROS PADRÃO:',/,6x,'t90p=',f8.2,2x,
*'zonda=',f7.2,2x,'vc=',f8.2)
1030  format(/,4x,'C)PARÂMETROS DO GERADOR:',/,6x,'C:',8(f5.2,2x))
1040  format(/,6x,'G:',8(f5.2,2x))
1050  format(/,6x,'L:',5(f8.2,2x),/,8x,3(f8.2,2x))
1060  format(/,4x,'D)PARÂMETROS DO PULSO:',/,8x,'t90=',f8.2,12x,
*'t10=',f8.2,/,6x,'overs=',f6.2,15x,'t5=',f8.2,/,10x,'u=',
*f6.2,15x,'t6=',f8.2,/,9x,'tf=',f8.2,13x,'tc=',f8.2,/,9x,
*'kk=',f6.2,16x,'e=',f6.2,/,8x,'cim=',f8.2,13x,'td=',f8.2,/,
*9x,'t7=',f8.2,9x,'cismax=',f8.2)
1070  format(9x,'t8=',f8.2,9x,'cismin=',f8.2)

c
  stop
  end
```

5.7 Programa 4:

```

program 4
C ////////////////////////////////////////////////////////////////////
C //                                                                    //
C //                          PARA-RAIOS                               //
C //                                                                    //
C ////////////////////////////////////////////////////////////////////
C
C A)COMENTÁRIOS:
C * método de solução do sistema de equações: SOR
C * método de solução do circuito: compensação (DOMMEL)
C * antes de rodar o programa, atualizar valores de entrada:
C   TESE2.DAT
C
C B)DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS:
C * APONTADORES:
C   . ng- número do gerador
C   . nn- fator de escala para o software PLOT CALL
C         ATENÇÃO: - tfl/(100.*dt) deve ser sempre
C         maior que 1.
C   . n - número de estágios do gerador
C   . l1- ciclo de tempo
C * PARÂMETROS PARA COMPUTAÇÃO:
C   . tfl - número total de iterações - ATENÇÃO: tfl
C         sempre maior que 4000 microsegundos
C   . kmax- limitador de tempo de máquina (loop)
C   . erro- precisão
C   . dt  - intervalo de tempo
C   . fr  - fator de conversão da resistência de carga
C         do gerador
C   . w  - fator de aceleracao
C * GRANDEZAS ELÉTRICAS:
C   . C  - capacitância
C   . L  - indutância
C   . G  - condutância
C   . RV - resistência das conexões
C   . ZONDA- impedância de onda do gerador
C   . R  - resistência de carga
C   . CIC - corrente no capacitor
C   . CIL - corrente no indutor
C   . VN2 - tensão de saída
C   . CIS - corrente de saída
C   . VC  - tensão de carregamento
C   . VB  - tensão base (1000 VOLTS)
C   . CB  - capacitância base (1.96 MICROFARADS)
C   . GB  - condutância base
C   . LB  - indutância base
C   . TB  - tempo base
C   . CIB - corrente base
C * SISTEMA DE EQUAÇÕES:
C   . YAA - matriz dos coeficientes (tri-diagonal)
C   . B  - vetor conhecido ou da iteração anterior
C   . V  - vetor temporário

```

```

C)PROGRAMAS/SUBROTINAS:
* TESE2.DAT - armazena os parâmetros para leitura
* TESE2.LST - armazena as saídas t(i) e cis(i)
* PLOT CALL - software gráfico (sequência de operações):
GRAFIT: opções + comando PLOT
PC + operações
PLOT + operações
* PRAIOS - introduz o elemento não-linear no cálculo da
corrente de saída do gerador

real vn2(600),cis(600),t(600),c(8),l(8),g(8),rc(8),rl(8)
real rg(8),rig(8),b(10),d(10),v(10),cli(10),cic(10),zg(10)
real z(10,10),y(10,10),kk
open(unit=1,file='tese2.dat',status='old')
open(unit=2,file='tese2.lst',status='new')

leitura dos valores dos componentes, tempo final, tensão de
carregamento, tempo virtual padrão, número de estágios do
gerador, dt, kmax e erro

read (1,*)ng,fr,tfl,rv,vc,t90p,n,dt,kmax,w,erro
do 100 i=1,n
    c(i)=1.
100 continue
read(1,*)(l(i),i=1,n)
read(1,*)(g(i),i=1,n)

grandezas base

vb=1000.
cb=1.96
rb=t90p/(2*(n-1)*cb)
gb=1/rb
lb=cb*rb*rb
tb=sqrt(lb*cb)
cib=vb/rb

cálculo de r

a=0
aa=0
do 130 i=1,n
a=a+l(i)
aa=aa+c(i)
130 continue

zonda=sqrt(a/aa)*rb
r=fr*zonda
rv=a*rv*rb
cim=.5*vc/(zonda+r)

apontadores

```

```

n2=n+2
n4=n+1
l1=1
c
c cálculo de ri,rg e ri//rg
c
do 160 i=1,n
ri(i)=2*i(i)*ib/dt
rc(i)=dt/(2*c(i)*cb)
if (g(i).ne.0) then
rg(i)=1./(g(i)*gb)
rig(i)=ri(i)*rg(i)/(ri(i)+rg(i))
go to 160
end if
rig(i)=ri(i)
160 continue
c
c condições iniciais
c
do 170 i=1,n
b(i)=vc
cli(i)=0
clic(i)=0
170 continue
if (g(n).ne.0) then
b(n2)=b(n)*r/(r+rv+rg(n))
b(n4)=b(n)*(r+rv)/(r+rv+rg(n))
clic(n)=(b(n)-b(n4))/rg(n)
zg(n2)=r*(rv+rg(n))/(r+rv+rg(n))
c
c chama a subrotina PRAIOS
c
call praios(b,n2,r,l1,cis,zg)
c
b(n4)=b(n4)-rg(n)*(r+rv)/(rg(n)+r+rv)*cis(l1)
go to 190
end if
180 clic(n)=0
b(n2)=0
b(n4)=0
cis(l1)=0
c
--190-- vn2(l1)=b(n2)
t(l1)=0
c
c atualização das fontes fictícias no primeiro ciclo de tempo
c
do 200 i=1,n
clic(i)=1/rc(i)*b(i)+clic(i)
cli(i)=1/ri(i)*(B(i)-b(i+1))+cli(i)
200 continue
c
c Inicialização de yaa

```

```

c
do 220 i=1,10
do 210 j=1,10
z(i,j)=0.
210 continue
220 continue
c
c montagem de yaa
c
do 240 i=1,n
z(i,i+1)=-1/ri(i)
z(i+1,i)=z(i,i+1)
if (i.eq.1) then
go to 240
230 end if
z(i,i)=1/ri(i-1)+1/rc(i)+1/ri(i)
240 continue
z(1,1)=1/rc(1)+1/ri(1)
z(n4,n4)=1/ri(n)+1/rv
z(n2,n2)=1/r+1/rv
z(n4,n2)=-1/rv
z(n2,n4)=z(n4,n2)
c
c cálculo de ZG
c
do 245 i=1,n4
d(i)=0.
245 continue
d(n2)=1.
c
c triangularização de YAA
c
y(1,1)=z(1,1)
y(1,2)=z(1,2)/y(1,1)
do 246 k=1,n4
j=k+1
y(j,j)=z(j,j)-z(j,k)*y(k,j)
if (j.ne.n2) then
y(j,j+1)=z(j,j+1)/y(j,j)
end if
246 continue
c
c triangularização aplicada a D
c
j=0
d(1)=d(1)/y(1,1)
do 247 i=1,n4
j=i+1
d(j)=(d(j)-z(j,i)*d(i))/y(j,j)
247 continue
c
c substituição regressiva
c

```

```

k=0
j=0
do 248 k=2,n2
j=n3-k
d(j)=d(j)-y(j,j+1)*d(j+1)
248 continue
i=0
do 249 i=1,n2
zg(i)=d(i)
249 continue
c
c inicio do ciclo de tempo
c
250 i1=i1+1
c
write(*,*)i1
c
c montagem de d
c
do 260 i=2,n
i1=i-1
d(i)=cii(i1)+cic(i)-cii(i)
260 continue
d(1)=cic(1)-cii(1)
d(n4)=cii(n)
d(n2)=0.
c
c resolução do sistema ax=b. método de gauss-seidel
c
do 400 k=1,kmax
c
c montagem do vetor temporário
c
do 300 i=1,n2
v(i)=b(i)
300 continue
c
b(1)=(-v(2)*z(1,2)+d(1))/z(1,1)
b(1)=v(1)+w*(b(1)-v(1))
do 310 i=2,n4
b(i)=(-b(i-1)*z(i,i-1)-v(i+1)*z(i,i+1)+d(i))/z(i,i)
b(i)=v(i)+w*(b(i)-v(i))
310 continue
c
b(n2)=(-b(n4)*z(n2,n4)+d(n2))/z(n2,n2)
b(n2)=v(n2)+w*(b(n2)-v(n2))
c
c teste de convergência
c
do 320 i=1,n2
if (abs((b(i)-v(i))/b(i)).gt.erro) then
go to 400
end if

```

```

320  continue
      go to 410
c
400  continue
c
      if (k.ge.kmax) then
c
      write(*,405)k
405  format(4x,15,'                NÃO CONVERGIU                ')
c
      stop
c
      end if
c
      chama a subrotina PRAIOS
c
410  call praios(b,n2,r,l1,cis,zg)
c
      solução final para as tensões nodais
c
      l=0
      do 415 i=1,n4
      b(i)=b(i)-cis(l1)*zg(i)
415  continue
c
      atualização das fontes fictícias
c
      do 420 i=1,n
      cil(i)=2/ri(i)*(b(i)-b(i+1))+cil(i)
      clic(i)=2/rc(i)*b(i)-clic(i)
420  continue
c
      vn2(l1)=b(n2)
      t(l1)=(l1-1)*dt
c
      teste do fim do ciclo de tempo
c
530  if (t(l1).lt.tfi) then
      go to 250
      end if
c
      saída
c
      nn=int(tfi/(100.*dt))
      write(2,900)(t(i),cis(i),i=1,l1,nn)
900  format(5x,g10.3,10x,g15.5)
c
      stop
      end

subroutine praios(b,n2,r,l1,cis,zg)
dimension d(30),b(10),cis(600),zg(10)
open(unit=1,file='praios.dat',status='old')

```

```
c
v=b(n2)
read(1,*)(d(i),i=1,30)
c
10 j=1
c
c linearização das características do pára-raios
c
20 v1=d(j)
v2=d(j+2)
cor1=d(j+1)
cor2=d(j+3)
c
c cálculo das equações não-lineares
c
g1=cor1-v1/r
g2=cor2-v2/r
a=(v2-v1)/(g2-g1)
aa=v2-a*g2
if (j.eq.1) aa=0.
c
c12=(v-aa)/(a+zg(n2))
b(n2)=a*c12+aa
c11=b(n2)/r
cis(11)=c11+c12
if (v.lt.0) cis(11)=- (c11+c12)
c
if (abs(cis(11)).gt.abs(cor2)) then
j=j+2
go to 20
end if
return
end
```


5.8 Programa 5:

```

program 5
c
c ESTE PROGRAMA CALCULA O NÚMERO DE ESPIRAS DAS BOBINAS DAS
c INDUTÂNCIAS CALCULADAS
c
c l1 - comprimento das bobinas (cm)
c d - diâmetro das bobinas (cm)
c a - diâmetro do condutor (cm)
c b,c - número de camadas
c K - constante de NAGAOKA
c l(i)- indutância em mH
c n(i)- número de espiras das bobinas
c nn - número de espiras de uma camada
c
real n(10),l(10),c(10),b(5),k(5),nn,l1
open (unit=1,file='bobina.dat',status='old')
open (unit=2,file='bobina.lst',status='new')
c
read(1,*)l1,d,a
read(1,*)(l(i),i=1,8)
read(1,*)(b(i),i=1,5)
nn=l1/a
do 10 i=1,5
k(i)=1/(1+.45*(d+b(i)*a)/l1+.64*b(i)*a/(d+b(i)*a)+.84*b(i)*a/l1)
10 continue
do 30 i=1,8
do 20 j=1,5
n(i)=sqrt(l(i)*l1*1000000/(k(j)*3.14*3.14*(d+b(j)*a)**2))
c(i)=n(i)/nn
if (c(i).lt.b(j)) then
go to 30
end if
20 continue
30 continue
c
c saída
c
write(2,100)
100 format(////////,15x,'PROJETO DAS BOBINAS',//,4x,'BOBINA',
*10x,'ESPIRAS',10x,'CAMADAS')
do 110 i=1,8
write(2,120)i,n(i),c(i)
110 continue
120 format(6x,12,12x,f6.1,11x,f4.1)
write(2,130)nn
130 format(//,4x,'NÚMERO DE ESPIRAS DE UMA CAMADA(nn)= ',f6.1)
stop
end

```

5.9 Programas TESE1.DAT, TESE2.DAT, PRAIOS.DAT:

a)TESE1.DAT:

```
4,1.,4500.,.001,16200.,2400.,8,8.,250,1.8,.0001
.4,1.1,1.,1.,1.,1.,.9,1.4
.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0
```

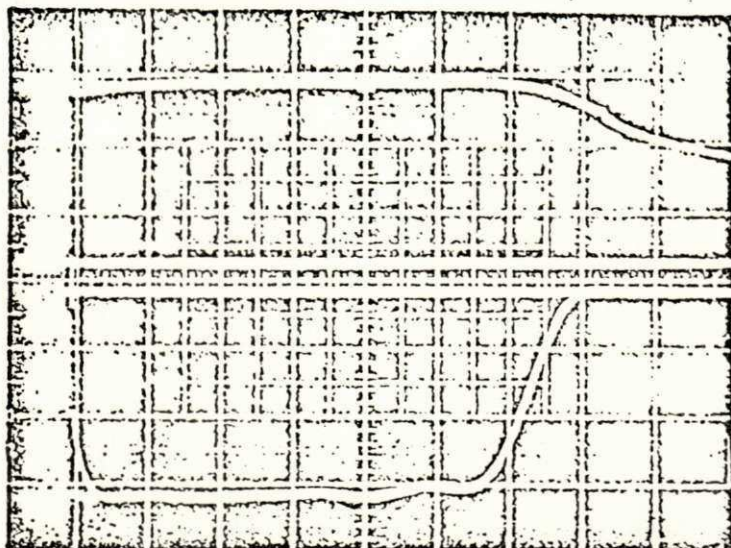
b)TESE2.DAT:

```
4,1.,4500.,.001,25000.,2400.,8,8.,250,1.8,.0001
.4,1.1,1.,1.,1.,1.,.9,1.4
.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0
```

c)PRAIOS.DAT:

```
0.,0.
3300.,.0001
4000.,.001
4290.,.01
4440.,.1
4710.,1.
4860.,10.
5000.,100.
5550.,1000.
6780.,10000.
```

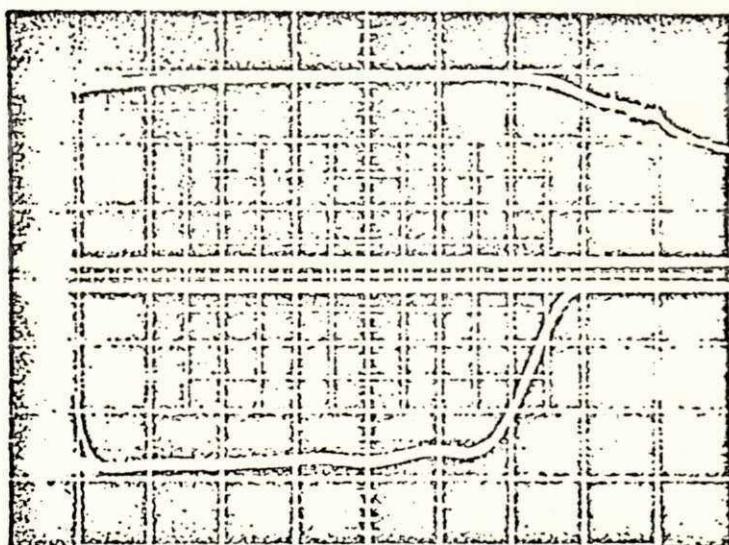
5.10 Curva Vxt e Ixt de Pára-Raios de ZnO tipo XAP ASEA:



Residual voltage of test sample

Discharge current 250 A/main div

1st application

LB 200-111E
Page 11
LKL 81-04-30

Residual voltage of test sample

Discharge current 250 A/main div

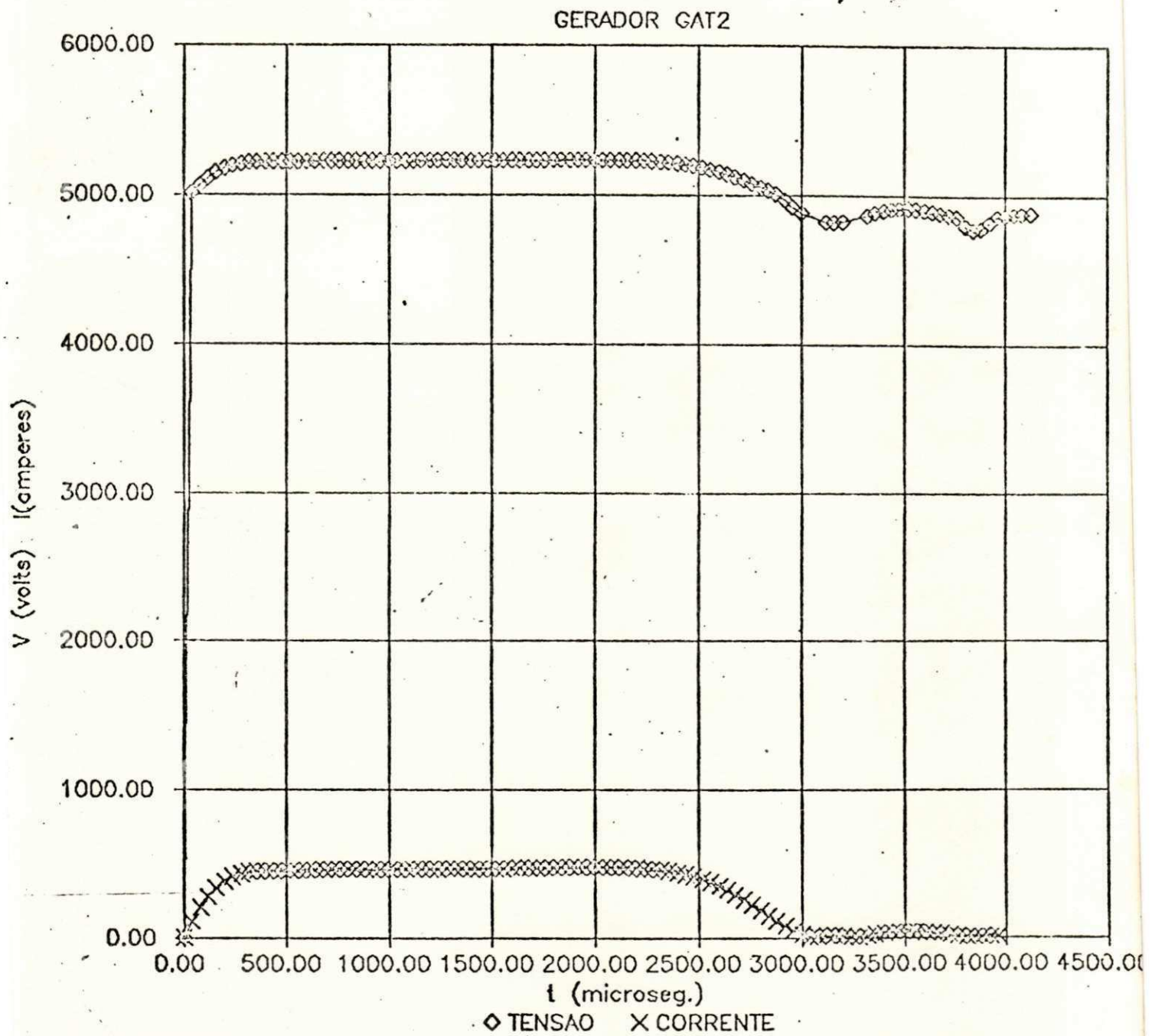
20th application

Oscillograms from long duration current impulse test on XAP surge arrester, sample No 1.

Time scale 500 μ s/main div.

5.11 Curva Vxt e Ixt com R não-linear para Gerador GAT2:

Obs.: Tensão de Carregamento = 75000 Volts.



6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Guia para aplicação de Pára-Raios de resistor variável em sistemas de corrente alternada (P-NB-223). Rio de Janeiro, 1971.
- [2] IEC - International Electrotechnical Commission. Publication 99.1 - Lightning Arresters. Part 1: Non-Linear resistor type arrester for a.c. systems. Geneve, 1970.
- [3] MODRUSAN, M. Long-Duration impulse current generator for arrester test according to IEC recommendation. Switzerland. ASEA Bulletin, 1978, E 138.1 edition.
- [4] GURURAJ, B. I. Choice of circuit constants for long-duration current generator for surge diverter testing.
- [5] YOST, A. G. et al. Transmission-line discharge testing for station and intermediate lightning arresters. IEEE, Janeiro, 1965.
- [6] SCHWARTZ, H. et al. Long-duration surge testing of lightning arresters. AIEE Transactions, Janeiro, 1951, V.70, p1487-1492.
- [7] NAIDU, S.R. Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Campina Grande, Ed. Grafiset/ELETRABRAS, 1985.
- [8] DOMMEL, H.W. Nonlinear and time-varying elements in

- digital simulation of eletromagnetic transients. Trans. IEEE, Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, p 2561-2567, nov/dez, 1971.
- [9] DIRECTOR, S.W. Circuitos Elétricos. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editôra S.A., 1980.
- [10] WELSBY, V.G. The theory and desing of inductance colls. London, Macdonald Ed., 1973.
- [11] STARK, P.A. Introdução aos Métodos Numéricos, Rio de Janeiro, Interciencia, 1979.
- [12] STARK, P.A. Análise Numérica: um curso moderno, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1973.
- [13] CONTE, S.D. Elemntos de Análise Numérica, Porto Alegre, Ed. Globo, 1977.
- [14] HEHL, M.E. Linguagem de Programação Estruturada: FORTRAN 77, São Paulo, McGraw Hill, 1986.
- [15] IEC TC 37 WG-4: Surge Arrester Part 3: Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems, February, 1984.
- [16] DOMMEL, H. W. Digital Computer solution of Eletromagnetic Transient In single and multiphase networks, Trans. IEEE, Power Apaparatus and Systems, Vol. PAS-8, pp388-399, 1969.