RESPOSTA DEGRAU DE UM DIVISOR
DE POTENCIAL CAPACITIVO

Por

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES

TESE DE MESTRADO

Apresentada à Coordenação Setorial de Pós-Graduação e Pesquisa da Pró-Reitoria para Assuntos do Interior da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para Obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Campina Grande, Fevereiro de 1982

N511r Neves, Washington Luiz Araujo
Resposta degrau de um divisor de potencial capacitivo / Washington Luiz Araujo Neves. - Campina Grande, 1982.
126 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Ciencias) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Medicao Eletrica 2. Divisor de Potencial Capacitivo 3. Dissertacao I. Naidu, S. R., Prof.. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 621.31(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente

a meus familiares,

pelo apoio e incentivo.

a S. R. Naidu,

pela valiosa orientação.

WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES

R E S U M O

O objetivo deste estudo foi simular a resposta degrau de um sistema de medição que utiliza o divisor de potencial capacitivo do Laboratório de Alta Tensão(LAT) da UFPb, e comparar os resultados com as medições da resposta degrau.

O arranjo em quadratura foi usado no posicionamento do cabo de alta tensão. Dois modelos foram utilizados para representar as capacitâncias parasitas do divisor de potencial. O primeiro foi sugerido pelo Grupo de Estudos IRR-IMS(International Research - Group Renardíeres on Impulse Measuring Systems) e o segundo pelo LAT da UFPb. A resposta degrau calculada pelos dois modelos foi comparada com a resposta degrau medida.

Há maior aproximação entre simulação e medição se forem também incluidas as perdas e as indutâncias residuais do divisor.

A B S T R A C T

The objective of this study was to simulate the step response of a measuring system which uses the capacitive voltage divider of the High Voltage Laboratory(HVL) of UFPb, and to compare the results with the measurement of the step response.

The square loop arrangement was used in positioning the high voltage lead. Two models were used to represent the stray capacitances of the potential divider. The first one was suggested by the IRR-IMS(International Research-Group Renardieres on Impulse Measuring Systems) and the second one was suggested by the HVL of UFPb. The step response calculated by the two models was compared to the measured step response.

There is a better aproximation between simulation and measurement if the losses and residual inductances of the divider were also included.

Í N D I C E

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O constante aumento das tensões nos sistemas de transmissão de energia elétrica é acompanhado do crescimento das dimensões dos equipamentos instalados em laboratórios de alta tensão. Geradores de impulso e divisores de potencial de estaturas elevadas são comumente encontrados em vários laboratórios. Erros provocados por sistemas de medição de tensão de impulso geralmente estão presentes durante o ensaio de equipamentos de potência. A resposta degrau de sistemas de medição é uma maneira de se avaliar estes erros.

A influência da resposta degrau na amplitude e fase de impulsos medidos em laboratório será discutida no Capítulo II. Ênfase é dada ao impulso de onda plena(impulso atmosférico padrão) e ao impulso de onda cortada nas proximidades do pico. O capítulo III descreverá o sistema de medição de tensão de impulso, assim como a introdução de erros gerados por alguns componentes desse sistema. Ainda neste capítulo serão apresentados alguns tipos de divisores de potencial. O capítulo IV apresentará dois modelos usados para a representação de divisores capacitivos. Estes modelos foram usados neste trabalho com o propósito de simular o sistema de medição do Laboratório de Alta Tensão, e conseguir a resposta degrau do sistema. O método de Dommel foi utilizado no cálculo de transitórios. O capítulo V apresentará e discutirá os resultados calculados. A conclusão deste trabalho será apresentada no capítulo VI.

CAPÍTULO II

RESPOSTA DEGRAU DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO

2.1. - Introdução

A utilização da resposta degrau unitário como método de avaliação das características dos sistemas de medição de tensão de impulso, vem crescendo nos últimos anos. A facilidade de montagem do circuito e obtenção da resposta, têm sido a causa do grande uso desse método. O valor de pico de tensões de impulsos de onda cortada e do tempo de frente de impulsos de ondas plenas, podem ser corrigidos se a resposta degrau do sistema for conhecida.

2.2. - A Resposta Degrau

A resposta degrau unitário de um sistema de medição de tensão de impulso, é a forma de onda da tensão de saída quando uma tensão degrau unitário é aplicada na entrada do sistema.

Utilizando a transformada de Laplace, podemos escrever:

$$G(s) = \frac{1}{s} H(s) \tag{2.1}$$

onde

$G(s)$ é a transformada de Laplace da resposta degrau unitário,

$\frac{1}{s}$ é a transformada de Laplace do degrau unitário,

$H(s)$ é a função de transferência do sistema.

Se aplicamos ao sistema de medição uma tensão $V_1(s)$, obtemos como resposta uma tensão de saída $V_2(s)$. As tensões de entrada e saída estão relacionadas de acordo com a equação:

$$V_2(s) = V_1(s) \, . \, H(s)$$

$$= V_1(s) \, . \, s \, . \, G(s) \tag{2.2}$$

A resposta degrau unitário contém implicitamente a função de transferência do sistema. Como podemos observar pela equa ção(2.2), a forma de onda de resposta nos dá informações sobre o comportamento do sistema de medição.

A figura 2.1 mostra um circuito utilizado para a medição da resposta degrau de um sistema. A tensão degrau é aplicada diretamente em um condutor que tem o mesmo diâmetro do cabo utilizado para ensaios de equipamentos de alta tensão. Este condutor liga o gerador ao terminal de entrada do divisor de tensão. Um plano de terra conecta o gerador degrau à base do divisor. Um cabo coaxial liga a base do divisor ao osciloscópio. A resposta do degrau aplicado no cabo de alta tensão é vista na tela do osciloscópio. Erros associados com os componentes do sistema distorcem a forma de onda de resposta. A avaliação dos erros cometidos durante a medição de tensões de impulso é feita a partir de alguns parâmetros: o tempo de resposta, tempo parcial de resposta e o tempo padrão de subida da tensão de impulso.

2.2.1. - Tempo de Resposta

O tempo de resposta de um sistema nos fornece informações sobre o tempo de atraso e erros na medição de impulsos linearmente crescentes, cortados nas proximidades do pico. Se o tempo de resposta é conhecido, temos possibilidades de corrigir o valor de pico da tensão medida. O tempo de resposta é definido como a área entre o degrau unitário e a resposta degrau normalizada |2|. De acordo com a figura 2.2, temos:

$$T_{res} = \int_0^\infty [1 - h(t)]dt = T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + \ldots \qquad (2.3)$$

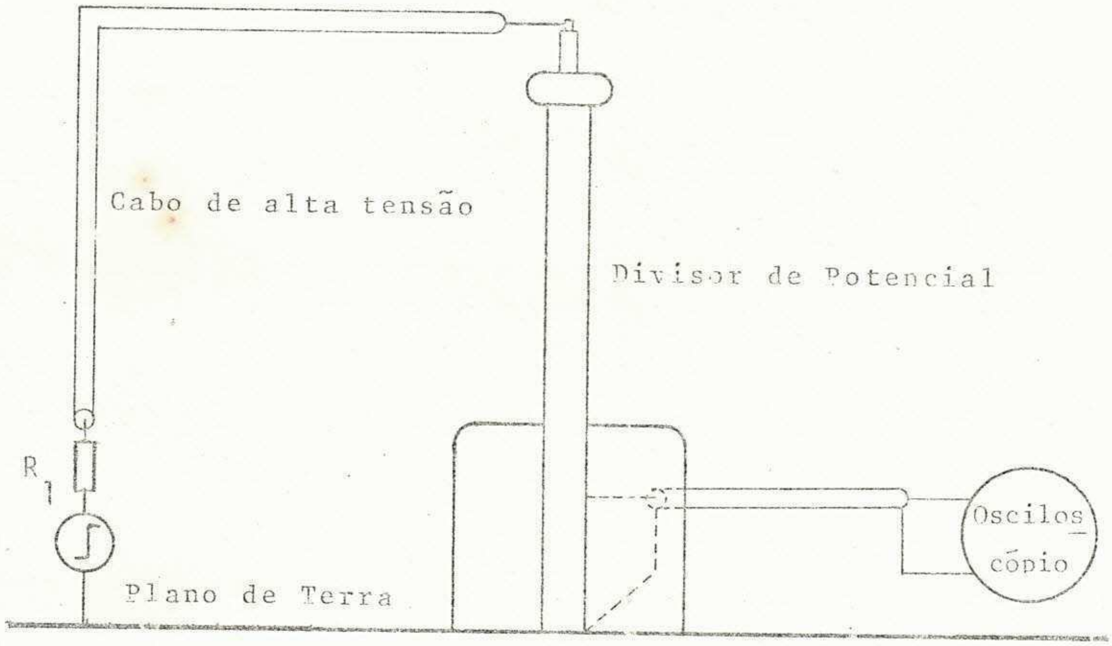


Figura 2.1 - Medição da resposta degrau

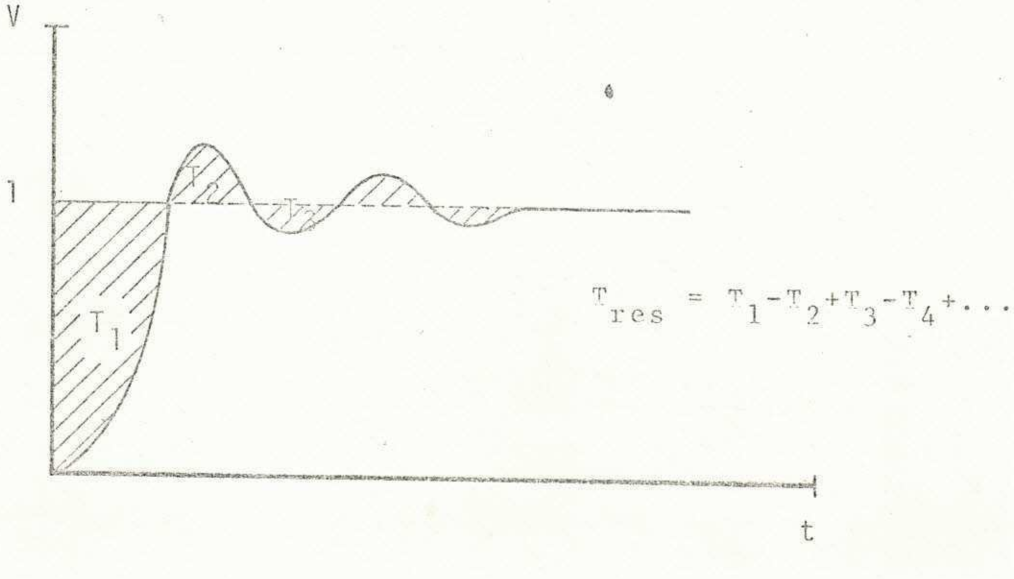


Figura 2.2 - Definição de Tempo de Resposta

onde

T_{res} é o tempo de resposta do sistema de medição,

h(t) é a resposta degrau normalizada.

Avaliemos o tempo de resposta para dois casos hipotéticos. Suponha que um sistema de medição apresente a seguinte resposta degrau normalizada:

$$h(t) = 1 - e^{-t/T}$$

Um divisor puramente resistivo pode apresentar esta forma de onda como resposta. O tempo de resposta deste sistema será:

$$T_{res} = \int_o^\infty \left[1 - h(t)\right] dt$$

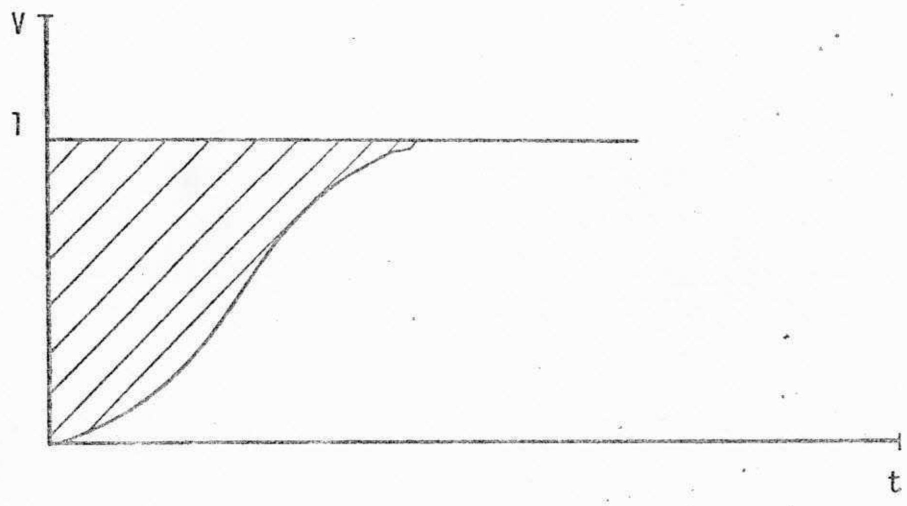
$$T_{res} = \int_o^\infty e^{-t/T} \, dt = T \tag{2.4}$$

Para este caso o tempo de resposta é igual a própria constante de tempo do sistema de medição.

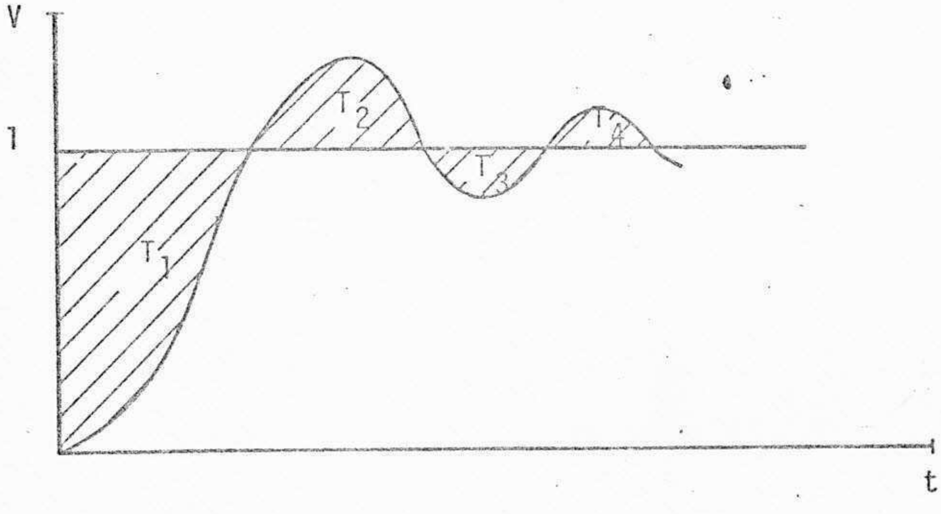
Suponha agora que um segundo sistema de medição tenha a seguinte resposta degrau normalizada:

$$h(t) = 1 - e^{-\alpha t} \left(\cos wt + \frac{\alpha}{t} \operatorname{sen} wt \right) \tag{2.5}$$

Um divisor puramente capacitivo com uma resistência de amortecimento no topo, pode apresentar esta forma de onda como respos-



a) Divisor puramente resistivo.



b) Divisor puramente capacitivo

Figura 2.3 - Resposta degrau de divisores de tensão de impulso ta. Os termos coswt e senwt da equação (2.5), aparecem devido a oscilações produzidas pela indutância do cabo(que liga o gerador degrau ao divisor de potencial)e a capacitância interna do divisor. As constantes 'α' e 'w' são características do sistema de medição e têm dimensões de seg^{-1}. O tempo de resposta deste sistema, será:

$$T_{res} = \int_0^{\infty} [1 - h(t)]\, dt$$

$$= \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} \left(\cos wt + \frac{\alpha}{w} \operatorname{sen} wt \right) dt$$

$$= \frac{2\alpha}{w^2 + \alpha^2} \text{ segundos} \qquad (2.6)$$

A figura 2.3 mostra as formas de onda normalizadas dos sistemas descritos acima.

Vejamos agora como o tempo de resposta influencia na magnitude e atraso da tensão medida. Suponha por exemplo, que a tensão de entrada de um circuito de medição cresça linearmente com o tempo, e que a sua taxa de crescimento seja $S = 1$ (figura 2.4a).Depois de um tempo tb, em que o sistema tenha atingido o regime permanente, a diferença entre as amplitudes das formas de onda de entrada e saída será sempre constante e igual ao tempo de resposta do sistema. A tensão medida estará deslocada de T_{res} em relação à tensão aplicada. Se a inclinação da tensão aplicada for S, a diferença entre as amplitudes das tensões de entrada e saída, depois de um tempo tb, será $S \cdot T_{res}$. Conseqüen temente, quanto maior S, maior será a diferença entre os valores da tensão aplicada e medida. A tensão medida estará deslocada apenas de T_{res} em relação à tensão aplicada.

Analisemos agora o caso de impulsos de ondas linearmente crescentes, cortadas nas proximidades do pico. Suponha que a tensão do exemplo anterior seja abruptamente cortada após um tempo tbc. A figura 2.4b ilustra esta situação. A diferença entre o tempo de corte real e o tempo de corte medido, é igual ao tempo de resposta do sistema. A correção do valor de pico do impulso medido pode ser feita facilmente se conhecemos o tempo de resposta do sistema. De acordo com a figura 2.4b a diferença entre os valores de pico da tensão aplicada e medida pode ser calculada pela expressão:

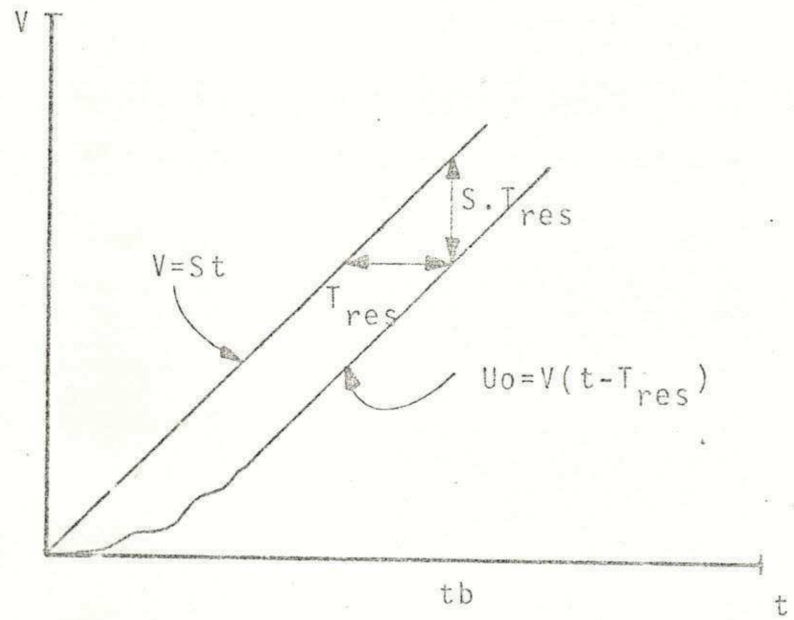
$$U_o - U_{oc} = S \cdot T_{res} \qquad (2.7)$$

onde

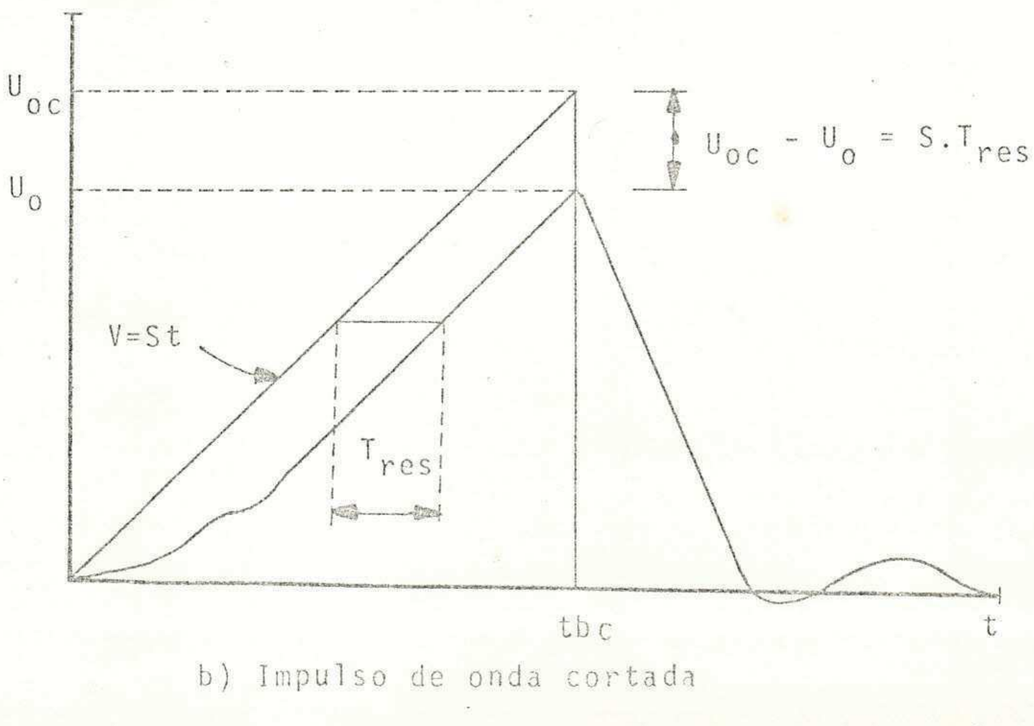
U_o é a tensão de corte medida,

U_{oc} é a tensão de corte aplicada.

As normas internacionais IEC |1|,|2|,|3| especificam que o erro na medição do valor de pico de impulsos de ondas plenas e impulsos de ondas cortadas nas proximidades de pico, não deve exceder 3%. As normas também especificam que o tempo de resposta de um sistema utilizado para medição do impulso atmos-



a) Impulso linearmente crescente



b) Impulso de onda cortada

Figura 2.4 - Influência do tempo de resposta na magnitude e atraso da tensão medida férico padrão(1.2/50μs) não deve exceder ±0.2μs.

2.2.2. - Tempo Parcial de Resposta

A forma de onda de impulso medida em laboratório pode apresentar oscilações sobrepostas. O tempo parcial de resposta está relacionado com a taxa de crescimento da resposta degrau, e é uma indicação da eficiência com que essas oscilações são reproduzidas no instrumento de medição. O tempo parcial de resposta é definido como a área entre a função degrau unitário e a resposta degrau normalizada até o primeiro instante em que a curva de resposta corta a amplitude unitária |3|. De acordo com a figura 2.1, T_1 é o tempo parcial de resposta. T_1 é inversamente proporcional à máxima freqüência de oscilação que pode aparecer sobre o objeto de teste ou no terminal de entrada do circuito de medição. O tempo parcial de resposta deve satisfazer a seguinte condição:

$$T_1 \leq \frac{2}{\pi \cdot f_{max}} \ \mu s \tag{2.8}$$

$$f_{max} = \frac{c}{4(Hg + Hc)} \tag{2.9}$$

onde

fmax = máxima freqüência de oscilação, Mhz

Hg = altura do gerador de impulso, m

Hc = altura do capacitor de frente, m

c = velocidade de uma onda eletromagnética, no vácuo.

c = 300 m / μs

Para um gerador de impulso e um capacitor de frente, ambos com 2.5m de altura, fmax = 15 Mhz e $T_1 \leq 0.04\ \mu s$. Em ensaios de laboratório em que o gerador de impulso e o capacitor de frente tenham pequenas dimensões, fmax será grande e conseqüentemente o tempo parcial de resposta deverá ser pequeno. Em outras palavras, as oscilações na forma de onda de impulso se tornam mais críticas à medida que as dimensões dos equipamentos de geração e medição vão crescendo.

As normas IEC |1| especificam que a amplitude das oscilações sobrepostas não deve exceder 5% do valor de pico do impulso medido. A relação entre as amplitudes real e medida, dessas oscilações, é dada por:

$$\alpha = \sqrt{1 + (2\pi f T_1)^2}$$

onde f é a freqüência da oscilação.

2.2.3. - Tempo Padrão de Subida da Tensão de Impulso

O tempo de subida da tensão de impulso nos fornece informações sobre erros na medição do tempo de frente de impulsos de ondas plenas. O tempo padrão de subida T_s, é definido matematicamente |4| por:

$$T_s = \sqrt{\int_0^\infty t^2 h'(t)dt - T_{res}^2} = \sqrt{2\int_0^\infty t[1-h(t)]dt - T_{res}^2} \qquad (2.10)$$

Suponha que um impulso de onda plena seja aplicado sobre um objeto de teste(figura 2.5). O erro na medição do valor de pico do impulso não é claramente determinado. O atraso da curva medida em relação à aplicada proporciona erros na medição dos tempos de frente e cauda do impulso em questão. O maior erro entretanto, ocorre na medição do tempo de frente. Para impulsos atmosféricos que não apresentem oscilações na frente de onda e que sejam considerados aceitos para testes de equipamentos, o tempo de frente (definido por IEC |1|como 1.67 vezes o intervalo de tempo que a tensão de impulso leva ao percorrer de 30 a 90% do seu valor de pico) é aproximadamente proporcional ao tempo padrão de subida da tensão medida:

$$T_f = 3,2\ T_s \qquad (2.11)$$

Com a resposta degrau unitário e a equação(2.10) podemos estimar o erro na medição do tempo de frente de impulso de ondas plenas. Simulação por computadores* |4| tem mostrado que erros no tempo de frente sempre são menores para impulsos com pequeno amortecimento na cauda(tempo de cauda longo).

Conhecendo-se a resposta degrau de um sistema de medição de tensão de impulso, podemos determinar o tempo de resposta, o tempo parcial de resposta, tempo padrão de subida da tensão de impulso, e evidentemente ter uma estimativa da tensão aplicada no objeto de teste. Este trabalho tem como finalidade simular por computador e medir em laboratório a resposta degrau de um divisor puramente capacitivo.

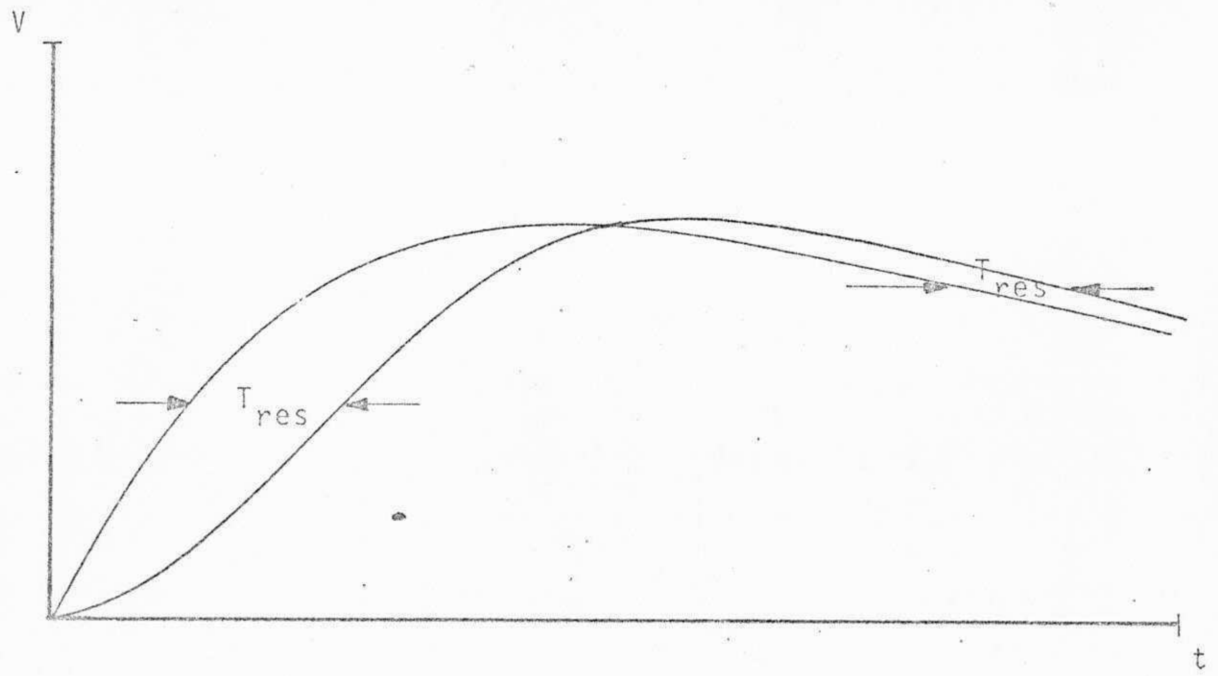


Figura 2.5 - Impulso de onda plena

CAPÍTULO III

MEDIÇÃO DA RESPOSTA DEGRAU

3.1. - Introdução

Um sistema de medição de tensão de impulso normalmente consiste de cinco componentes - um divisor de tensão, um osciloscópio, um cabo coaxial que interliga os dois, um cabo de alta tensão que conecta o terminal de alta tensão do objeto de teste ao divisor de potencial, e um cabo ou plano de terra que conecta a parte aterrada do objeto de teste à base do divisor de potencial. Adicionalmente, resistores de amortecimento podem ser colocados nas extremidades do cabo de alta tensão. Ao aplicarmos uma tensão entre os dois pontos extremos do objeto de teste, obtemos na tela do osciloscópio uma forma de onda tensão X tempo. Esta curva não representa uma imagem perfeita da tensão aplicada no objeto de teste. Vários fatores contribuem para a geração de distorções nesta forma de onda. Antigamente o estudo dessas distorções era feito através da análise de um ou mais componentes do sistema, ao invés do sistema completo. A resposta degrau vem mudando este procedimento, e hoje é aceito que a resposta degrau de um sistema de medição deve ser conhecida, pelo menos na medição de impulsos com tempos de frente muito curtos.

3.2. - Sistema de Medição

Qualquer sistema que seja utilizado para medições precisas de tensão de impulso, deve apresentar as seguintes características:

a) O divisor de potencial deve ter alta impedância.

b) Com relação à resposta em freqüência, o sistema de medição deve ter uma grande largura de faixa, que vai de zero até a mais alta freqüência possível.

A medição da resposta degrau de um sistema, pode ser feita utilizando o circuito da figura 3.1. Seus componentes (gerador degrau, cabo de alta tensão, divisor de tensão, cabo coaxial e osciloscópio) já são conhecidos do capítulo anterior. Resistores de amortecimento R_1 e R_2 são colocados nas extremidades do cabo de alta tensão. O comprimento do cabo e sua posição (de acordo com a figura 3.1 o cabo está em quadratura) devem ser estabelecidos. O divisor mostrado na figura é puramente capacitivo, portanto é inserida na saída do divisor, uma resistência ohmica de

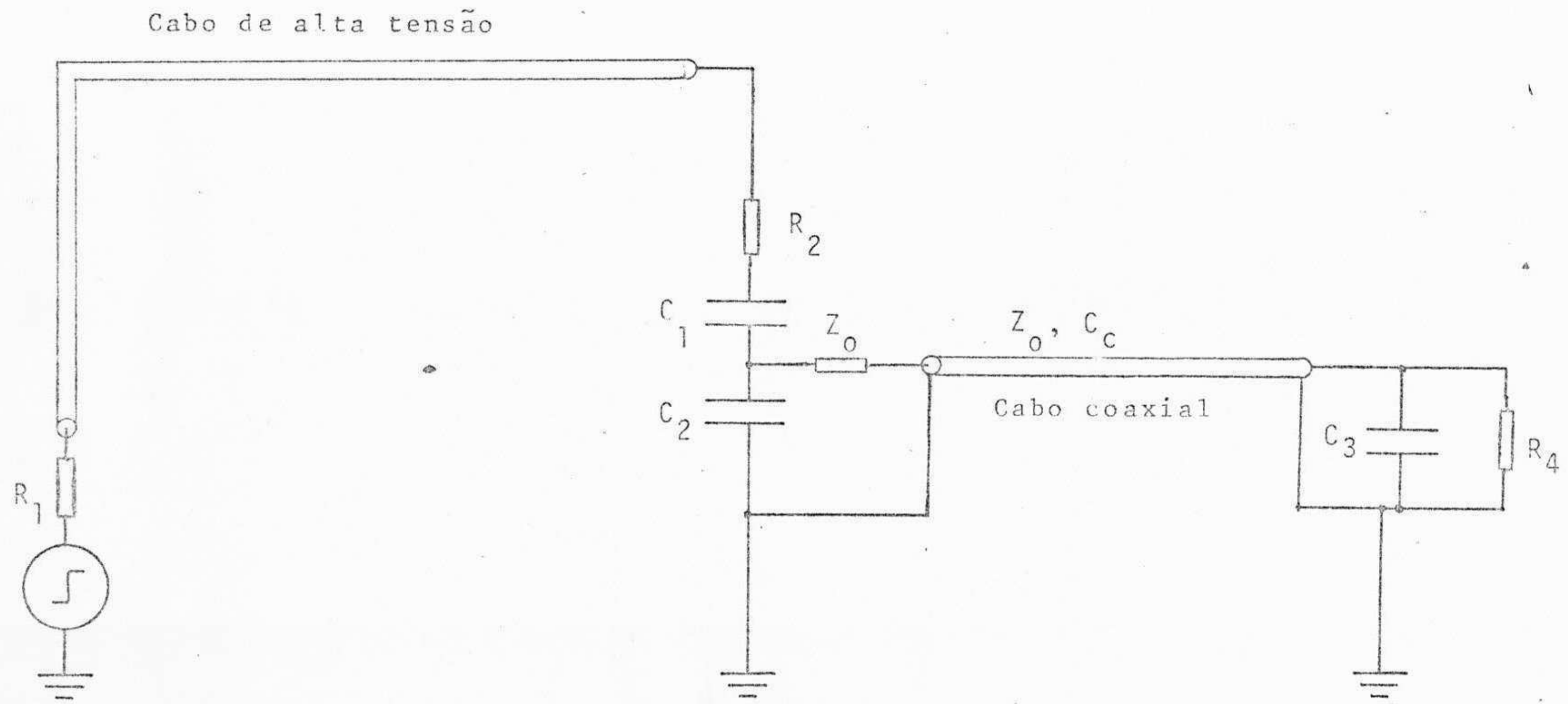


Figura 3.1 - Circuito utilizado para a medição da resposta degrau de um sistema

mesmo valor da impedância de surto do cabo coaxial.

A seguir descreveremos cada componente do circuito separadamente, e destacaremos suas contribuições para a forma de onda da tensão de saída.

3.2.1. - Gerador Degrau

O gerador degrau deve ter uma impedância zero enquanto gera o degrau e durante todo o processo de medição. Impedância zero pode ser conseguida se tivermos uma chave de alta velocidade que curto circuite os terminais de entrada do gerador. A tensão degrau é gerada aplicando-se uma tensão contínua entre os terminais da chave, através de um resistor, e em seguida fechando-a. Uma das maneiras de se conseguir um degrau de tensão, é aplicar pulsos retangulares na entrada do sistema de medição. A largura de pulso deve ser bem maior do que o tempo que o sistema leva para atingir o regime permanente.

Um dos melhores geradores de pulsos conseguidos até hoje, apresenta aproximadamente a configuração mostrada na figura 3.2. Este gerador produz um degrau negativo(melhor forma de conseguir um gerador com impedância nula). O relé apresentado no circuito tem características especiais. Contatos comuns normalmente causam vibrações(saltos de contatos) no momento de chaveamento. As vibrações tornam-se mais significantes à medida que o tempo de chaveamento diminui. No entanto, contatos umedecidos com mercúrio evitam essas vibrações. Com este tipo de relé, ob-

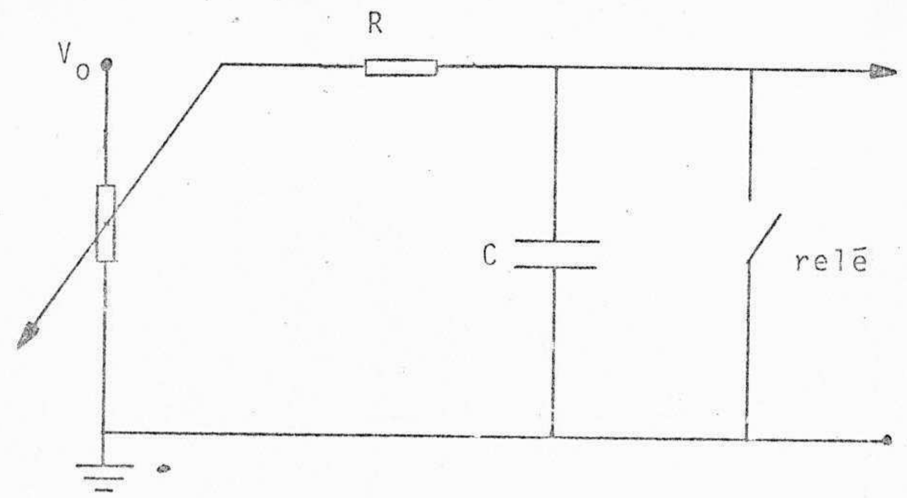


Figura 3.2 - Circuito para geração do degrau de tensão

teremos um gerador com impedância bem próxima de zero.

3.2.2. - Cabo de Alta Tensão

Os cabos de alta tensão utilizados em laboratório, geralmente apresentam três tipos de configurações:

a) Arranjo em quadratura(figura 3.3)

b) Arranjo horizontal (figura 3.4)

c) Arranjo vertical (figura 3.5)

A configuração do sistema de medição influencia na amplitude e duração de tensões induzidas na resposta degrau. Tensões induzidas são causadas por radiações eletromagnéticas emitidas a partir da geração do degrau e durante o trânsito de ondas viajantes no cabo de alta tensão. O arranjo em quadratura apresenta maior incidência de tensões induzidas, ao passo que o arranjo vertical apresenta menor incidência |5|.

Se aplicarmos uma tensão degrau diretamente na entrada do cabo vertical do arranjo em quadratura, teremos uma onda de corrente percorrendo o cabo. Como, nos primeiros instantes após a aplicação da tensão, a freqüência é muito elevada, haverá emissão de radiação eletromagnética em todas as direções. A onda de corrente sobre o cabo, alcançará o divisor de tensão instantes depois da radiação o ter alcançado. Embora as velocidades de propagação da onda no cabo e da radiação no ar sejam as mesmas, o caminho percorrido pela radiação eletromagnética é me

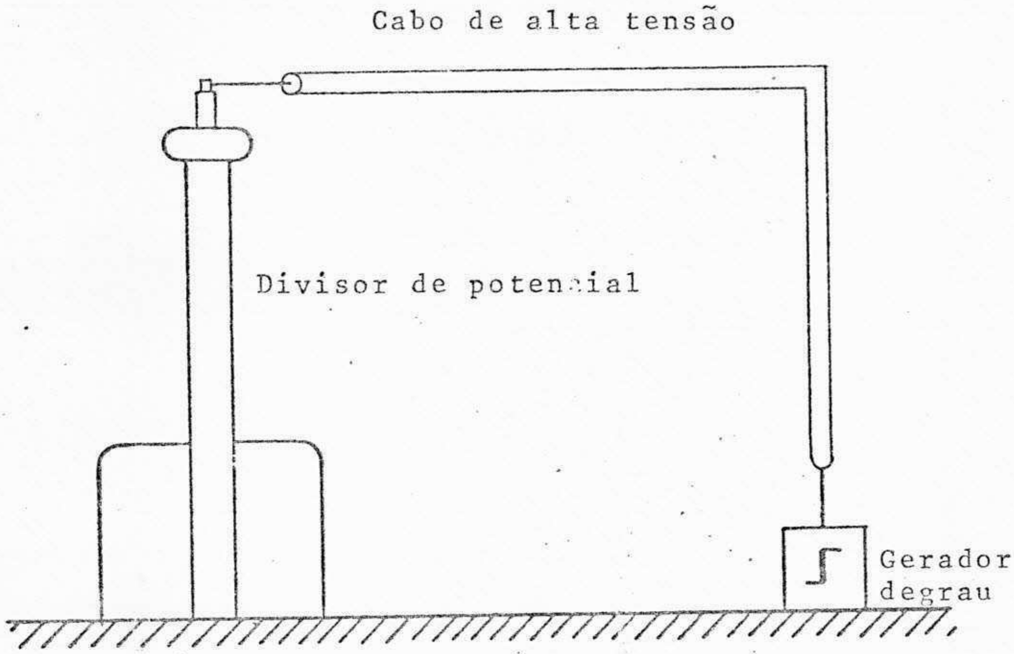


Figura 3.3 - Arranjo em quadratura

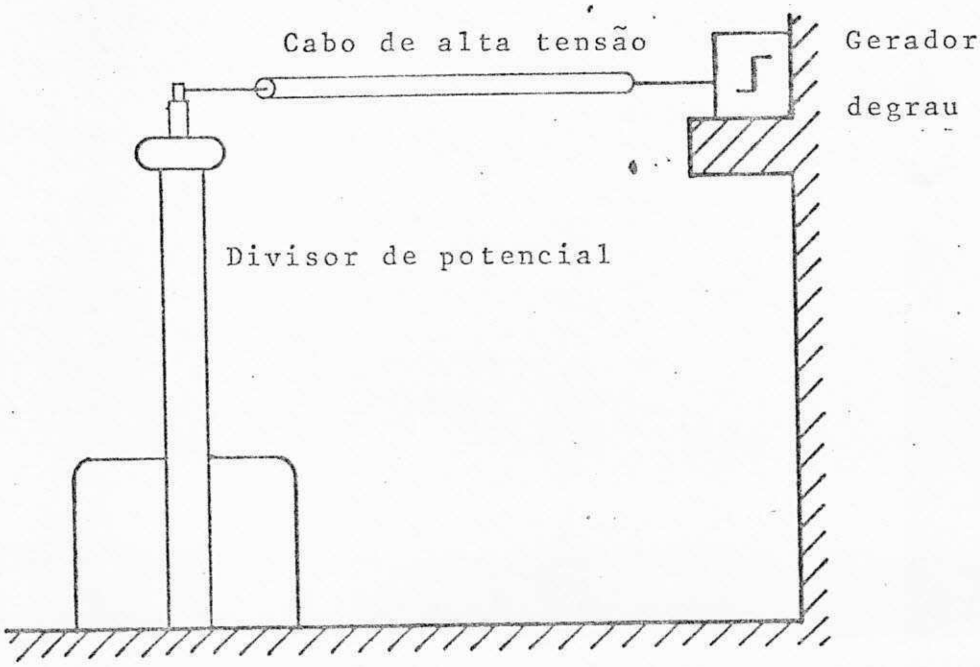


Figura 3.4 - Arranjo horizontal

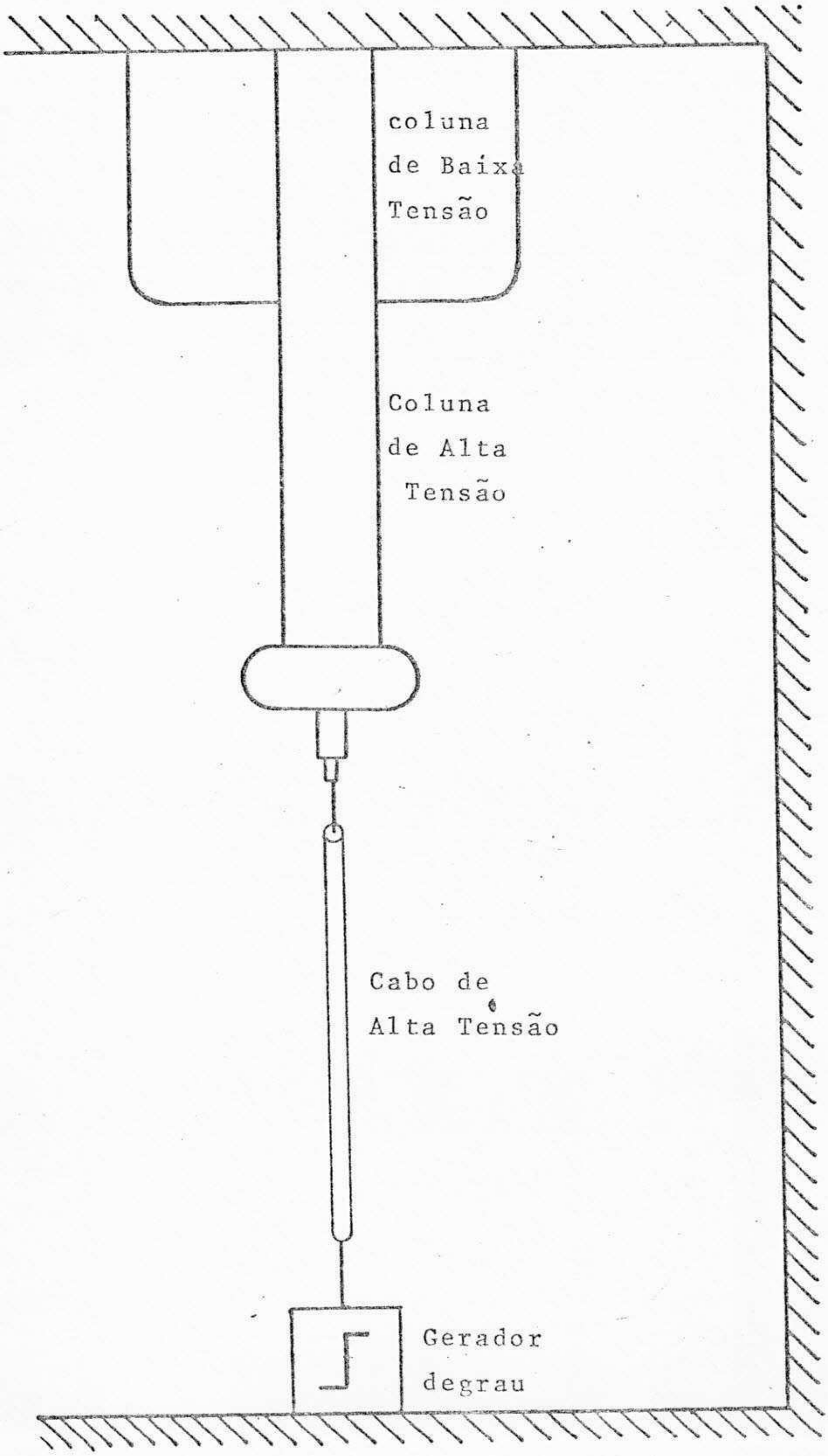


Figura 3.5 - Arranjo vertical

nor que o caminho percorrido pela corrente no cabo(ver figura 3.6). O campo de radiação alcançará as diversas partes expostas do divisor de tensão em diferentes instantes de tempo, dependendo dos pontos emissor e receptor da radiação. Haverá indução de tensões nos pontos vulneráveis do divisor, gerando oscilações nos primeiros momentos da forma de onda de resposta.

No arranjo vertical, a onda de corrente guiada pelo cabo alcança o divisor de tensão ao mesmo tempo que sua radiação eletromagnética correspondente. Porém a radiação eletromagnética no ar, alcança a coluna de baixa tensão antes da onda de corrente que percorre o interior do divisor. Como resultado, temos tensões induzidas na coluna de baixa tensão antes da chegada da onda de corrente.

No arranjo horizontal haverá apenas tensões induzidas na coluna de baixa tensão. Estas tensões são geradas pela radiação emitida por diferentes pontos do cabo de alta tensão. A onda guiada pelo cabo horizontal alcança o terminal de alta tensão do divisor no mesmo instante que a radiação eletromagnética correspondente. Ao percorrer o divisor de tensão, a onda de corrente em seu interior é mais lenta que a onda eletromagnética no ar. A onda eletromagnética no ar induz uma tensão na base do divisor. Uma blindagem envolvendo a coluna de baixa tensão reduz bastante as oscilações geradas por radiações eletromagnéticas.

Um fator importante que deve ser analisado na escolha das configurações dos sistemas de medição de resposta de-

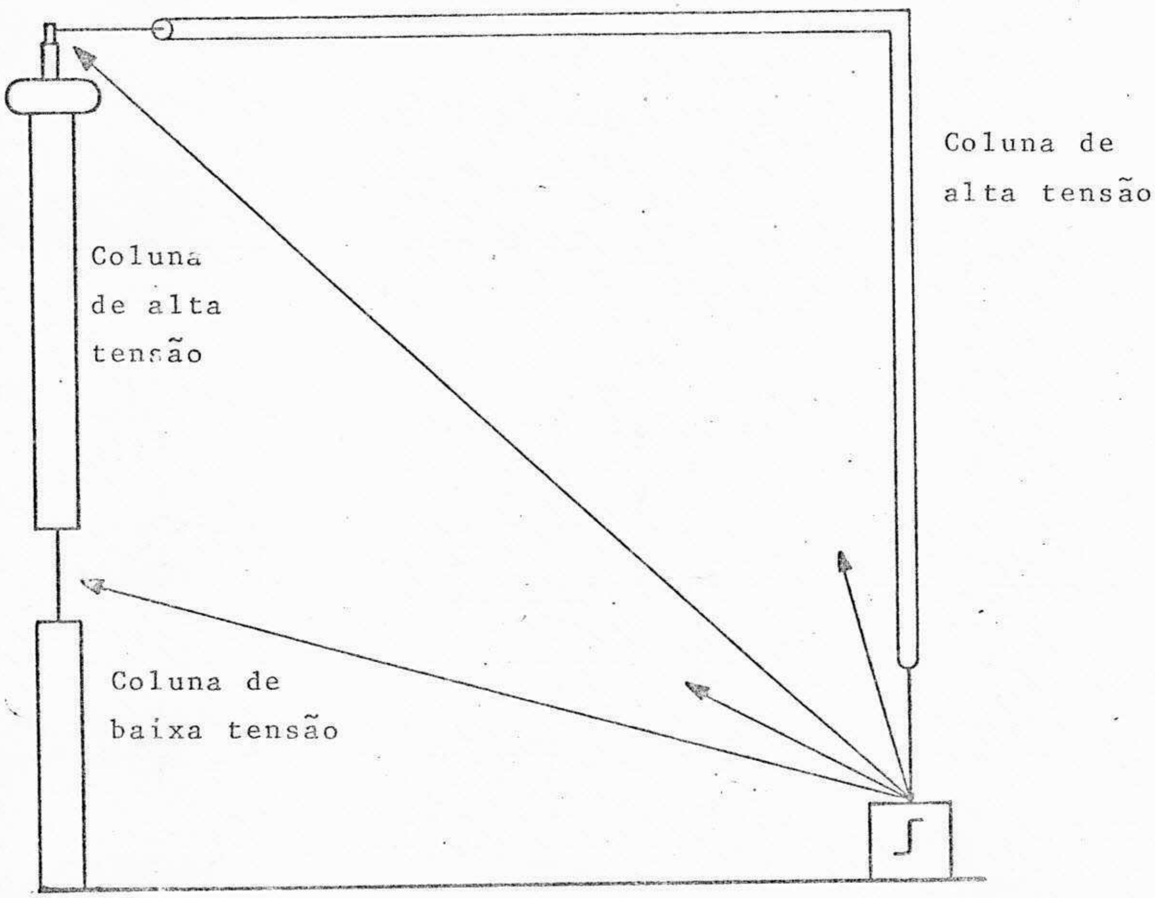


Figura 3.6 - Indução de tensão devido a radiações eletromagnéticas

grau, é a impedância de surto do cabo de alta tensão. Nos arranjos vertical e em quadratura, a impedância de surto do cabo vertical varia continuamente, sendo menor no ponto de conexão do cabo com o gerador degrau. Schatz e Williams |6| estudaram o período transitório em linhas de transmissão cuja impedância de surto varia ao longo de seu comprimento. Eles concluiram que o degrau unitário apresenta um pico(overshoot) ao percorrer o cabo vertical. Logo, o cabo vertical introduz um tempo de resposta negativo no sistema de medição. No arranjo horizontal a impedância de surto do cabo de alta tensão é constante, evitando então a contribuição do tempo de resposta negativo na forma de onda de resposta.

O tipo de arranjo empregado para a obtenção de uma melhor precisão na medição da resposta degrau, dependerá das condições de blindagem e aterramento da sala onde é feita a medição. Se a sala de ensaio apresentar uma boa blindagem e um bom aterramento das paredes, o arranjo horizontal sem dúvida deve ser empregado(Neste arranjo o cabo horizontal está na mesma posição em que são realizados ensaios com tensão de impulso). Caso estas condições não sejam satisfeitas, normalmente é utilizada a configuração em quadratura.

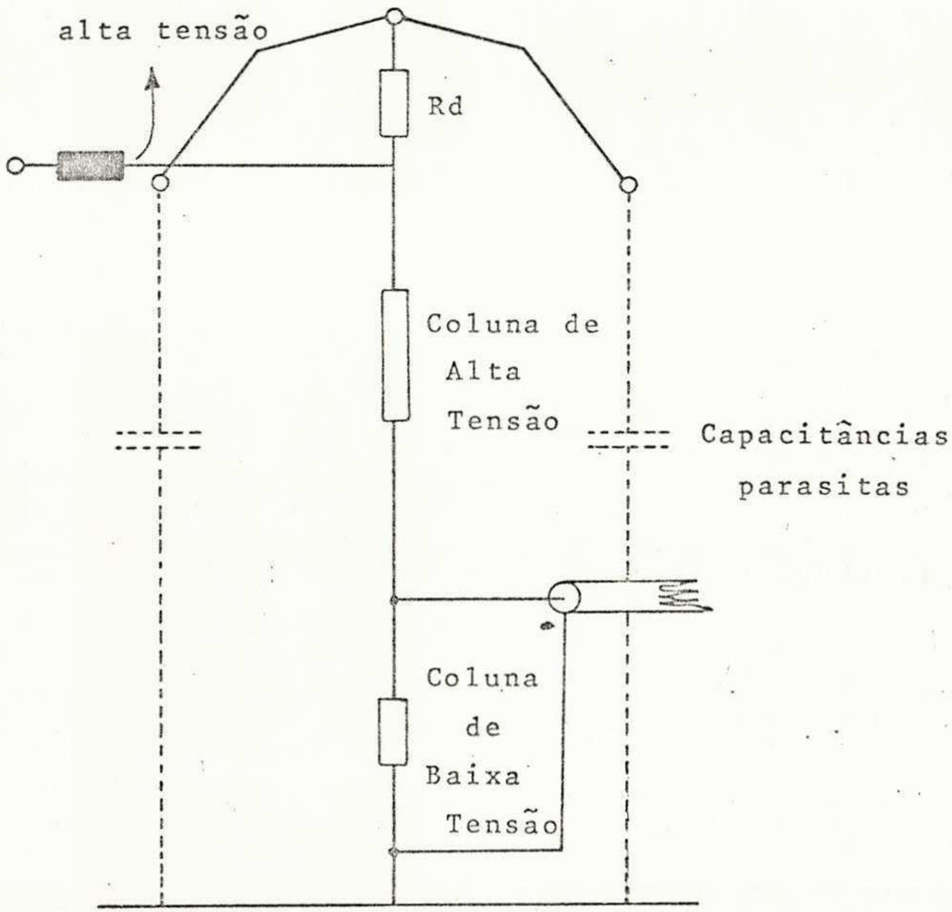
3.2.3. - Divisor de Tensão

Um divisor de tensão utilizado para a medição de tensão de impulso, geralmente possui grandes dimensões. Seus parâme tros são distribuidos. Indutâncias residuais e capacitâncias parasitas afetam a medição da tensão aplicada no objeto de teste.

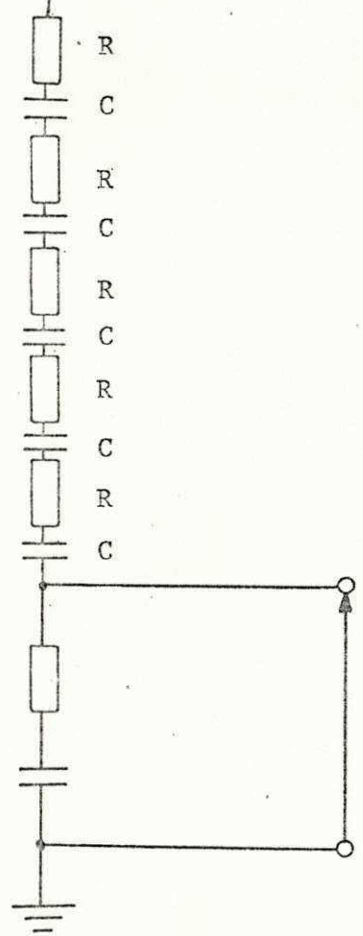
Em divisores resistivos, as capacitâncias parasitas influenciam diretamente na medição da tensão durante o período transitório. As indutâncias residuais da coluna de alta tensão associadas às capacitâncias distribuidas para a terra, produzem oscilações. Em altas freqüências o fator de escala do divisor é dependente da freqüência. O efeito das capacitâncias parasitas pode ser reduzido, construindo-se a coluna de alta tensão do divisor com a menor resistência possível, sem contudo alterar a corrente de carga do gerador de impulso.

Com o objetivo de diminuir o efeito das capacitâncias parasitas, desenvolveu-se pesquisas utilizando divisores controlados (figura 3.7a). Para forçar a uniformização do campo elétrico nas imediações da coluna resistiva, foi utilizado um aro de blindagem em forma de cone no topo do divisor. Oscilações foram produzidas pela indutância do cabo de alta tensão e as capacitâncias parasitas. Para reduzir estas oscilações foi introduzido um resistor de amortecimento R_d, entre o divisor e o aro de blindagem. Estes divisores geralmente têm pequeno tempo de resposta e são muito bons para a medição de impulsos rápidos.

Elsner |7| estudou o efeito da distribuição de capacitâncias parasitas em divisores resistivos e, segundo ele, a influência destas capacitâncias pode ser eliminada se capaci-



a) Divisor resistivo controlado



b) Divisor capacitivo amortecido

Figura 3.7

tâncias adicionais forem colocadas em paralelo com elas. Elsner também mostrou que a relação entre as capacitâncias adicionais e as parasitas deve ser tal que Ca/Cp>3 para que não tenhamos distorções na forma de onda medida. Capacitâncias adicionais nas proximidades de 300 picofarad são geralmente usadas na coluna de alta tensão do divisor. Capacitâncias maiores aumentam a corrente de carga do gerador, introduzindo maiores erros na medição de tensão de impulso. As constantes de tempo das colunas de alta e baixa tensão devem ser iguais, havendo a necessidade da adição de capacitâncias da ordem de microfarad em paralelo com a resistência de baixa tensão.

Divisores puramente capacitivos consistem de vários capacitores de capacitâncias relativamente grandes na coluna de alta tensão. Indutâncias residuais e capacitâncias parasitas também estão presentes no divisor de tensão. As capacitâncias parasitas afetam o fator de escala do divisor. Nestes divisores, a capacitância de alta tensão deve ser bastante grande para minimizar o efeito das capacitâncias parasitas, sem contudo contribuir para o aumento da corrente de carga do gerador. A coluna de alta tensão do divisor capacitivo, se comporta como uma linha de transmissão sem perdas. Reflexões sucessivas no início e final da coluna de alta tensão provocam oscilações na forma de onda resposta. A freqüência destas oscilações é da ordem de alguns megahertz e depende do tempo de trânsito da onda viajante no interior do divisor, ou seja

$$f = \frac{1}{2\zeta}$$

onde ζ é o tempo de trânsito da onda viajante no divisor.

Zaengl |7| desenvolveu o divisor capacitivo amortecido. Ele consiste de resistores e capacitores distribuidos ao longo do divisor(figura 3.7b).Este divisor se comporta como um divisor puramente capacitivo em baixas freqüências, e como um divisor puramente resistivo em altas freqüências. Este divisor geralmente possui um pequeno tempo de resposta e é muito utilizado na medição de impulsos com pequenos tempos de frente.

3.2.4. - Circuito de Medição

O circuito de medição de tensão de impulso consiste de um cabo coaxial e de um osciloscópio. No cabo coaxial, as indutâncias e capacitâncias parasitas são mínimas devido à blindagem aterrada na face externa do cabo. Medições com boa precisão podem ser feitas por cabos pequenos(aproximadamente 20 metros).O osciloscópio possui uma alta impedância de entrada, e normalmente apresenta grande largura de faixa de freqüências, fazendo com que o sinal transmitido pelo cabo coaxial seja medido em sua integridade.

3.3. - Comportamento do Sistema de Medição

Consideremos o circuito da figura 3.1(com $R_1 = 0$). O efeito do plano de terra(que liga a base do divisor de tensão ao gerador degrau) pode ser desprezado face à sua pequena impedância. O cabo de alta tensão se comporta como uma linha de transmissão. Quando um degrau de tensão é aplicado na entrada do cabo de alta tensão, uma onda de tensão viaja ao longo do cabo em direção ao terminal onde se encontra o resistor de amortecimento(R_2) e o divisor de tensão. A forma de onda da tensão muda ao percorrer o cabo devido à variação da impedância de surto do cabo vertical. Quando a onda de tensão encontra o terminal do divisor, é refletida de volta ao gerador. A tensão no terminal do divisor é então a soma das ondas incidentes e refletida. A onda refletida ao alcançar o gerador degrau, é refletida de volta ao terminal do divisor de tensão. O processo se repete até que a amplitude da onda refletida seja desprezível. A tensão no terminal do divisor é pois, a soma da onda incidente e de todas as ondas refletidas, levando-se em consideração o tempo necessário para cada reflexão, que é igual a duas vezes o tempo de trânsito da onda do cabo. As reflexões citadas contribuirão para o tempo de resposta do sistema.

Creed e Collins |6| mostraram que se introduzirmos um resistor de amortecimento entre o gerador degrau e o cabo, as oscilações serão diminuidas. Se o resistor de amortecimento tiver o mesmo valor ohmico da impedância de surto do cabo, as oscilações desaparecerão completamente no ponto situado entre o cabo e a resistência de amortecimento. Mas, durante a realização de ensaios com tensão de impulso, a impedância do objeto de teste em paralelo com a impedância do gerador de impulso provavelmente não será igual à impedância de surto do cabo, tendo como resultado oscilações inevitáveis. O tempo necessário para a resposta atingir o seu estado permanente é função destas oscilações, e portanto, da impedância de fonte.

Alguns fenômenos em alta tensão afetam a resposta de um sistema de medição. Erros não lineares causados por corona e outros parâmetros dependentes da tensão e freqüência afetam a curva medida. Se o cabo de alta tensão do divisor estiver operando acima do nível corona, o tempo de resposta do sistema crescerá |6|. Este acréscimo provavelmente será função do comprimento do cabo, de sobretensões e da taxa de crescimento da tensão com o tempo. Infelizmente a resposta degrau não nos dá informações a respeito deste fenômeno.

CAPÍTULO IV

CÁLCULO DA RESPOSTA DEGRAU DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO

4.1. - Introdução

A pré-determinação da resposta degrau de um sistema de medição de tensão de impulso é muito importante na fase de projeto de divisores de tensão. Com o emprego de computadores, a modificação dos parâmetros do sistema pode ser estudada em espaços de tempo muito curtos. Algumas dificuldades têm sido encontradas em relação à simulação dos componentes do circuito por elementos de circuito elétrico equivalentes. Contudo, as maiores dificuldades estão na simulação do divisor de tensão, especialmente a simulação dos efeitos parasitas, capacitâncias, indutâncias e perdas no interior do divisor. Dois modelos que podem ser usados para a representação de divisores capacitivos serão abordados neste capítulo.

4.2. - Modelagem

Os modelos que representam as diversas partes do circuito de medição de tensão de impulso, são escolhidos de maneira que facilite o cálculo computacional da resposta degrau. Técnicas de modelagem do cabo vertical e do divisor de tensão serão apresentadas a seguir.

4.2.1. - Cabo Vertical

O cabo da figura 4.1. pode ser representado por várias linhas de transmissão acopladas, de impedâncias de surto diferentes. Na figura 4.2 o cabo vertical foi dividido em várias partes cujas impedâncias de surto são $z_1, z_2, z_3, z_4 \ldots z_n$ |5|. Essas impedâncias crescem no sentido vertical, de baixo para cima. As impedâncias de surto podem ser calculadas de acordo com suas alturas médias, pela expressão:

$$z_i = 60 \,.\, \ln (2h_i/r)$$

onde,

h_i é a altura média da linha de transmissão correspondente à impedância de surto de mesmo índice,

r é o raio do cabo vertical.

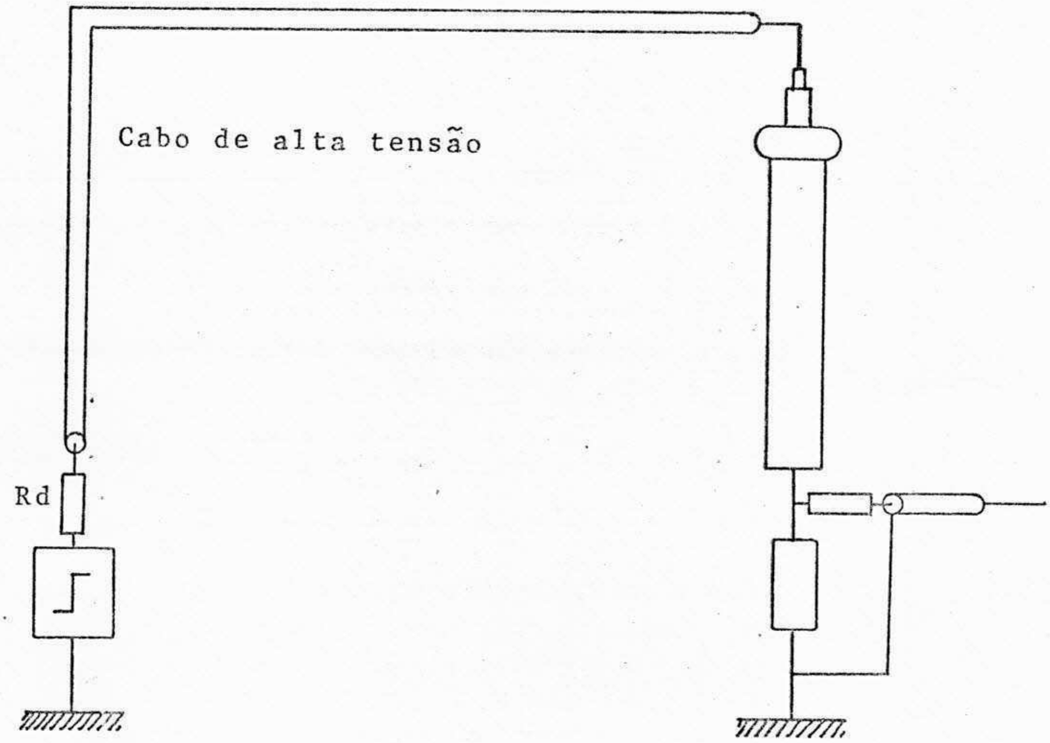


Figura 4.1. - Malha de alta tensão de um divisor capacitivo

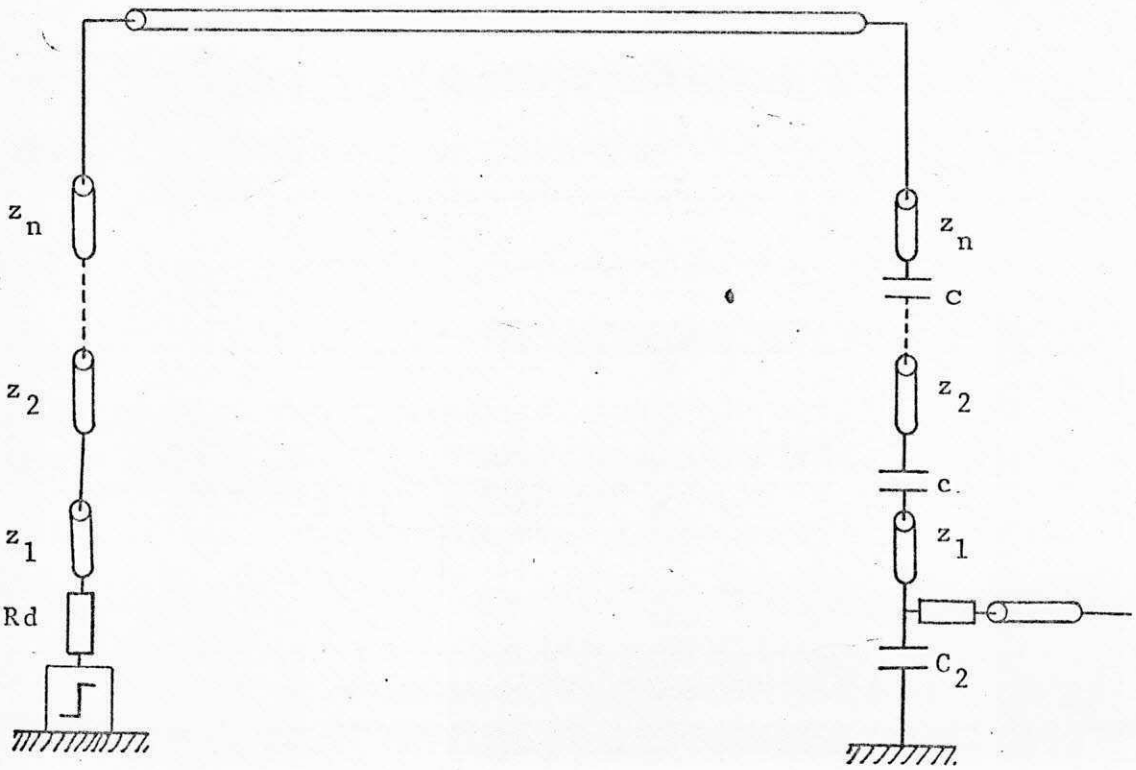


Figura 4.2. - Modelagem do cabo vertical e divisor de tensão

Com este modelo, podemos simular o cabo vertical baseado no estudo de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão monofásicas. Na realização dos cálculos computacionais quanto maior for o número de partes em que o cabo vertical for dividido, maior será a precisão do método.

4.2.2. - Divisor de Tensão

Apresentaremos dois modelos utilizados para a representação de divisores capacitivos. Estes modelos foram apresentados pela revista ELECTRA nº 35 | 5 | e pelo Laboratório de Alta Tensão(LAT) da Universidade Federal da Paraíba, Campus II em Campina Grande | 8 |.

4.2.2.1. - Modelagem da ELECTRA

A coluna de alta tensão do divisor é dividida em várias partes. Em cada parte é incluída uma indutância e uma capacitância para terra(figura 4.3), representando os efeitos parasitas. A indutância juntamente com a capacitância para a terra, produzem oscilações. O modelo da ELECTRA simula essas oscilações, por várias linhas de transmissão sem perdas, acopladas, e de mesma natureza do cabo vertical. Cada seção da coluna de alta tensão do divisor pode ser representada por uma linha sem perdas em série com uma capacitância c (ramo vertical direito da figura 4.2). c é calculado de acordo com o número de partes em que foi dividida a coluna de alta tensão do divisor, ou seja

$$c = \frac{C_1}{n}$$

onde

C_1 é a capacitância total da coluna de alta tensão (fornecida pelo fabricante),

n é o número de divisões do divisor de tensão.

A parte de baixa tensão é representada pela capacitância C_2 (fornecida pelo fabricante). Resultados de cálculos computacionais e medições realizadas em laboratório para um divisor capacitivo amortecido | 5 | utilizando este modelo, são mostrados na figura 4.4. De maneira geral vemos uma boa aproximação da curva calculada em relação à curva medida. Grandes diferenças ocorrem apenas no início das curvas. Isto é explicado pelo efeito de tensões induzidas no divisor, que não foi incluído no modelo apresentado.

4.2.2.2. - Modelagem do LAT

O LAT desenvolveu uma técnica para a determinação da distribuição de capacitâncias parasitas. Baseia-se no cálculo do campo eletrostático do divisor de tensão, e num circuito equivalente para capacitâncias parasitas. O circuito equivalente consiste de vários capacitores em série. Analisemos primeiramente esse circuito equivalente, e posteriormente o campo eletrostático.

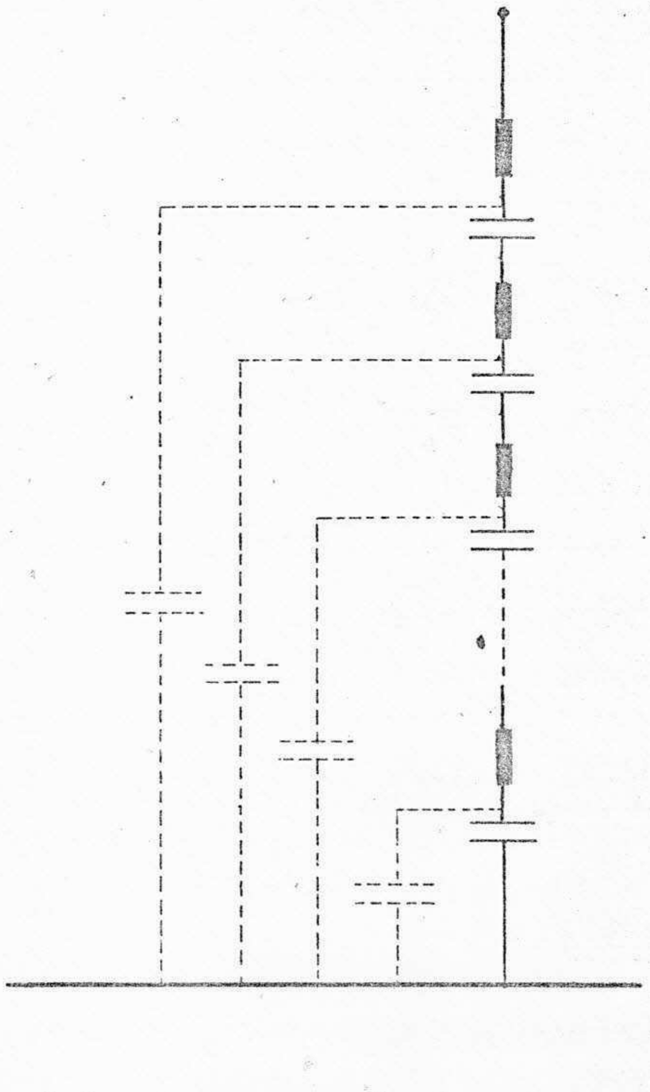


Figura 4.3 - Representação da coluna de alta tensão de um divisor capacitivo(modelo da ELECTRA)

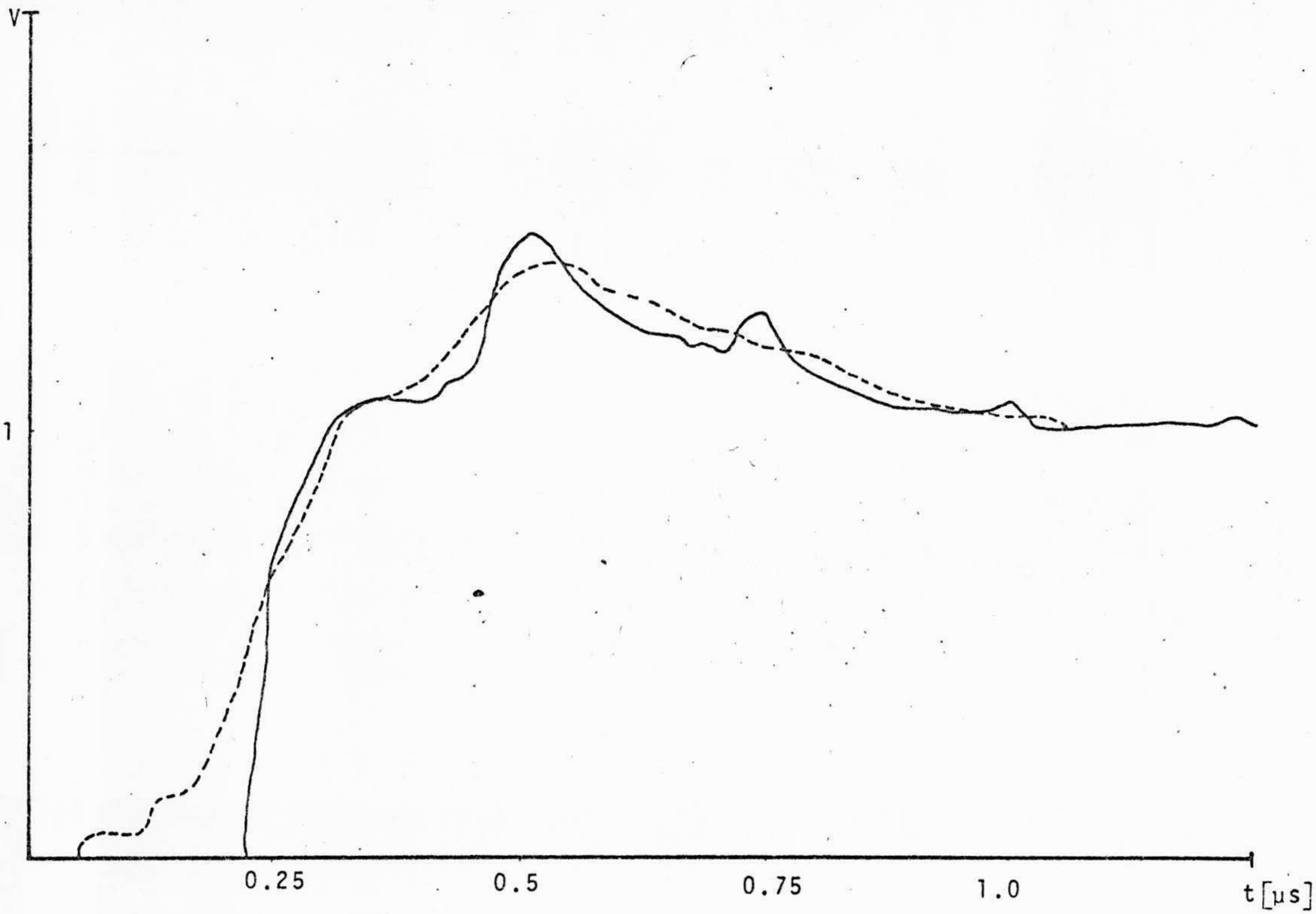


Figura 4.4 - Resposta degrau de um divisor capacitivo mixto

—— Curva calculada

--- Curva medida

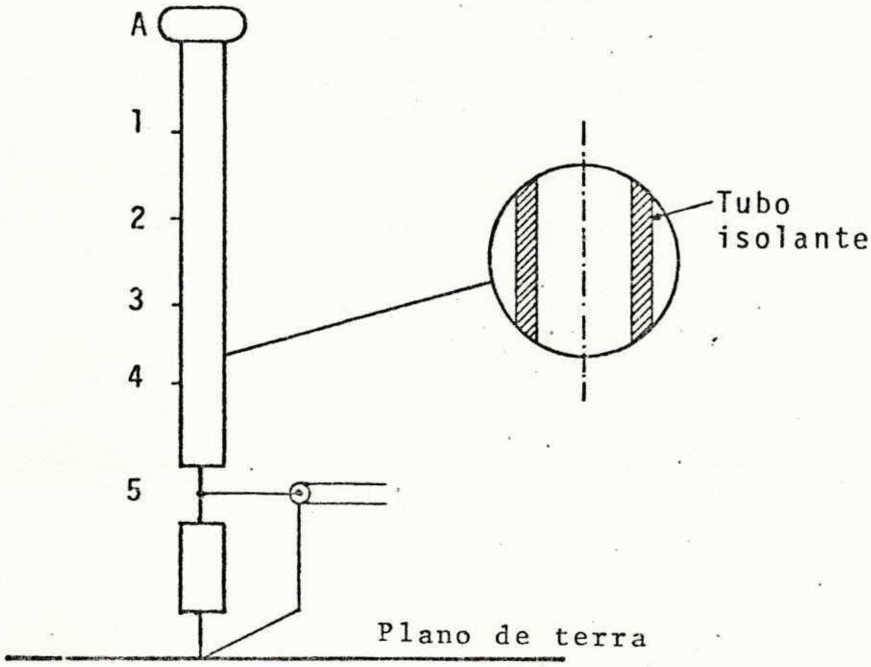
4.2.2a. - Circuito Equivalente

Considere um divisor tipicamente capacitivo mostrado na figura 4.5a e seu circuito equivalente na figura 4.5b. Esta equivalência só é válida se os potenciais dos pontos 1,2,3,...do circuito equivalente e os potenciais 1,2,3,... ao longo da coluna de alta tensão do divisor, forem iguais. A coluna de alta tensão é composta de vários capacitores em série envolvidos por um tubo de material isolante. Removendo-se os capacitores da coluna de alta tensão e o capacitor de baixa tensão, a estrutura resultante e seu circuito equivalente são mostrados na figura 4.6. As capacitâncias parasitas aparecem devido ao eletrodo de alta tensão e ao tubo isolante.

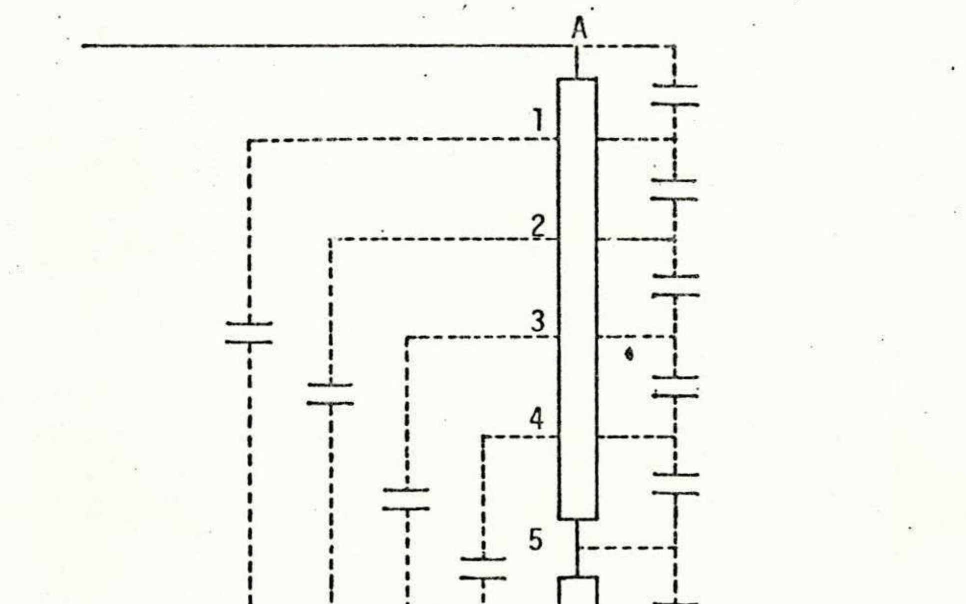
Suponha que uma fonte de tensão alternada é conectada entre o eletrodo A e a terra(figura 4.6a). Os pontos 1,2,3,...sofrerão variações em seus potenciais. Se a mesma fonte é conectada entre o nó A e o plano de terra da figura 4.6b, os pontos 1,2,3,... sofrerão as mesmas variações em seus potenciais. O circuito da figura 4.6b não é o único circuito equivalente do divisor. Um circuito como o da figura 4.6c pode ser empregado, desde que satisfaça as mesmas condições a que foi submetido o circuito da figura 4.6b.

4.2.2.2b. - Cálculo do Campo Eletrostático

Se colocarmos uma carga Q no eletrodo de alta tensão do divisor, criaremos um campo eletrostático. Os diversos pontos

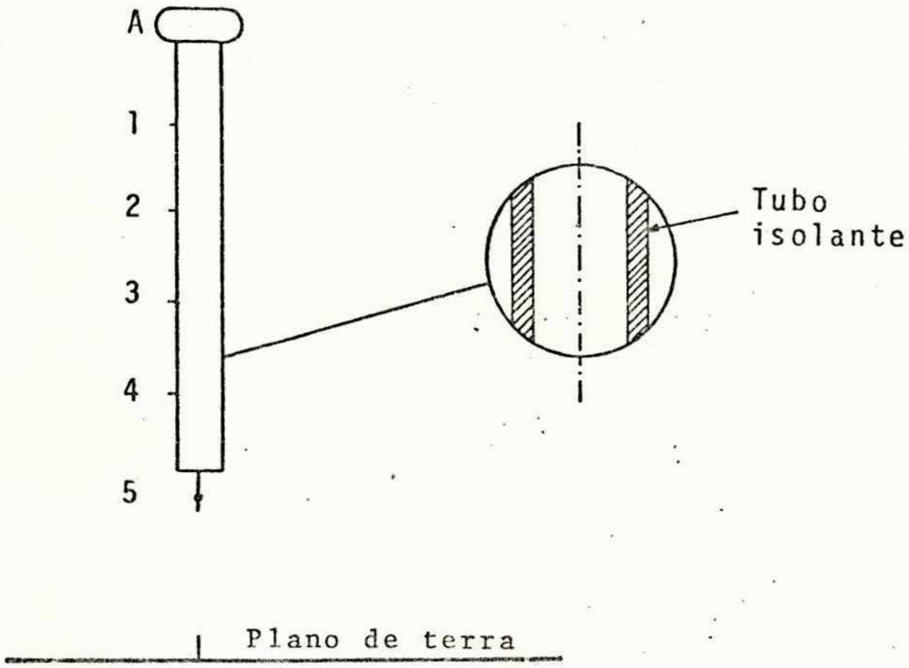


a) Divisor capacitivo

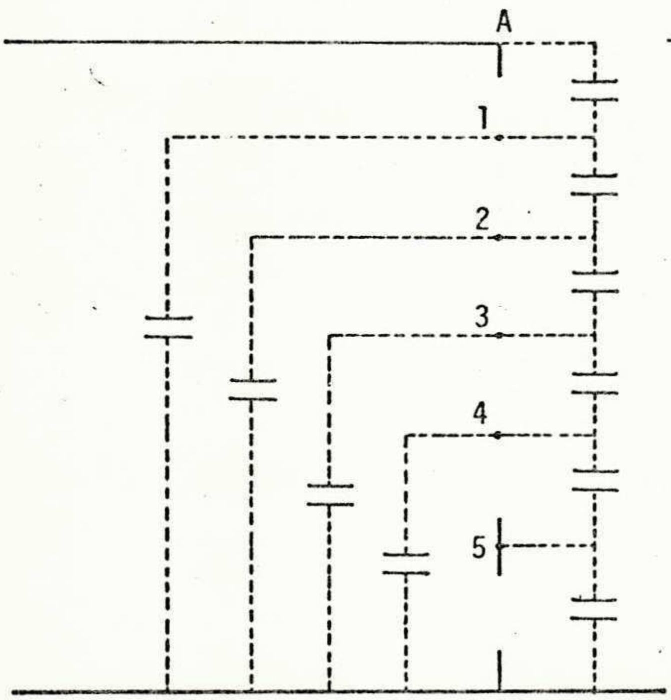


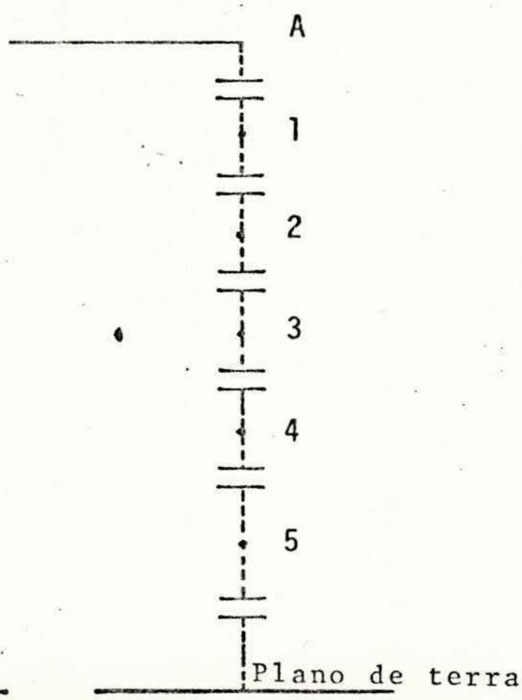
b) Circuito equivalente

Figura 4.5



a) Estrutura do divisor sem os capacitores





b) Circuito equivalente

c) Circuito alternativo

Figura 4.6

A, 1, 2,... terão potenciais V_A, V_1, V_2...etc. As capacitâncias em série c_1, c_2, c_3,... representam as capacitâncias parasitas. Elas podem ser calculadas por:

$$c_1 = Q/(V_A - V_1) \;,\; c_2 = Q/(V_1 - V_2), \ldots, \; c_n = Q/(V_{n-1} - V_n) \qquad (4.3)$$

A equação 4.3 só é verdadeira se a capacitância total entre o eletrodo A e a terra satisfizer a seguinte expressão:

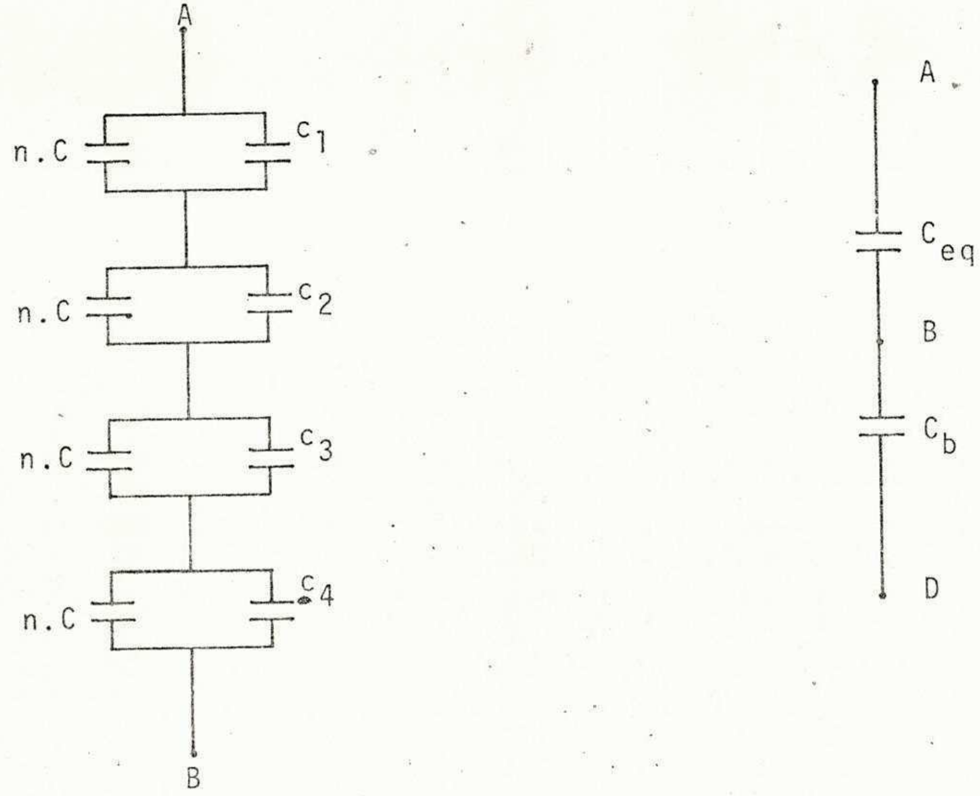
$$1/c_T = V_A/Q = 1/c_1 + 1/c_2 + \ldots + 1/c_n \qquad (4.4)$$

c_1, c_2, c_3,... podem ser obtidas pelo cálculo do campo eletrostático entre o eletrodo de alta tensão e a terra(figura 4.5a).O efeito do tubo isolante pode ser desprezado como uma primeira aproximação.

Após calcularmos as capacitâncias parasitas c_1, c_2, ...,c_n, incluímos o efeito da capacitância de alta tensão(fornecida pelo fabricante) do divisor(Isto é conseguido multiplicando-se a capacitância de alta tensão por n capacitâncias iguais). Em seguida fazemos um circuito paralelo com as capacitâncias parasitas calculadas(figura 4.7a), calculamos as capacitâncias equivalentes C_{eq1}, C_{eq2},...,C_{eqn} entre cada par de nó e determinamos a capacitância total equivalente da coluna de alta tensão do divisor C_{eq}, pela equação:

$$1/C_{eq} = 1/C_{eq1} + 1/C_{eq2} + \ldots + 1/C_{eqn} \qquad (4.5)$$

Para divisores capacitivos de dimensões normais, o circuito da figura 4.7b pode ser utilizado na simulação da resposta degrau. Uma maneira de determinar a distribuição de capacitâncias para-



a) Circuito equivalente incluindo as capacitâncias parasitas

b) Representação de um divisor puramente capacitivo

Figura 4.7

sitas, é o método de simulação de cargas(Apêndice I).

4.3. - Cálculo da Resposta Degrau

O cálculo da resposta degrau pode ser conseguido através do método computacional de Hermann Dommel. Este processo é baseado no método das características para parâmetros distribuídos, e na regra do trapézio em integrações que envolvem parâmetros concentrados. A resposta degrau envolve períodos de tempo muito curtos, sendo portanto necessário o estudo de transitórios eletromagnéticos. O Apêndice II descreve sucintamente o método de Dommel(Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos).

4.4. - Simulação da Resposta Degrau de um Sistema de Medição

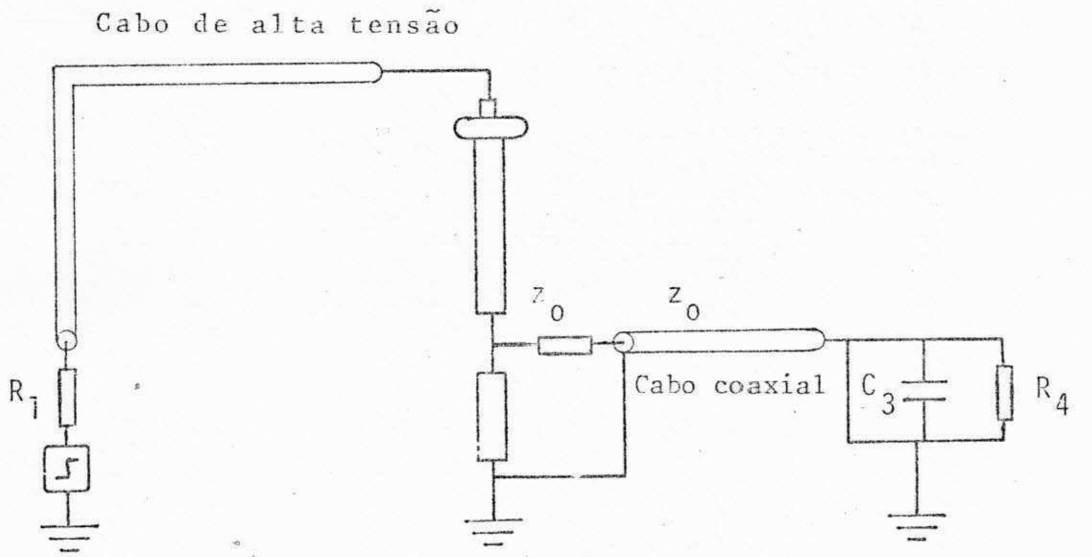
No circuito da figura 4.8a, como primeira aproximação podemos representar o cabo de alta tensão e o cabo coaxial por linhas de transmissão sem perdas com impedâncias de surto constantes, e o divisor capacitivo por dois capacitores C_1 e C_2(figura 4.8b). A figura 4.9 mostra o circuito equivalente utilizado no cálculo de transitórios. Os parâmetros do circuito são:

C_1 = 447 pF

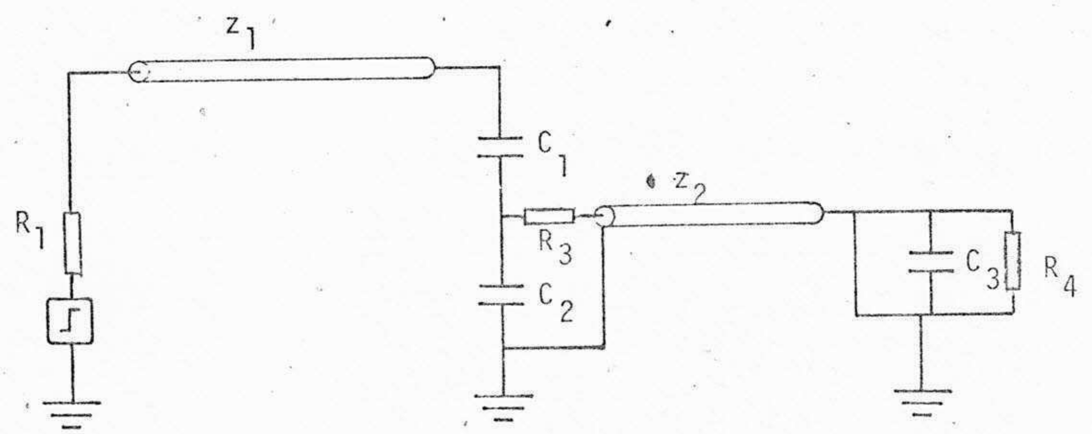
C_2 = 0.202 μF

Z_1 = 460 Ω

Z_2 = 75 Ω



a) Circuito de medição da resposta degrau



b) Representação do divisor por capacitâncias puras

Figura 4.8

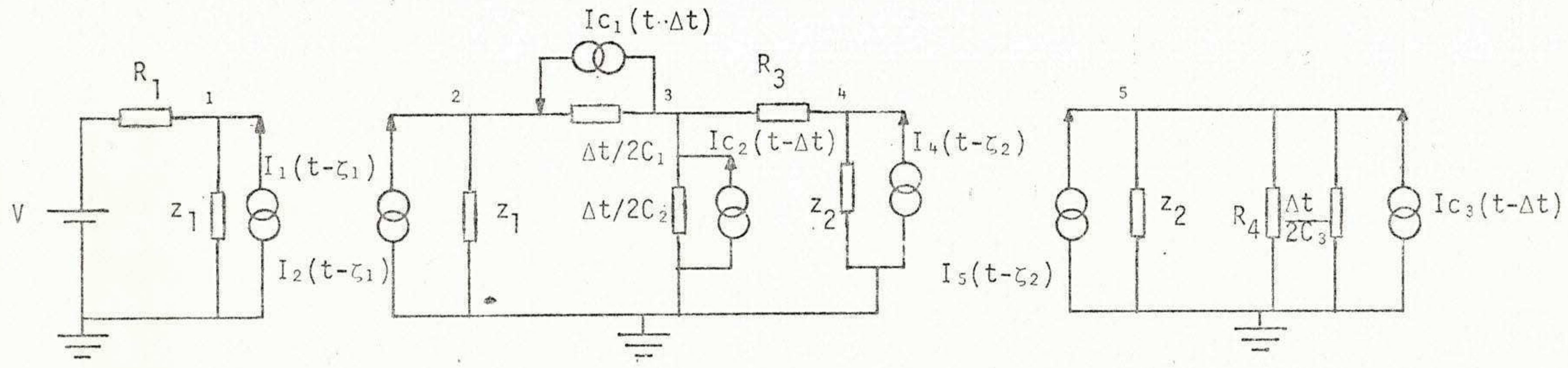


Figura 4.9 - Circuito equivalente

$R_3 = 75\ \Omega$

$R_1 = 100\ \Omega$

$\zeta_1 = 16ns$

$\zeta_2 = 96ns$

Os comprimentos do cabo de alta tensão e do cabo coaxial foram 4.8m e 19m respectivamente. O osciloscópio foi representado por uma resistência R_4 de 1 megaohm em paralelo com uma capacitância C_3 de 20 picofarad. Um programa computacional foi desenvolvido para simular a resposta degrau. A resposta simulada é mostrada na figura 4.10.

Com a simulação da resposta degrau podemos estudar o comportamento de um sistema de medição. Se o modelo escolhido para a simulação apresentar boa precisão(forma de onda da tensão simulada aproximadamente igual à forma de onda da tensão medida),teremos conseguido um circuito equivalente para o sistema de medição. Com esse circuito podemos estimar a tensão aplicada no objeto de teste. O presente trabalho faz a simulação da resposta degrau de um divisor capacitivo segundo os modelos da ELECTRA e LAT.

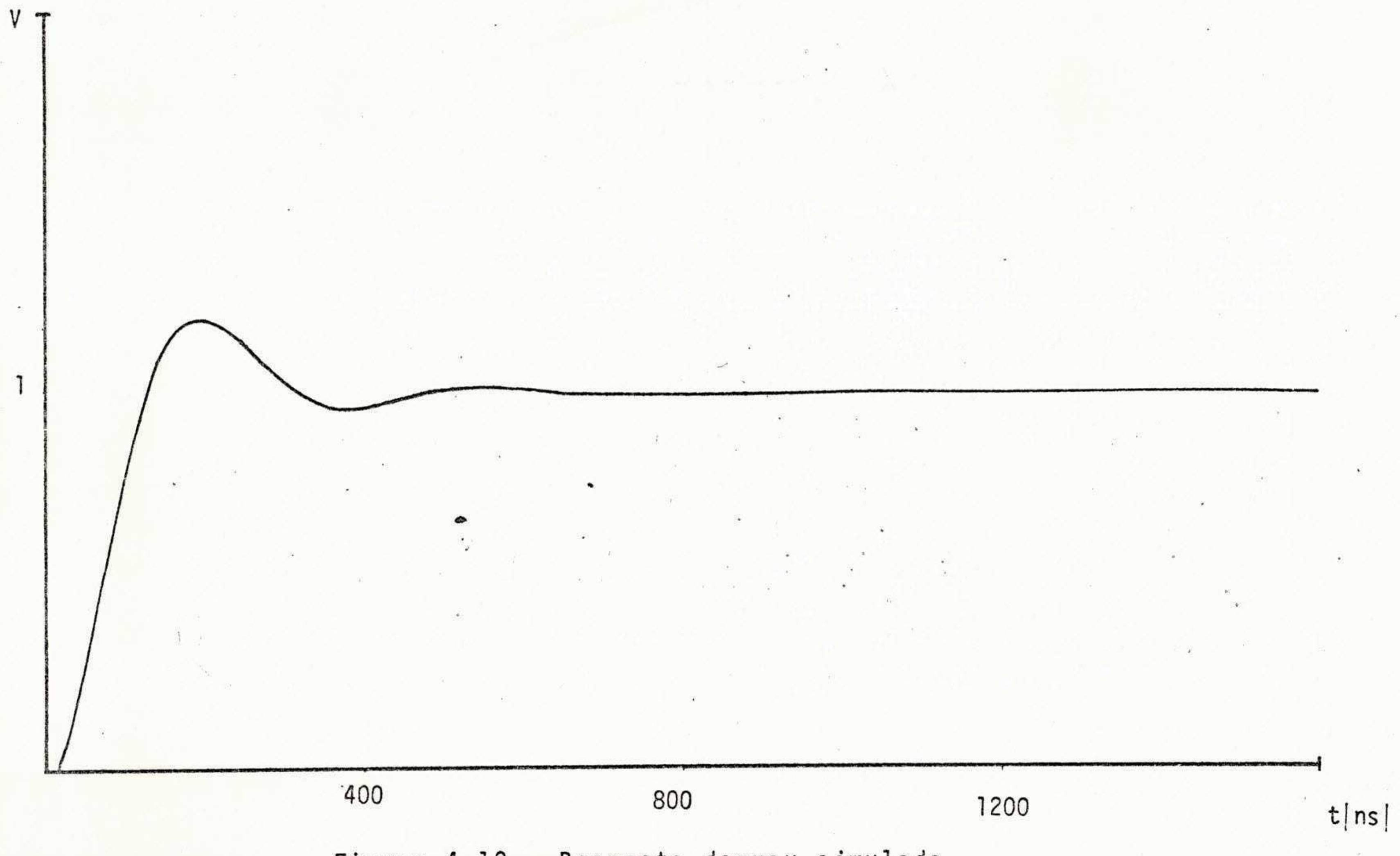


Figura 4.10 - Resposta degrau simulada

CAPÍTULO V

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. - Introdução

O sistema de medição de tensão de impulso do LAT foi utilizado para a medição da resposta degrau. Os equipamentos usados durante a medição foram: um gerador de pulsos retangulares com relé de contatos umedecidos com mercúrio, um cabo de alta tensão com resistência distribuida de 0.132×10^{-2} ohm/metro, um divisor de tensão capacitivo de fabricação Ferranti(figura 5.1) com capacitâncias de baixa e alta tensão de 0.2 microfarads e 400 picofarad respectivamente, um cabo coaxial com impedância de surto de 75 ohm e resistência distribuida de 0.6125×10^{-4} ohm /metro, e um osciloscópio Tektronix Tipo 203(resistência interna de 1 megaohm e capacitância de 20 picofarad).A res

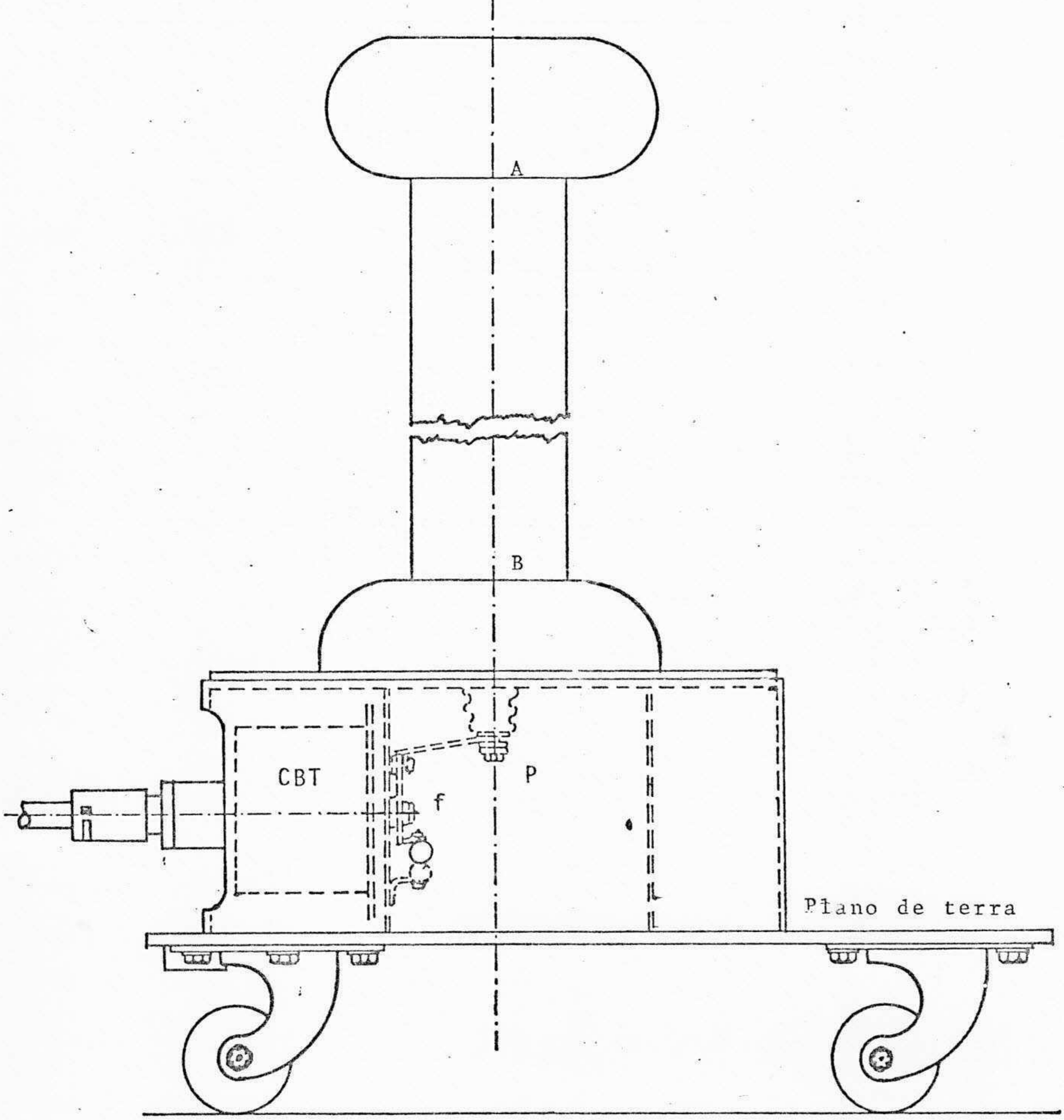


Figura 5.1 - Divisor de tensão capacitivo do LAT

posta degrau foi fotografada por uma câmera Polaroid. Fizemos simulação por computadores e comparamos as curvas calculadas com as curvas medidas.

5.2. - Simulação Digital

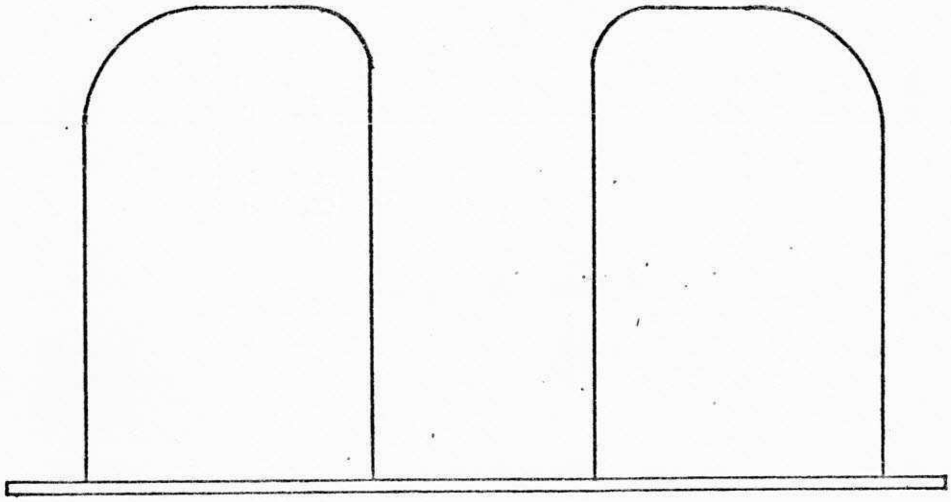
Com um computador IBM/370 - 145 e usando a linguagem WATFIV, fizemos programas para o cálculo de capacitâncias parasitas e de transitórios eletromagnéticos para o sistema de medição do LAT. A modelagem das capacitâncias parasitas foi feita pelos métodos da ELECTRA e LAT. A simulação do sistema de medição foi feita pelo método de Dommel.

5.3. - Capacitâncias Parasitas

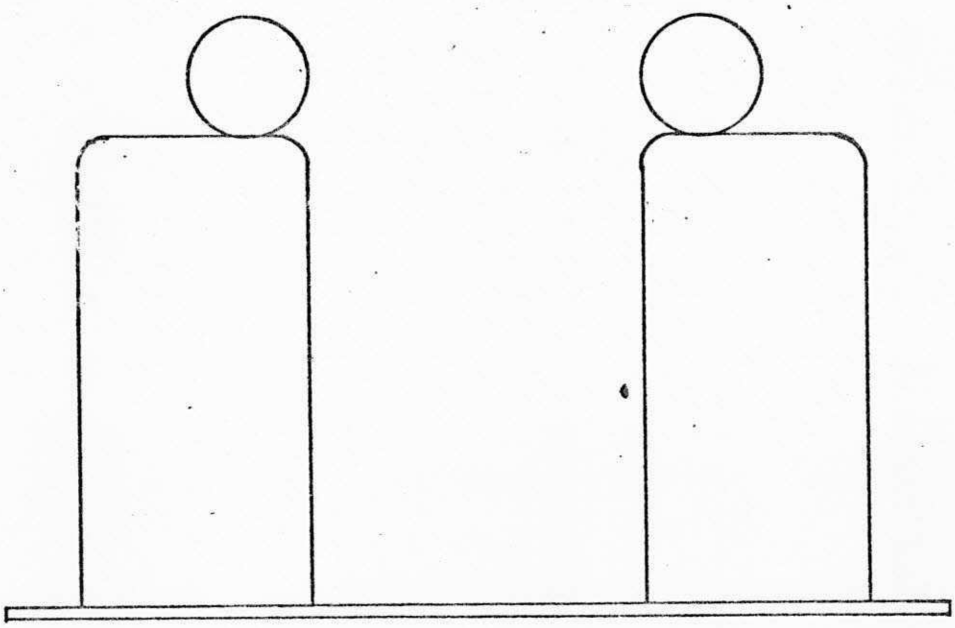
Utilizando a técnica de simulação de cargas calculamos a distribuição de capacitâncias parasitas ao longo do eixo de simetria do divisor. Para facilidade dos cálculos a simulação foi feita usando apenas os anéis de cargas.

A base do divisor foi simulada de várias formas(figuras 5.2 e 5.3). A capacitância da coluna de alta tensão foi calculada como sendo a capacitância equivalente entre os pontos A e B da figura 5.1. A capacitância de baixa tensão foi calculada como sendo a capacitância equivalente entre o ponto B e o plano da terra.

Grandes dificuldades foram encontradas na simulação da ba-

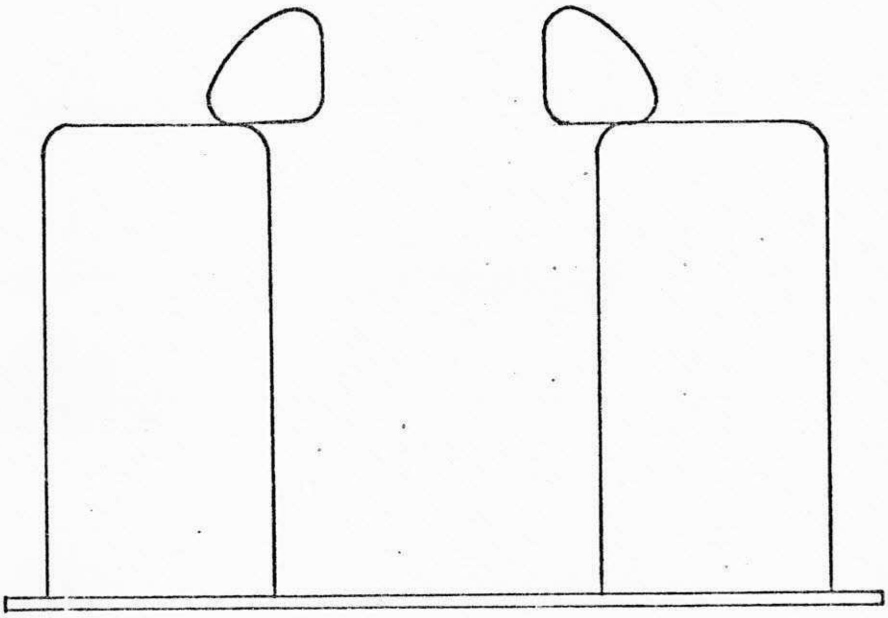


(a)

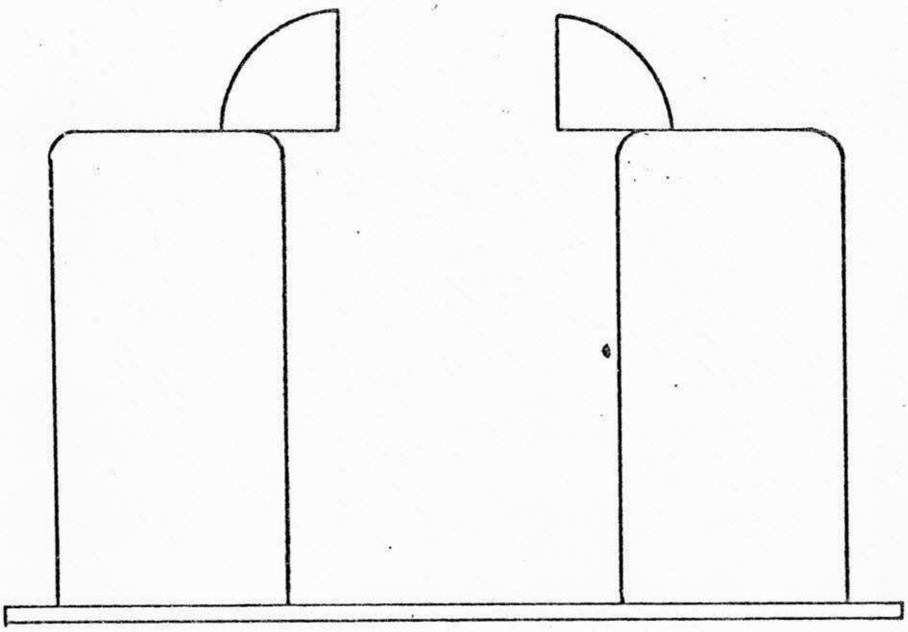


(b)

Figura 5.2 - Contornos usados para a simulação da base do divisor



(a)



(b)

Figura 5.3 - Contornos usados para a simulação da base do divisor se do divisor. A escolha de um ponto para a determinação da capacitância parasita de baixa tensão(ponto B), é de fundamental importância. De acordo com nossos cálculos, se o ponto B estiver mais abaixo que a altura da base, a margem de erro no cálculo da capacitância parasita de baixa tensão tende a crescer, pois a influência da parte metálica vai se tornando mais acentuada.Para obtermos uma simulação exata da base, deveríamos levar em conta a caixa de blindagem onde fica o capacitor de baixa tensão(CBT- figura 5.1), incluirm o efeito do fio que liga o pino P ao ponto F, e em seguida calcularm o potencial Vf em relação à terra. A capacitância equivalente de baixa tensão seria então:

$$C_2 = C_p + C_b$$

onde

$$C_p = Q/V_f$$

sendo

C_p - Capacitância parasita de baixa tensão.

C_b - Capacitância de baixa tensão fornecida pelo fabricante.

Q - Carga total do eletrodo de alta tensão.

A presença da caixa de blindagem do capacitor de baixa tensão e do fio que conecta o pino P à caixa do capacitor, resulta num sistema sem simetria axial, nos obrigando ao uso de um sistema de coordenadas de três dimensões, o que dificultaria bastante a simulação. Em nossa simulação usamos um sistema de coordenadas de duas dimensões e escolhemos o ponto B na mesma altura da parte plana da base do divisor. A escolha foi feita desta maneira porque neste ponto o fator de escala do divisor calculado é aproximadamente igual ao fator de escala medido no laboratório.

Fizemos programas para as quatro formas da base. Os cálculos mostraram que a distribuição de capacitâncias parasitas e as capacitâncias equivalentes de baixa e alta tensão são aproximadamente as mesmas. Porém, a última forma(figura 5.3b) deve ser destacada por se confrontar melhor com a forma real do divisor. Um fluxograma e um programa computacional utilizando a última forma é mostrado no Apêndice III. Para este caso 112 anéis de cargas foram utilizados na simulação. Um tempo de 277 segundos foi necessário para o processamento do programa.

5.4. - Simulação da Resposta Degrau

Três tipos de configurações foram analisadas. As duas primeiras(figuras 5.4 e 5.5) utilizam capacitâncias concentradas,calculadas por simulação de cargas(modelo do LAT). Na terceira(figura 5.6) a coluna de alta tensão do divisor é simulada por várias linhas de transmissão sem perdas em série com capacitores(modelo da ELECTRA). A resistência R_1 conectada à fonte assumiu valores de 0;101,5; 326,5 ohms. A resistência R_2 do topo do divisor assumiu valores de zero e 119 ohms. Essas resistências foram medidas em laboratório. O gerador degrau foi simu

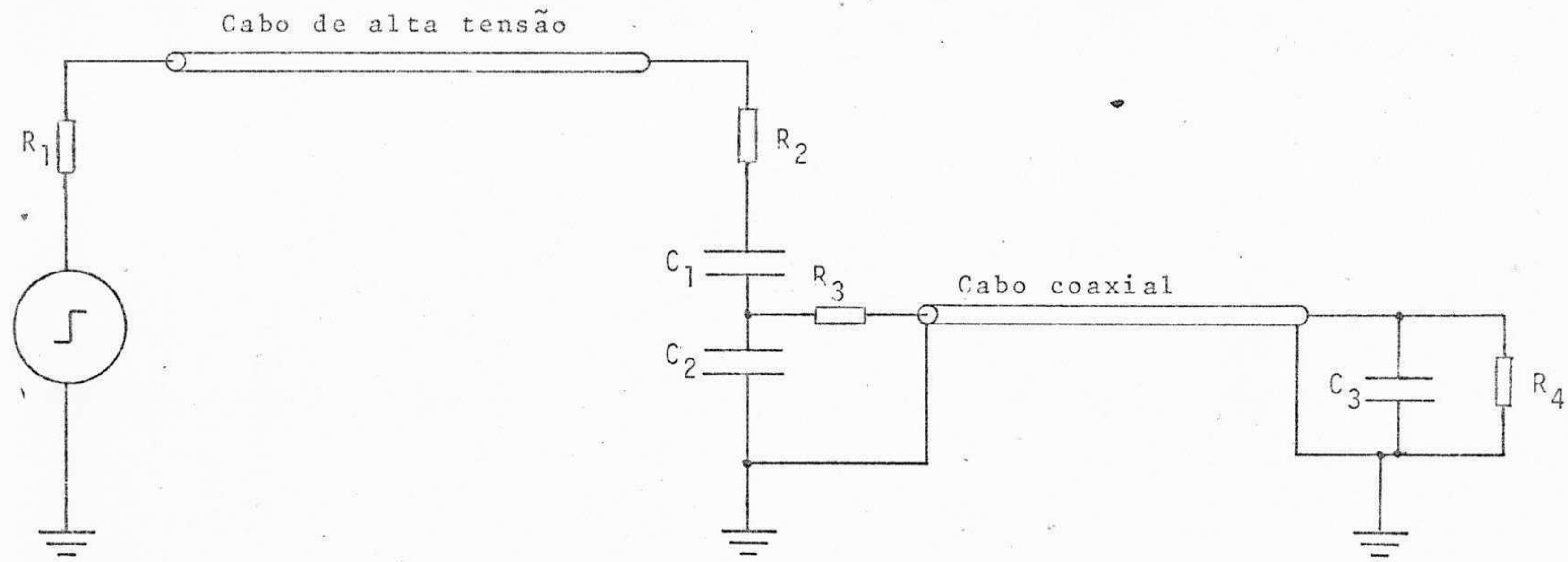


Figura 5.4 - Arranjo horizontal utilizando o modelo do LAT para simular o divisor

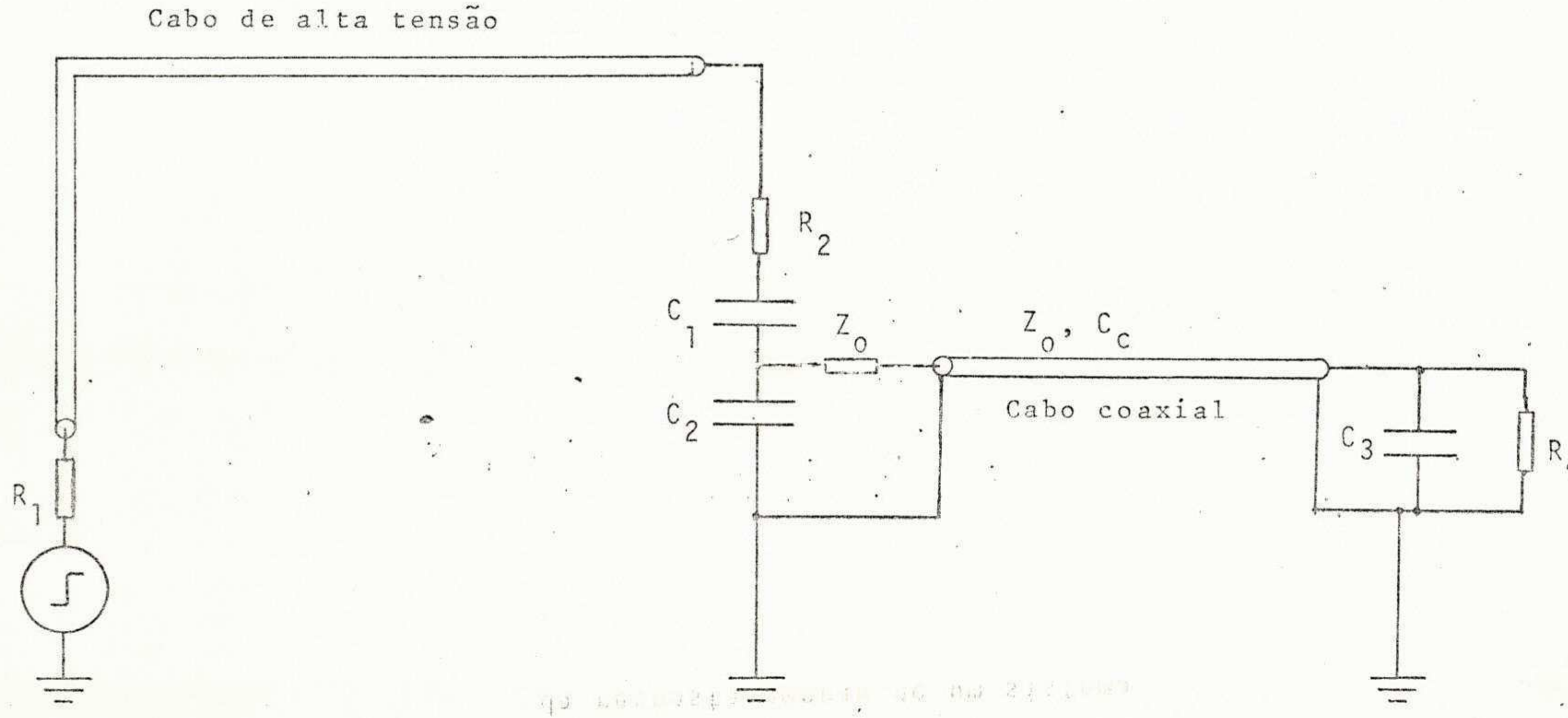


Figura 5.5. - Arranjo em quadratura(modelo do LAT)

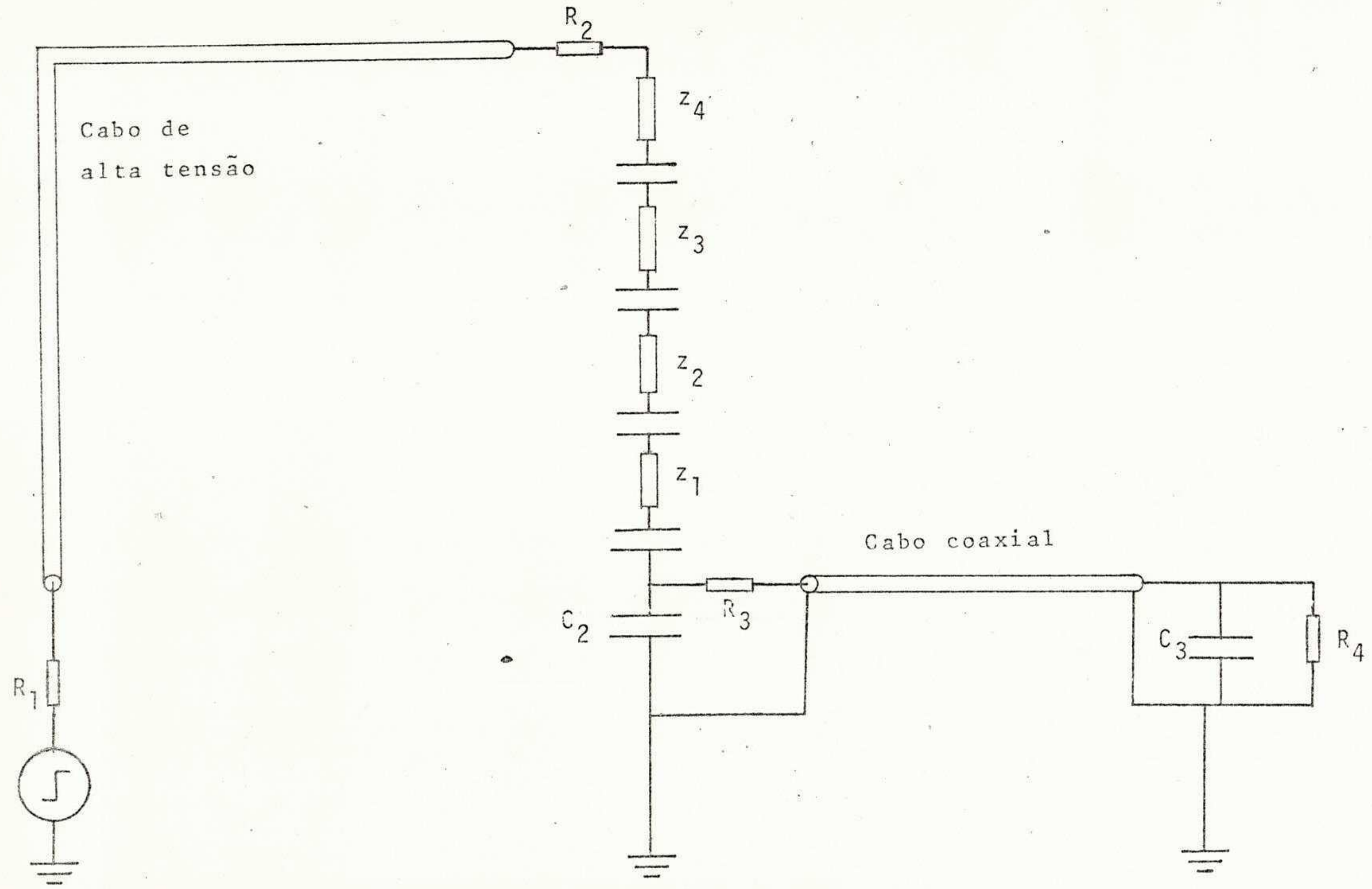


Figura 5.6 - Arranjo em quadratura utilizando o modelo da ELECTRA para simular o divisor

lado inicialmente por uma função degrau ideal de amplitude $(C_1 + C_2)/C_1$ (figura 5.7a) e posteriormente pela forma de onda da figura 5.7b, a constante de tempo do gerador foi assumida como sendo quatro vezes o intervalo de tempo(16ns). A resposta degrau para ambas as formas de onda não apresentou diferenças visíveis. A última forma de onda foi escolhida na apresentação dos resultados por se aproximar melhor do caso real.

Para a primeira configuração, a resposta degrau foi calculada com o cabo horizontal e o cabo coaxial sendo representados por linhas de transmissão com tempos de trânsito de 16 e 95 nanosegundo respectivamente. Simulamos as perdas nas linhas dividindo-as em dois segmentos, concentrando 1/4 da resistência total nas duas extremidades e metade da resistência total na conexão entre os dois segmentos. A impedância de surto do cabo de alta tensão foi calculada de acordo com a altura do cabo($Z \simeq 467$ ohm). A figura 5.8 apresenta seis curvas com diversas combinações de resistores R_1 e R_2(tabela 5.1). Fizemos medições em laboratório utilizando o arranjo em quadratura(foto 5.1) e observamos certos desvios entre as formas de ondas calculadas e medidas. Os picos de cada curva calculada, exceto o da curva A, são menores que o das curvas medidas(figura 5.9). A curva D calculada apresenta um overshoot tão pequeno que é quase imperceptível, ao contrário da curva D medida. O caso mais crítico ocorre com a curva A, que de acordo com os cálculos não apresenta amortecimento ao longo do tempo, o que difere bastante da curva medida.

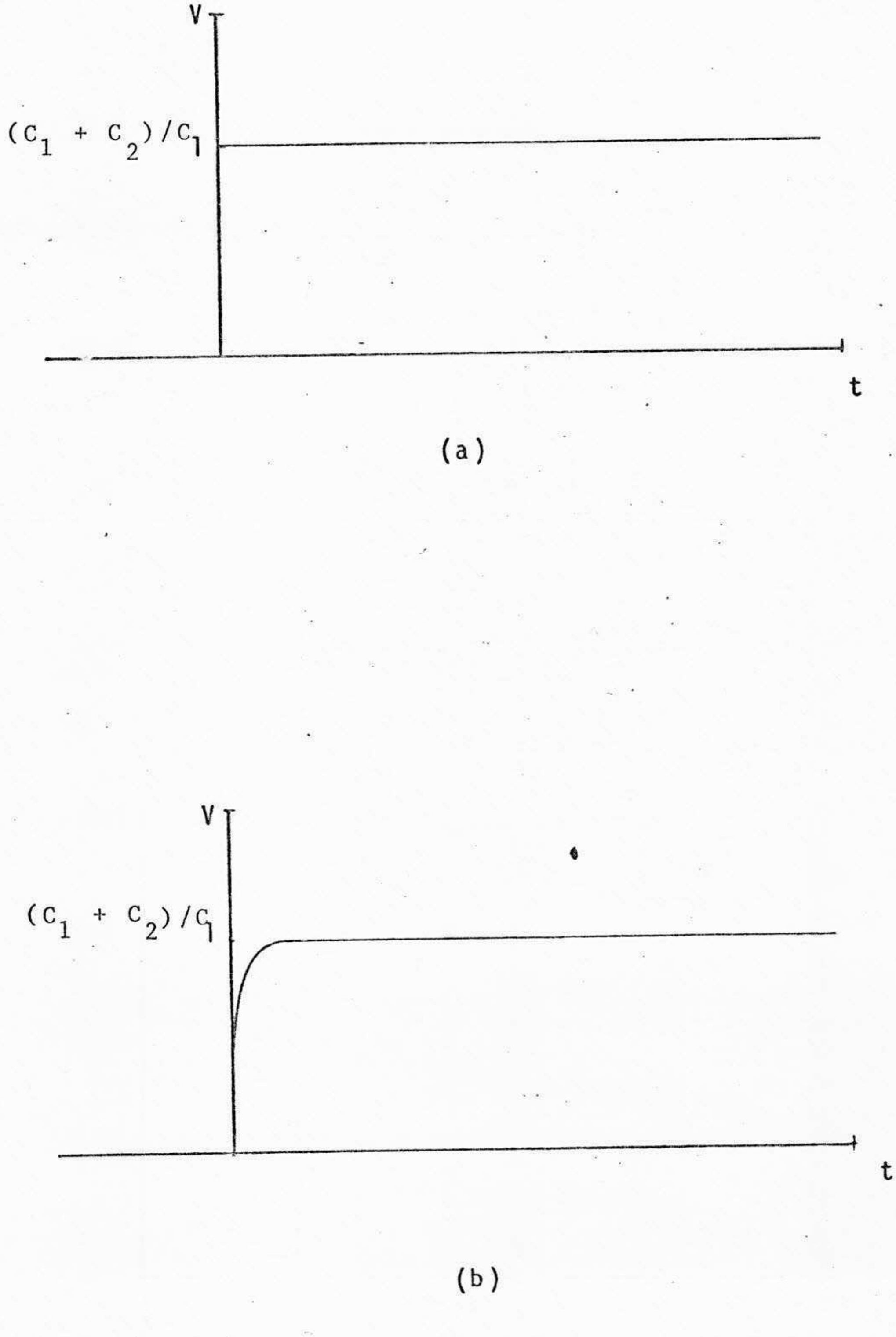


Figura 5.7

Foto 5.1 - Circuito de medição da resposta degrau

curva A	$R_1 = 0$	$R_2 = 0$
curva B	$R_1 = 101{,}5\ \Omega$	$R_2 = 0$
curva C	$R_1 = 0$	$R_2 = 119\ \Omega$
curva D	$R_1 = 101{,}5\ \Omega$	$R_2 = 119\ \Omega$
curva E	$R_1 = 326{,}5\ \Omega$	$R_2 = 0$
curva F	$R_1 = 326{,}5\ \Omega$	$R_2 = 119\ \Omega$

Tabela 5.1 - Combinações dos resistores R_1 e R_2

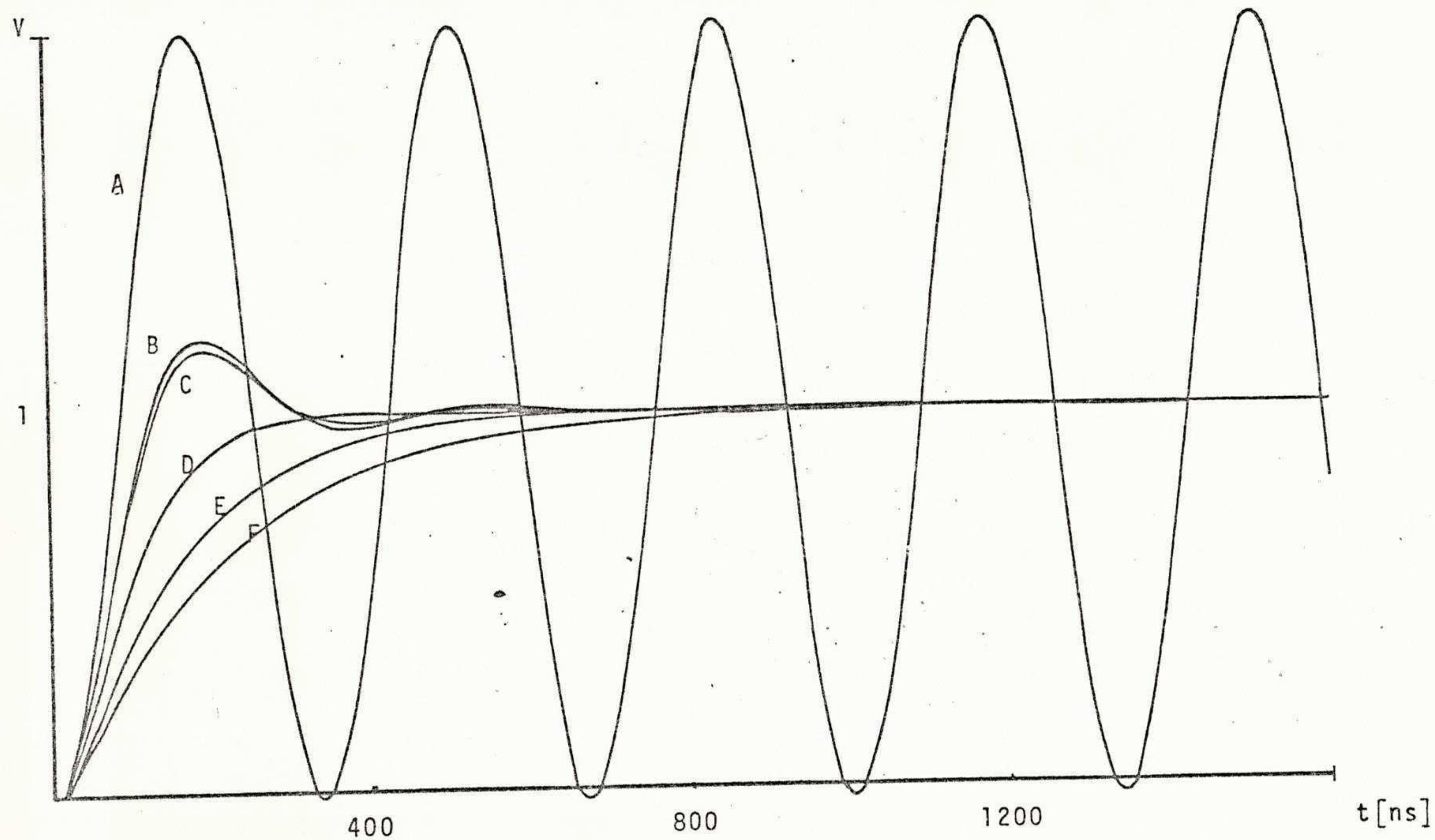


Figura 5.8 - Resposta degrau simulada(arranjo horizontal - modelo do LAT)

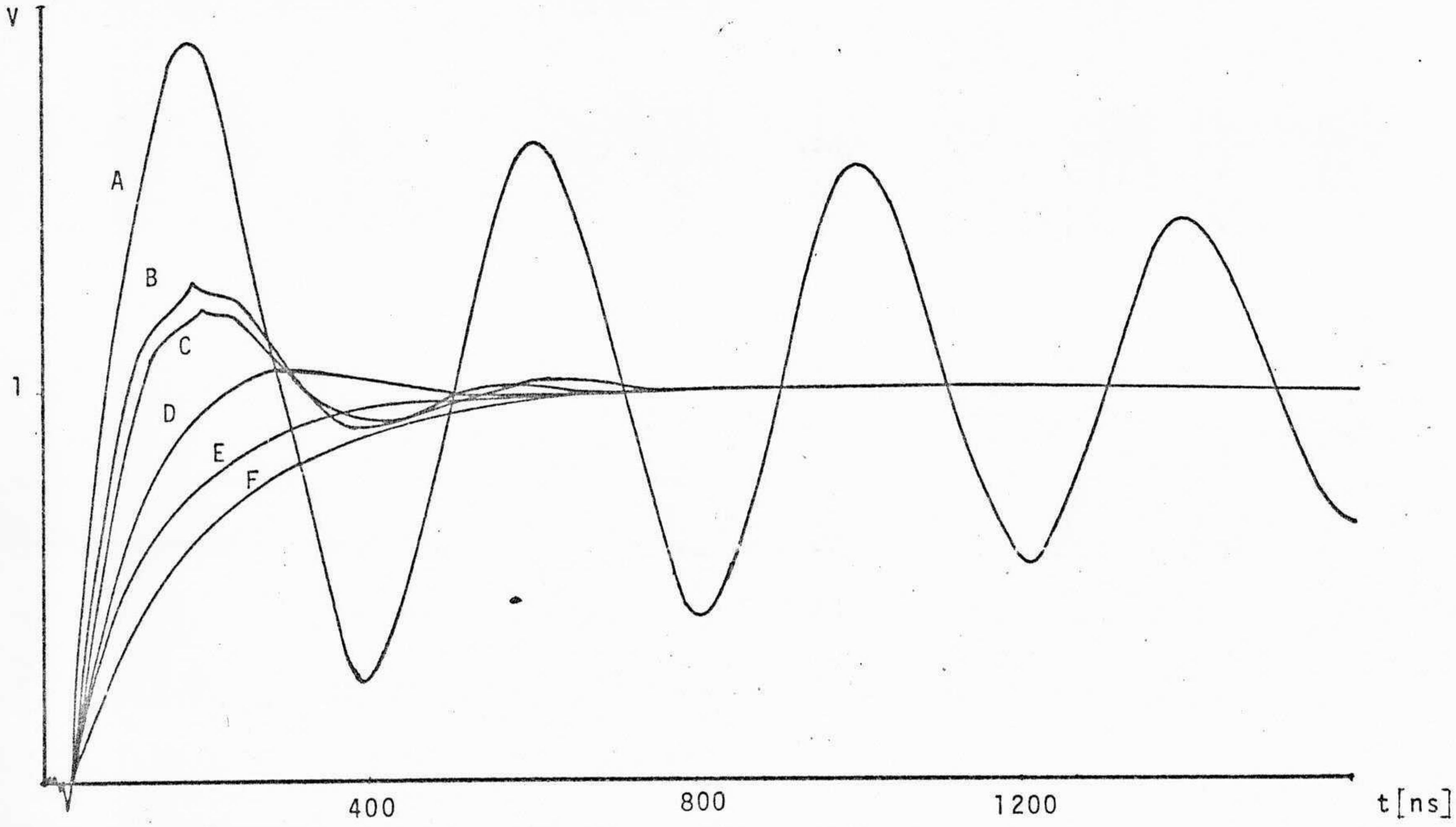


Figura 5.9 - Resposta degrau medida em laboratório
(arranjo em quadratura)

Para a segunda configuração(figura 5.5) a resposta de grau foi calculada com o cabo vertical sendo representado por quatro linhas de transmissão, cada uma com tempo de trânsito de 2 nanosegundos e impedâncias de surto calculadas de acordo com suas alturas médias. O cabo horizontal foi representado por uma uma única linha de transmissão com tempo de trânsito de 8 nanosegundos e de mesma impedância de surto que o cabo horizontal da configuração anterior. Os mesmos problemas do caso anterior foram também constatados. Cada curva apresentou um pico de tensão ainda menor que no caso passado. A curva A também não se mostrou amortecida. A figura 5.10 mostra as curvas obtidas para a segunda configuração.

Na terceira configuração(figura 5.6), os cabos vertical e horizontal foram simulados da mesma maneira da configuração anterior. O divisor capacitivo foi representado por quatro linhas de transmissão sem perdas(com os mesmos tempos de trânsito e impedâncias de surto das linhas de transmissão do cabo vertical) em série com quatro capacitores de capacitâncias iguais de 1.600 picofarad.(quatro vezes a capacitância fornecida pelo fabricante). A figura 5.11 mostra as curvas calculadas com todas as combinações de resistências R_1 e R_2. Os overshoots apretados, exceto o da curva A, são maiores que os dos casos anteriores mas, menores que os das curvas medidas em laboratório. A curva A mais uma vez não se mostrou amortecida.

Nas três configurações analisadas observamos uma dife

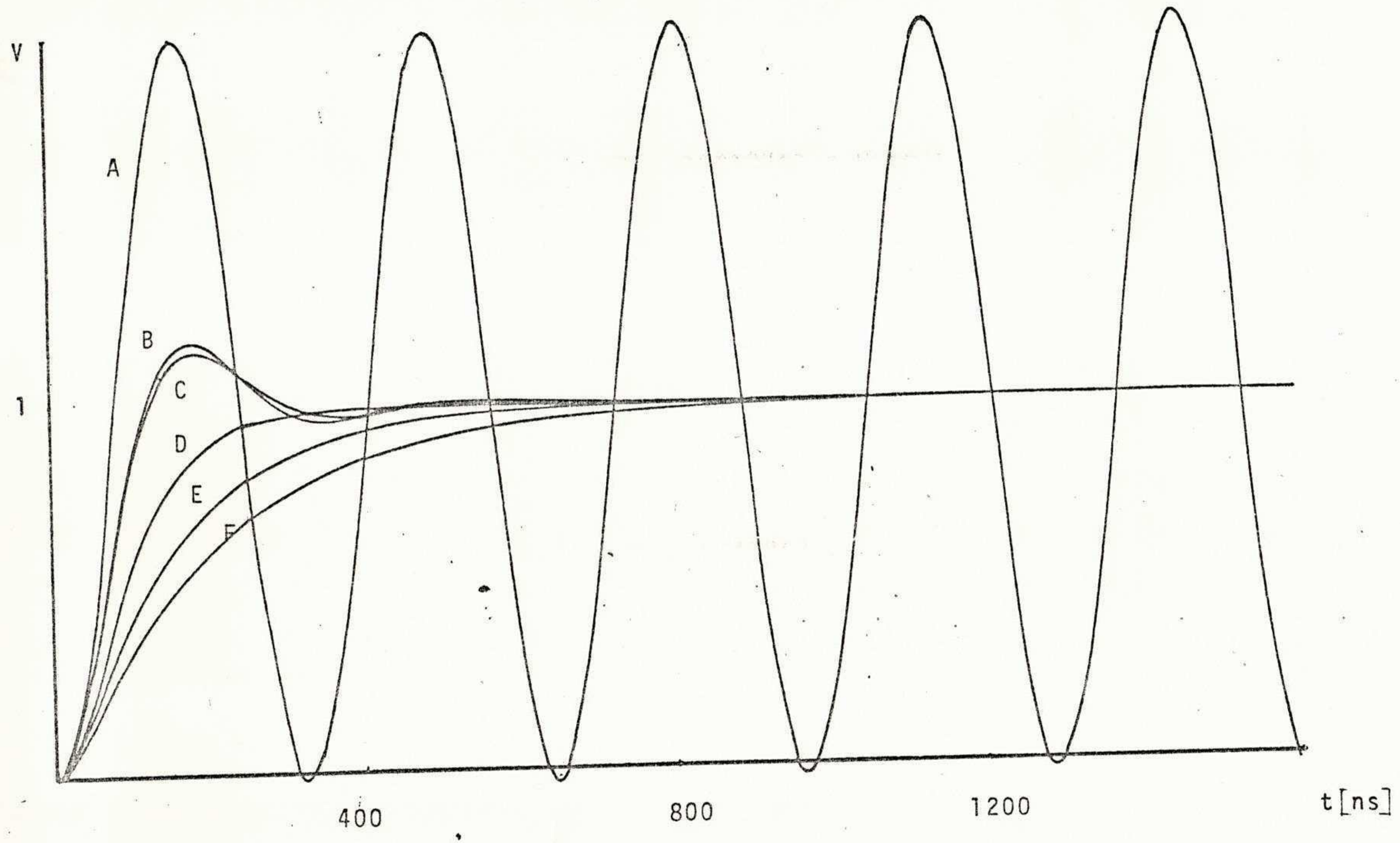


Figura 5.10 - Resposta degrau simulada(Arranjo em quadratura - modelo do LAT)

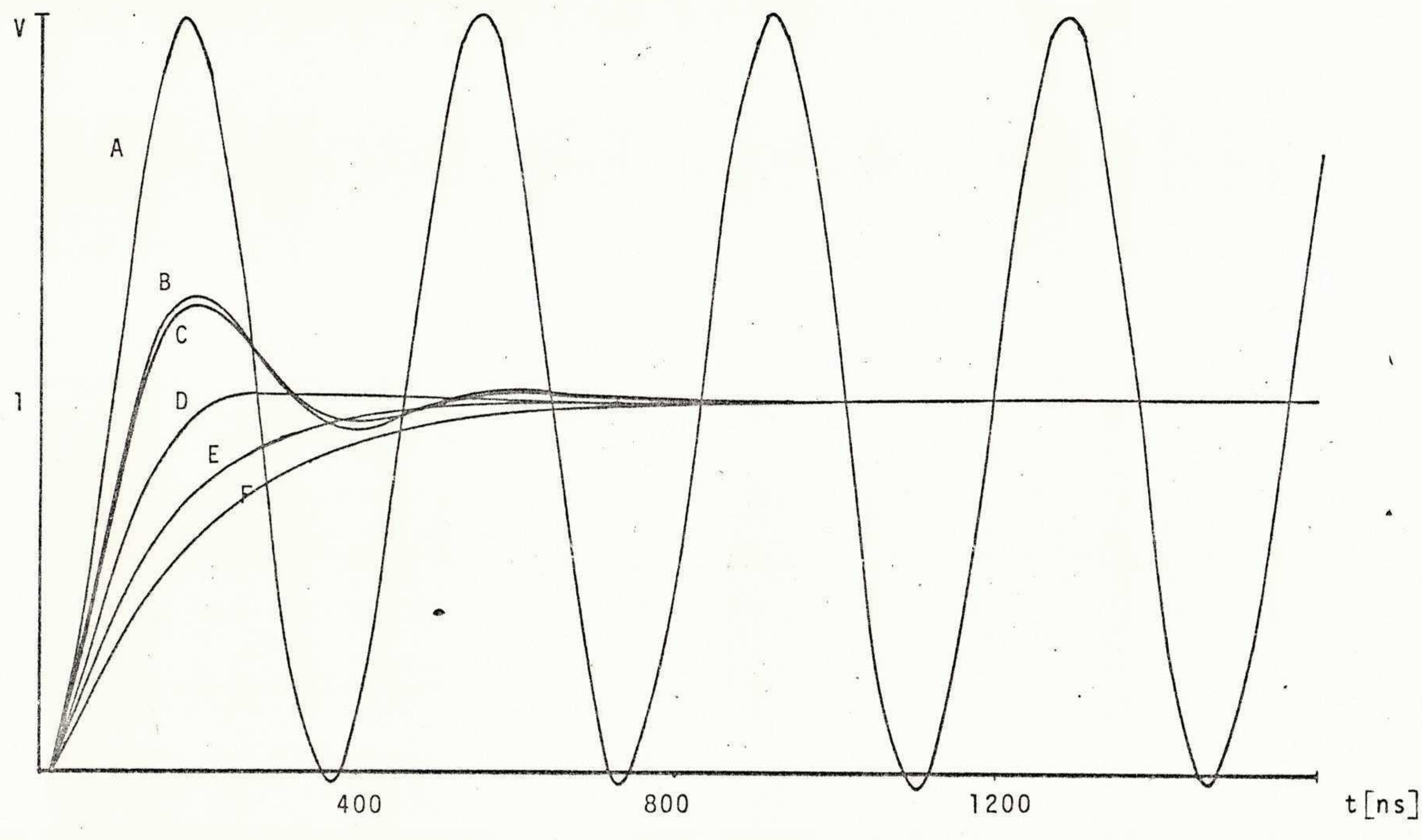


Figura 5.11 - Resposta degrau simulada
(modelo da ELECTRA)

rença de fase entre elas. Isto é atribuído à presença de indutâncias diferentes relativas às posições do cabo de alta tensão(arranjos horizontal e em quadratura) e à presença das linhas de transmissão(modelo da ELECTRA) no interior do divisor de tensão. As freqüências de oscilações nas três configurações citadas são maiores que a freqüência de oscilação das curvas medidas. Os diferentes picos e freqüências de oscilação das curvas calculadas em relação às curvas medidas, levaram-nos a tentar medir ou calcular a resistência e a indutância do divisor de tensão. Substituindo o gerador degrau por um gerador de audio, conseguimos calcular a resistência e a indutância da coluna de alta tensão do divisor(figura 5.12). Aplicamos tensões senoidais em três freqüências diferentes(100 Khz, 1 Mhz, 2 Mhz), na entrada do cabo vertical do sistema de medição. O capacitor de baixa tensão foi substituído por um curto circuito. O resistor R_1 tinha como valor medido 101,5 ohm. Medimos a queda de tensão através do resistor R_1, calculamos a corrente do circuito e posteriormente a resistência interna e a indutância do divisor, supondo que a capacitância de alta tensão fosse fixa e de 400 pF. A resistência calculada foi 12 ohm e a indutância 3 microhenry.

Conseguimos calcular também a resistência e a indutância do capacitor de baixa tensão. O circuito utilizado para a determinação destes parâmetros é mostrado na figura 5.13. O gerador degrau foi ligado ao capacitor de baixa tensão através de um pequeno resistor R. Os cabos de conexão ao osciloscópio foram curtos para evitar reflexões. Observamos a forma de onda da tensão sobre o capacitor para três valores de (1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ ohm).

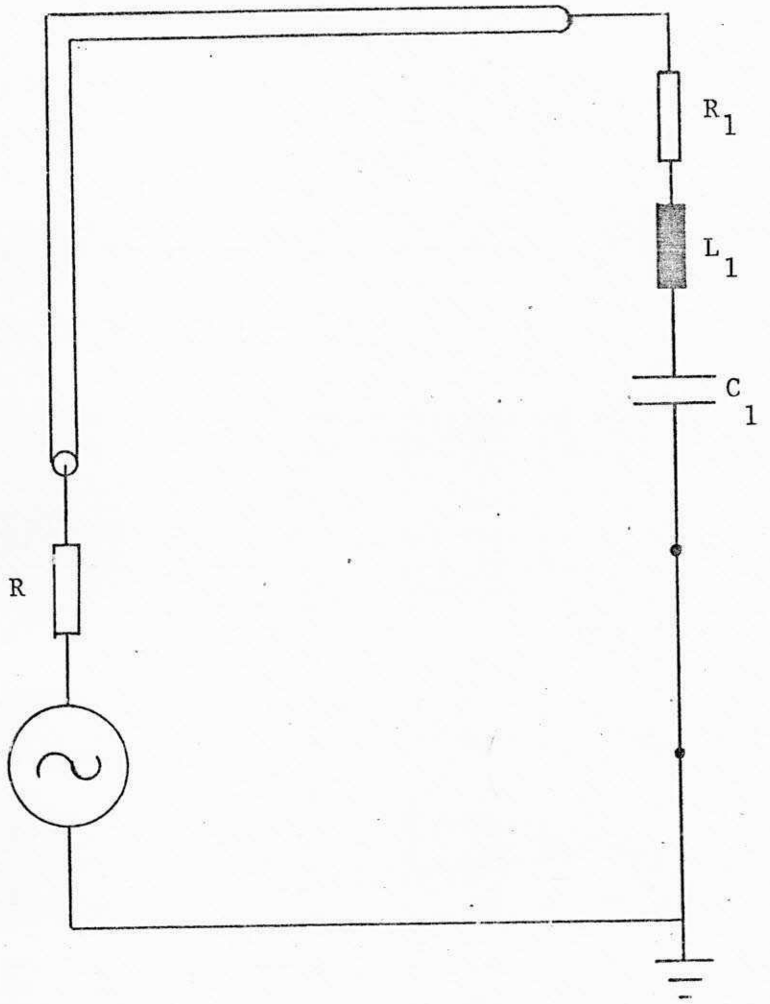


Figura 5.12. - Medição da resistência e indutância de alta tensão

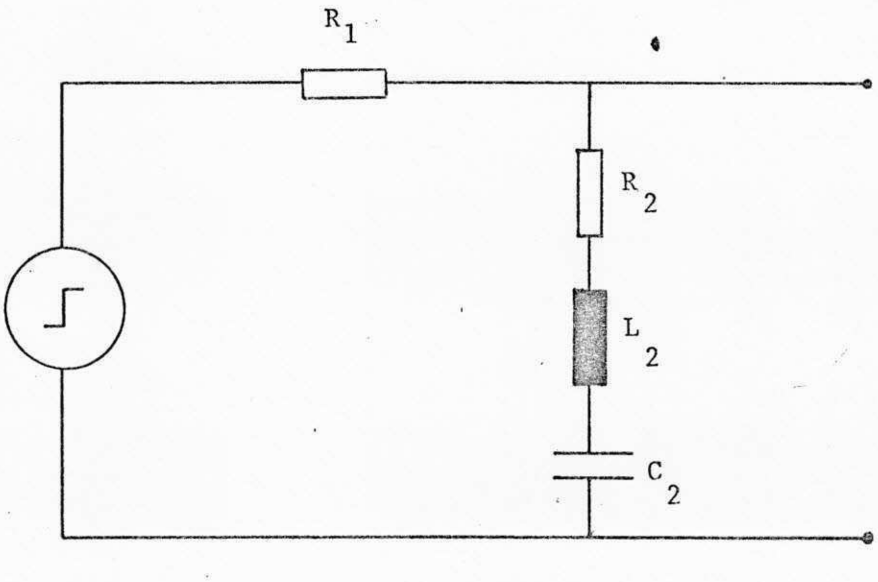


Figura 5.13. - Medição da resistência e indutância de baixa tensão

Com estas formas de onda obtivemos para cada resistor a taxa de amortecimento da tensão e a sua freqüência de oscilação, e calculamos a resistência e a indutância do capacitor. A resistência obtida foi aproximadamente 0.4 ohm e a indutância 1 micro-henry.

Com os resultados citados acima e utilizando a segunda configuração do modelo do LAT, representamos as colunas de alta e baixa tensão por elementos de circuito RLC em série(figura 5.14). Calculamos a resposta degrau e obtivemos as curvas da figura 5.15. Estas curvas realmente se assemelham as curvas medidas. Um fluxograma e um programa computacional utilizado para a determinação destes cálculos é mostrado no Apêndice IV.

5.5. - Comparação dos Resultados Obtidos pelos Modelos da ELECTRA e LAT.

Confrontando os resultados obtidos pelos dois modelos, vemos que embora os resultados calculados pelo modelo da ELECTRA se aproximem dos medidos em laboratório, a suposição de que as indutâncias e capacitâncias parasitas da coluna de alta tensão podem ser representadas por linhas sem perdas e de mesmas impedâncias de surto que as linhas do cabo vertical, é puramente arbitrária. As capacitâncias parasitas dependem exclusivamente da forma e dimensões do divisor. O modelo do LAT, embora tenha encontrado dificuldades na simulação da base do divisor, é mais realista, baseia-se no cálculo de capacitâncias parasi-

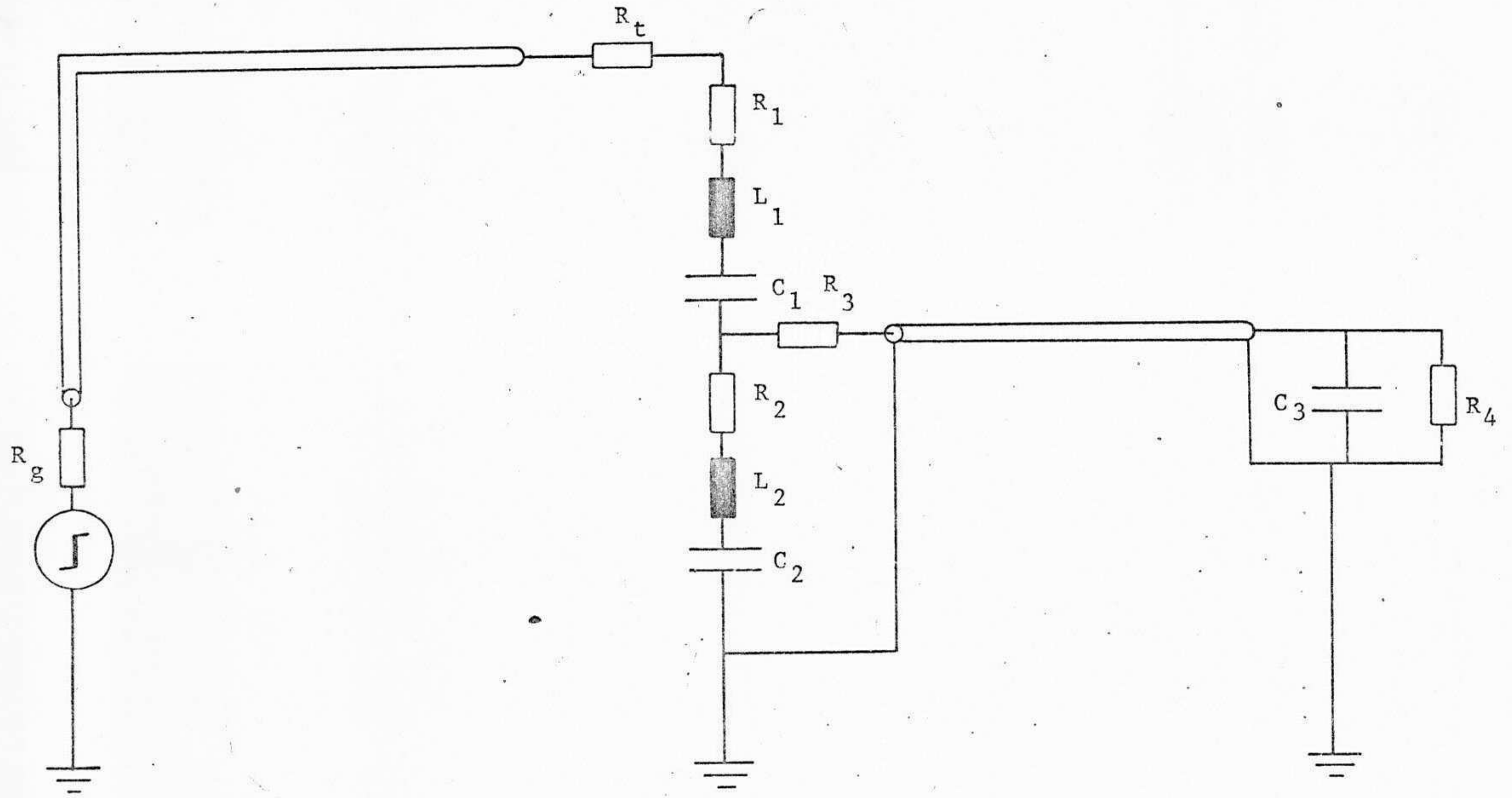


Figura 5.14. - Circuito utilizado para o cálculo da resposta incluindo as perdas e indutâncias residuais

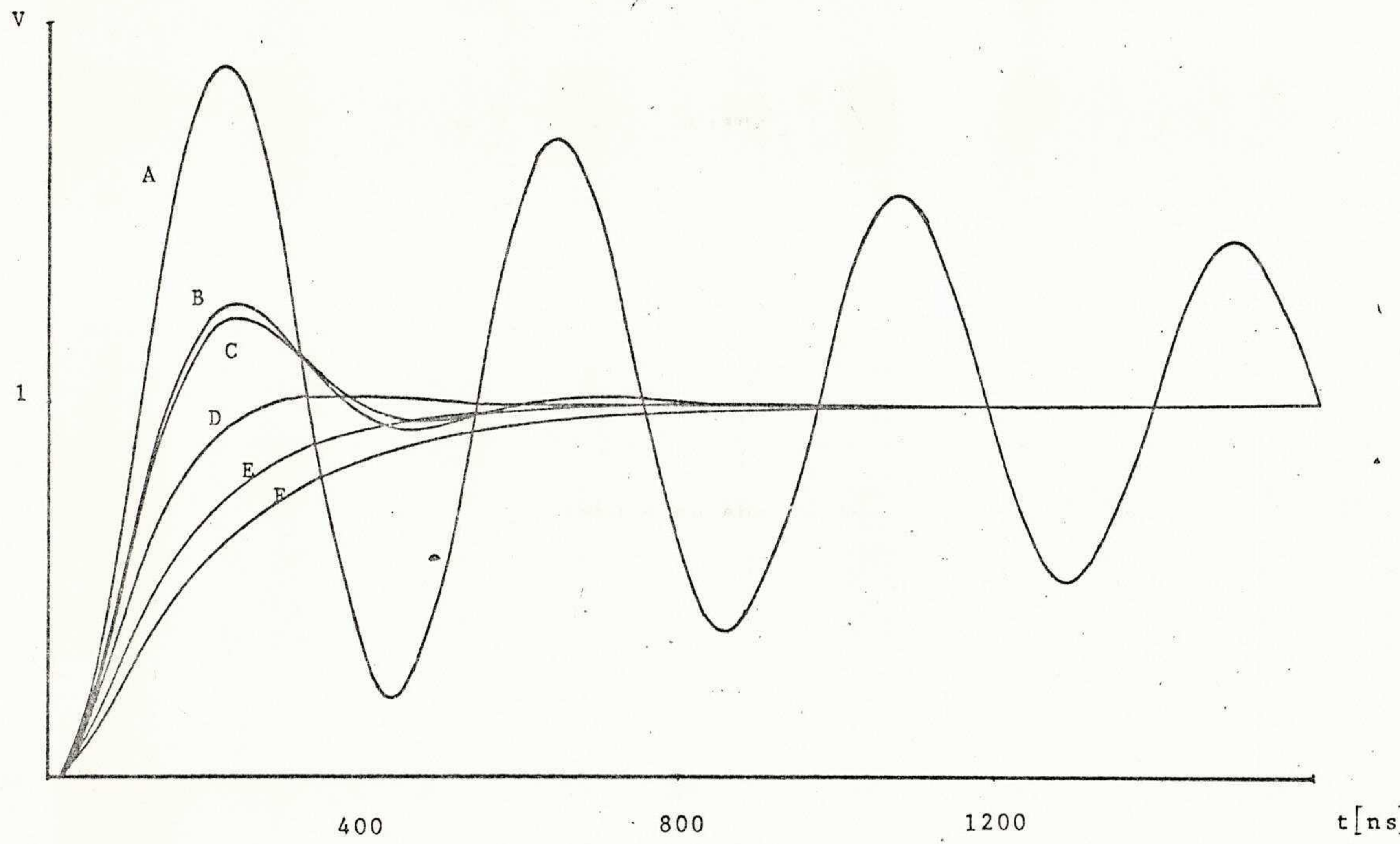


Figura 5.15 - Resposta degrau simulada incluindo as perdas e indutâncias de baixa e alta tensão

tas tendo como dados as dimensões reais do divisor. Ao contrário da ELECTRA, o modelo do LAT apresenta as seguintes vantagens:

a) A capacitância parasita total entre o eletrodo de alta tensão e a terra é exatamente igual do valor calculado das capacitâncias pela presença do campo eletrostático.

b) A distribuição de potencial ao longo do divisor é igual à distribuição calculada devido ao campo eletrostático.

Através da simulação digital conseguimos um circuito equivalente para o sistema de medição de tensão de impulso do LAT. Com esse circuito podemos fazer simulações da tensão aplicada no objeto de teste e corrigir a defasagem e a diferença entre os picos das tensões sobre o osciloscópio e sobre o objeto de teste.

C A P Í T U L O V I

CONCLUSÃO

Dois modelos usados para a representação de divisores capacitivos foram investigados.

1 - Modelo do LAT

2 - Modelo da ELECTRA

No primeiro, o método de simulação de cargas foi utilizado para determinar a distribuição de capacitâncias parasitas ao longo do divisor. No segundo, as capacitâncias parasitas juntamente com as indutâncias da coluna de alta tensão, foram representadas por linhas de transmissão sem perdas.

Os modelos apresentados foram utilizados no cálculo da resposta degrau do sistema de medição de tensão de impulso do LAT. A resistência e indutância do divisor foram determinadas, e incluídas nos cálculos. A resposta degrau do sistema também foi medida em laboratório. As curvas calculadas e medidas foram comparadas.

De acordo com os resultados obtidos podemos concluir que:

- As curvas calculadas pelos dois modelos apresentaram pequenas discrepâncias em relação às suas medidas, logo estes modelos podem representar de maneira razoável, o divisor do LAT.
- Para divisores de tensão de dimensões maiores convém utilizar o modelo do LAT, visto que ele calcula a distribuição de capacitâncias parasitas tendo como base as dimensões reais do divisor.
- Conseguimos um circuito equivalente para o sistema de medição do LAT.

A simulação das tensões induzidas por radiações eletromagnéticas fica como sugestão para o próximo trabalho.

APÊNDICE I

SIMULAÇÃO DE CARGAS

O campo elétrico de uma região sem cargas pode ser obtido pela solução das equações de Laplace e condições de contorno do sistema. Para sistemas de configurações simples métodos analíticos são empregados na solução das equações. Para configurações mais complexas, métodos numéricos são mais adequados. O método da simulação de cargas é muito utilizado em cálculo de campos elétricos em alta tensão.

O efeito da distribuição de cargas sobre uma superfície condutora pode ser simulado por um conjunto de cargas fictícias colocadas no interior dessa superfície. As cargas fictícias devem ser distribuídas de modo que integrados, seus efeitos satisfaçam as condições de contorno do sistema. Vejamos por exemplo o sistema da figura A.I.1. O sistema é constituído de uma esfera carregada(com potencial V na superfície) no espaço va

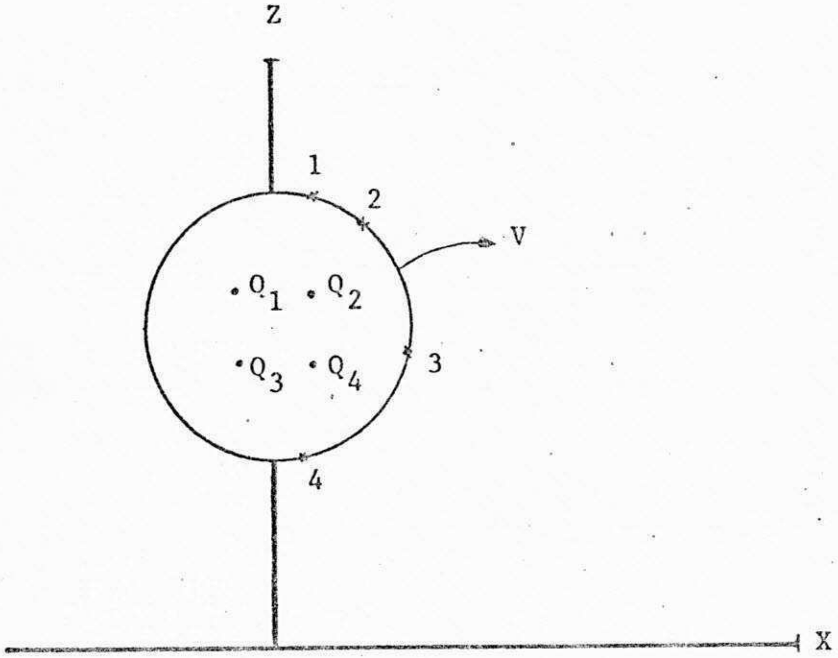


Fig. A.I.1

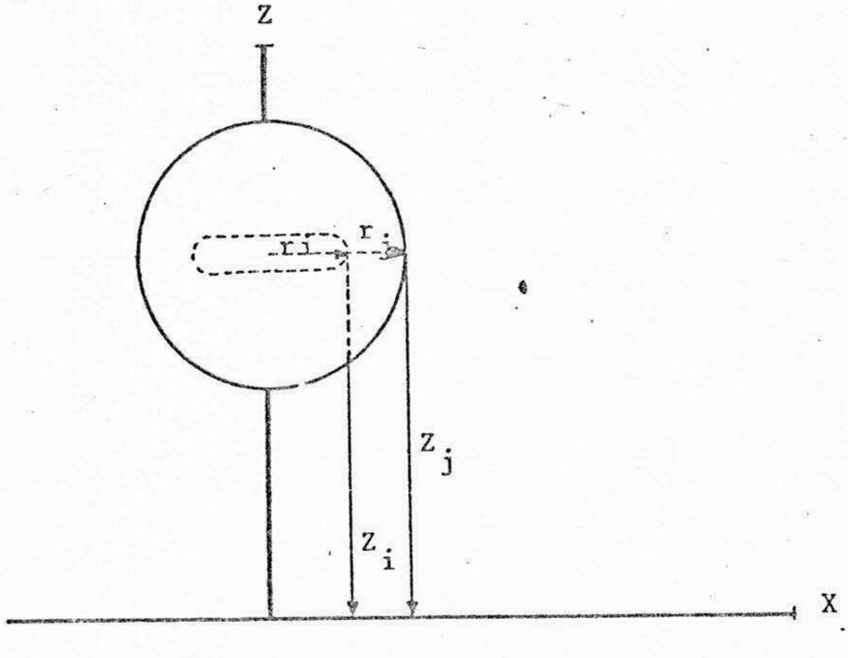


Fig. A.I.2

zio. As cargas fictícias são colocadas no interior da esfera de modo que todas as cargas conjuntamente produzam um potencial V na superfície.

As intensidades das cargas fictícias podem ser calculadas escolhendo-se um número igual de pontos de checagem no contorno. No exemplo acima escolhemos 4 cargas e portanto quatro pontos de checagem no contorno. O potencial calculado em todos os pontos do contorno pela superposição dos efeitos das cargas deve ser V.

As cargas fictícias normalmente utilizadas são: cargas pontuais, linhas de carga e anéis de carga. A escolha do tipo da carga para simulação, dependerá do perfil do sistema estudado. Para perfis axialmente simétricos normalmente utiliza-se anéis de carga.

A seguinte equação é utilizada no cálculo de cargas fictícias:

$$\sum_{i=1}^{n} P_{ji} \cdot Q_i = \phi cj \qquad \text{(A.I.1)}$$

Pji são os coeficientes de potencial associados as cargas.

Q_i são as cargas fictícias.

ϕcj é o potencial do contorno.

Os coeficientes de potencial dependem do tipo de carga escolhido para a simulação. Divisores de tensão apresentam perfis axialmente simétricos, neste caso, o emprego de anéis de carga é mais conveniente. Para anéis de carga Pij pode ser calculado pela expressão |14|:

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{K(K_1)}{\alpha_1} - \frac{K(K_2)}{\alpha_2} \right] \qquad (A.I.2)$$

onde:

$$\alpha_1 = \sqrt{(r_i+r_j)^2 + (Z_i-Z_j)^2}$$

$$\alpha_2 = \sqrt{(r_i+r_j)^2 + (Z_i+Z_j)^2}$$

$$K_1 = \frac{2.\sqrt{r_i-r_j}}{\alpha_1}$$

$$K_2 = \frac{2.\sqrt{r_i.r_j}}{\alpha_2}$$

Sendo K(k) uma integral elíptica da primeira espécie. Os termos de índice "i" referem-se à posição das cargas e os de índice "j" referem-se aos pontos do contorno; r representa o raio em questão e Z o comprimento sobre o eixo de simétrico em relação ao plano de referência(figura A.I.2).

Podemos representar a equação(A.I.1) na forma matricial. Assim, temos:

$$[P] \cdot [Q] = \phi C$$

ou seja:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & & P_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi C_1 \\ \phi C_2 \\ \vdots \\ \phi C_n \end{bmatrix}$$

Conhecendo os coefientes de potencial e os potenciais de contorno, podemos inverter a matriz P e obter os valores das cargas fictícias.

Depois do cálculo da intensidade das cargas, devemos checar se o conjunto satisfaz as condições de contorno do sistema. Para que a precisão desse método de simulação seja boa, a diferença entre os potenciais de contorno e os calculados devem ser mínimas. Feito isso podemos calcular o potencial em qualquer região do espaço fora da superfície condutora, pela superposição dos efeitos das cargas.

APÊNDICE II

CÁLCULO COMPUTACIONAL DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

A.II.1. - Introdução

Hermann Dommel desenvolveu um método para o cálculo de transitórios eletromagnéticos. O método de Dommel consiste em calcular a tensão de todos os nós de um circuito em função do tempo t. A solução de transitórios em computadores necessita de um procedimento passo a passo ao longo do eixo dos tempos em intervalos de tempo Δt, em geral fixo. Partindo de $t=0$, conseguimos determinar as tensões em $t=\Delta t$, $2\Delta t$, $3\Delta t, \ldots,$ até um tempo máximo $t_{máx}$. Para o cálculo das tensões em um tempo t, precisa-se conhecer as tensões dos mesmos nós em $t - \Delta t$, $t-2\Delta t$, $t-3\Delta t, \ldots,$ $t - \zeta$. Analisemos primeiramente uma linha de transmissão monofásica(seu comportamento é o mesmo que o cabo de alta tensão de um divisor de tensão) e logo após os elementos com parâmetros concentrados (resistências, indutâncias e capacitâncias). Posteriormente descreveremos o procedimento computacional adequado ao cálculo de transitórios.

A.II.2. - Linha de Transmissão sem Perdas

Consideremos uma linha monofásica sem perdas(as perdas serão incluídas posteriormente) com indutância ℓ e capacitância c por unidade de comprimento). Em um ponto 'x' qualquer ao longo da linha, tensões e correntes obedecem as equações:

$$- \frac{\partial e}{\partial x} = \ell \frac{\partial i}{\partial t} \qquad \text{(A.II.1)}$$

$$- \frac{\partial i}{\partial x} = c \frac{\partial e}{\partial t} \qquad \text{(A.II.2)}$$

A solução geral dessas equações é:

$$i(x,t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \qquad \text{(A.II.3)}$$

$$e(x,t) = Z.f_1(x-vt) - Z.f_2(x+vt) \qquad \text{(A.II.4)}$$

f_1 e f_2 são funções das variáveis (x-vt) e (x+vt) respectivamente. Fisicamente f_1(x-vt) é uma onda viajante progressiva com velocidade v, e f_2(x+vt) é uma onda viajante regressiva com a mesma velocidade v.Z(impedância de surto da linha) e v podem ser calculados por:

$$Z = \sqrt{\ell/c} \qquad \text{(A.II.5)}$$

$$v = 1/\sqrt{\ell.c}$$

As equações (A.II.3) e (A.II.4) podem ser combinadas de modo que:

$$e(x,t) + Z.i(x,t) = 2Z.f_1(x-vt) \qquad \text{(A.II.6)}$$

$$e(x,t) - Z.i(x,t) = 2Z.f_2(x+vt) \qquad \text{(A.II.7)}$$

Se (x-vt) é constante em (A.II.6) o lado esquerdo dessa equação (e + Zi) será também constante. Se(x+vt) é constante em (A.II.7), (e - Zi) será também constante.

Suponha um observador fictício viajando ao longo da linha na direção progressiva com velocidade v. (x-vt) e consequentemente (e + Zi) serão constantes para o observador. Seja "ζ" o tempo de trânsito entre os terminais "m" e "k" (figura A.II.1a) da linha. A tensão (e + Zi) encontrada pelo observador quando ele se encontra no nó "m" num tempo t - ζ deve permanecer a mesma quando ele chega ao nó "k" em um tempo t. Matematicamente teremos:

$$e_m(t-\zeta) + Z.i_{mk}(t-\zeta) = e_k(t) + Z.\{-i_{km}(t)\} \qquad \text{(A.II.8)}$$

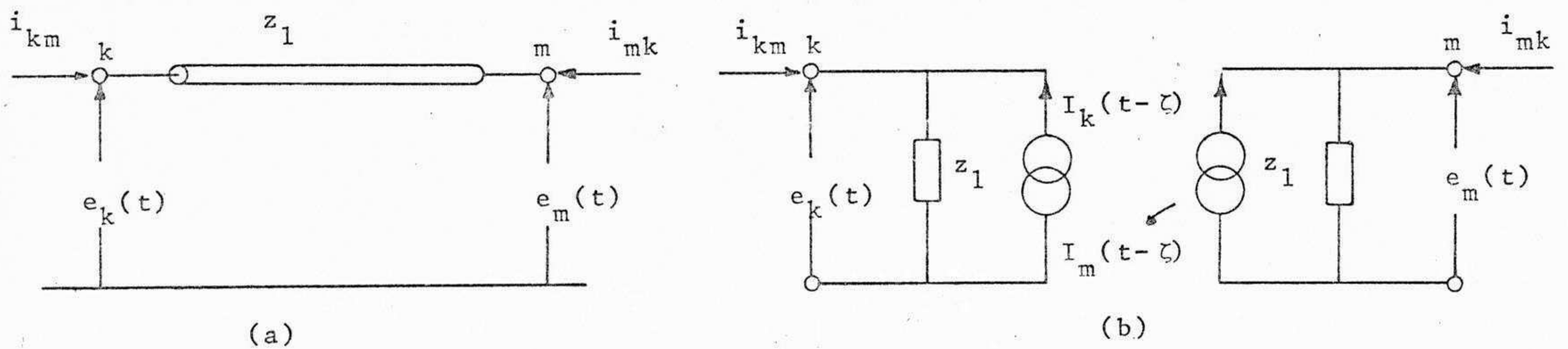


Figura A.II.1

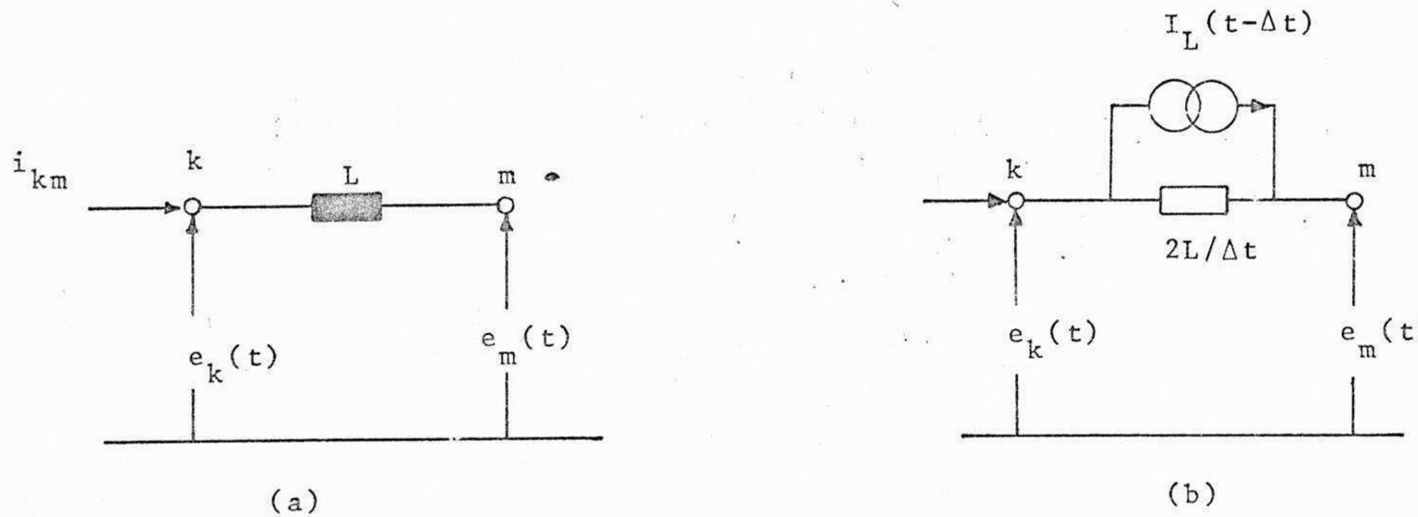


Figura A.II.2

Da equação(A.II.8), temos:

$$i_{km}(t) = (1/Z)\ e_k(t) - I_k(t-\zeta) \qquad \text{(A.II.9)}$$

$$i_{mk}(t) = (1/Z)\ e_m(t) - I_m(t-\zeta) \qquad \text{(A.II.10)}$$

onde

$$I_k(t-\zeta) = (1/Z)\ e_m(t-\zeta) + I_{mk}(t-\zeta) \qquad \text{(A.II.11)}$$

$$I_m(t-\zeta) = (1/Z)\ e_k(t-\zeta) + I_{km}(t-\zeta) \qquad \text{(A.II.12)}$$

A figura A.II.1b mostra o circuito equivalente de uma linha sem perdas. Como é visto no circuito, os terminais estão desacoplados. Um terminal sente a presença da tensão no outro, depois de um tempo de atraso "ζ".

A.II.3 - Pârametros Concentrados

A.II.3.1 - Indutância

Considere a indutância L entre os nós k e m da figura A.II.2a. A tensão entre os nós k e m pode ser obtida por

$$e_{km} = L\ di_{km}/dt \qquad \text{(A.II.13)}$$

Integrando de um tempo $t-\Delta t$ a t, temos:

$$\int_{t-\Delta t}^{t} di_{km} = \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^{t} e_{km}\, dt$$

Utilizando a regra do trapézio, teremos:

$$i_{km}(t) - i_{km}(t-\Delta t) = (1/L) \cdot (\Delta t/2) \cdot \{e_{km}(t) + e_{km}(t-\Delta t)\} \qquad (A.II.14)$$

Da equação(A.II.14) teremos:

$$i_{km}(t) = (\Delta t/2L) \cdot e_{km}(t) + I_k\,(t-\Delta t) \qquad (A.II.15)$$

Onde

$$I_k\,(t-\Delta t) = (\Delta t/2L) \cdot e_{km}(t-\Delta t) + I_k(t-2\Delta t) \quad (A.II.16)$$

A figura A.II.2b mostra o circuito equivalente de uma indutância.

A.II.3.2 - Capacitância

Considere a capacitância C da figura A.II.3a. Matema-

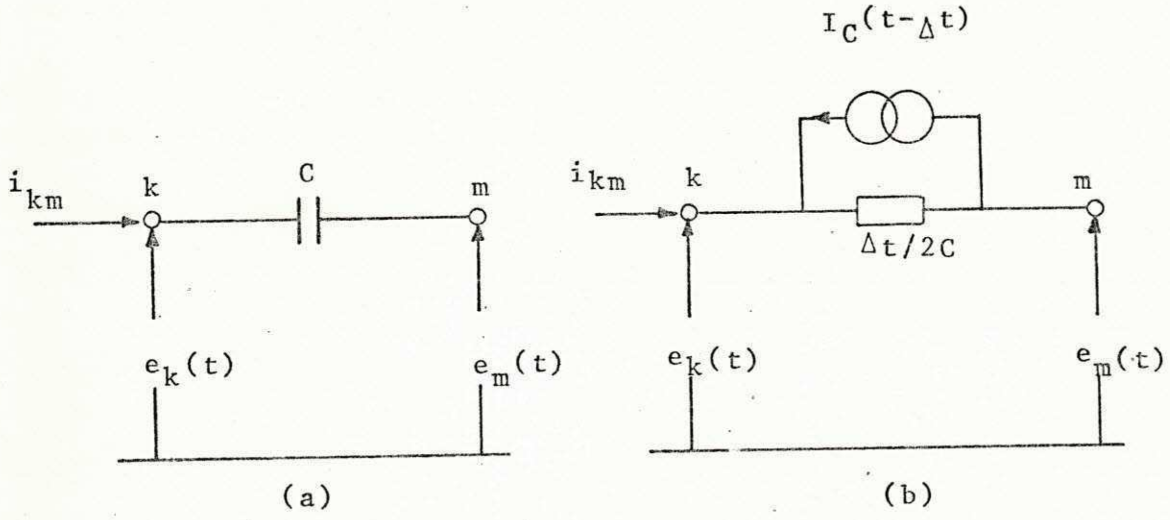


Figura A.II.3

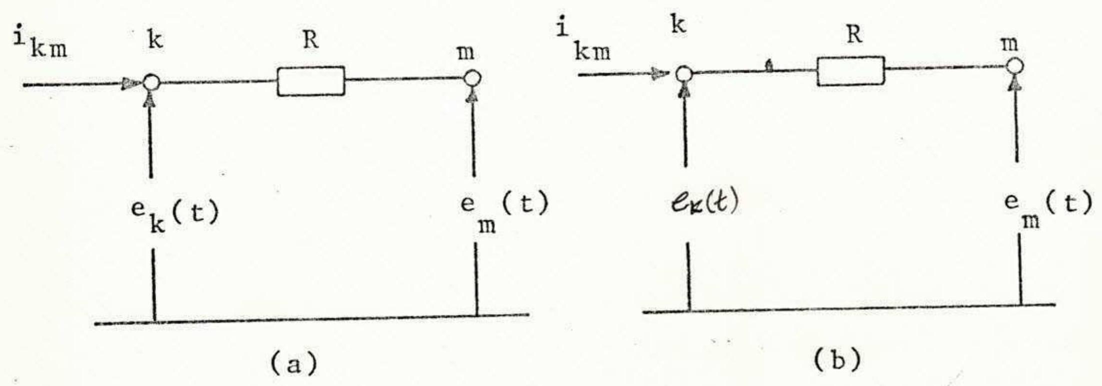


Figura A.II.4

ticamente temos:

$$i_{km}(t) = C \frac{d}{dt}\{e_{km}(t)\} \qquad (A.II.17)$$

Integrando de $(t-\Delta t)$ a t, temos:

$$\int_{t-\Delta t}^{t} de_{km} = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^{t} i_{km}\, dt$$

Usando a regra do trapézio

$$e_{km}(t) - e_{km}(t-\Delta t) = (1/C) \;.\; (\Delta t/2)\; \{i_{km}(t) + i_{km}(t-\Delta t)\} \qquad (A.II.18)$$

Daí, temos:

$$i_{km}(t) = (2C/\Delta t) \;.\; e_{km}(t) - I_K(t-\Delta t) \qquad (A.II.19)$$

Onde

$$I_K(t-\Delta t) = (2C/\Delta t) \;.\; e_{km}(t-\Delta t) + I_K(t-2\Delta t) \qquad (A.II.20)$$

A figura A.II.3b mostra o circuito equivalente de uma capacitância concentrada entre os terminais m e k.

A.II.3.3- Resistência

Observemos o circuito da figura A.II.4a. A equação governante será:

$$i_{km}(t) = (1/R) \, . \, (e_k(t) - e_m(t)) \qquad \text{(A.II.21)}$$

O circuito equivalente para este caso é mostrado na figura A.II.4b.

A.II.4. - Linha de Transmissão com Perdas

As perdas de uma linha podem ser representadas pela inserção da resistência total, concentrada em suas extremidades. Normalmente divide-se a resistência total R em dois elementos concentrados R/2 nos seus terminais(figura A.II.5). R também pode ser introduzido em outros pontos da linha. Isto equivale a dividir a linha em várias outras. Cálculos computacionais |6| mostraram que a divisão da linha em mais de duas não é conveniente visto que a precisão dos resultados permanece praticamente a mesma. A figura A.II.6 mostra uma linha de transmissão com perdas dividida em dois segmentos. O circuito equivalente é o mesmo que o de uma linha sem perdas. Apenas as fontes e os elementos de circuito sofrem algumas alterações.

$$i_{km}(t) = (1/Ze) \, . \, e_k(t) - I_k(t-\zeta) \qquad \text{(A.II.22)}$$

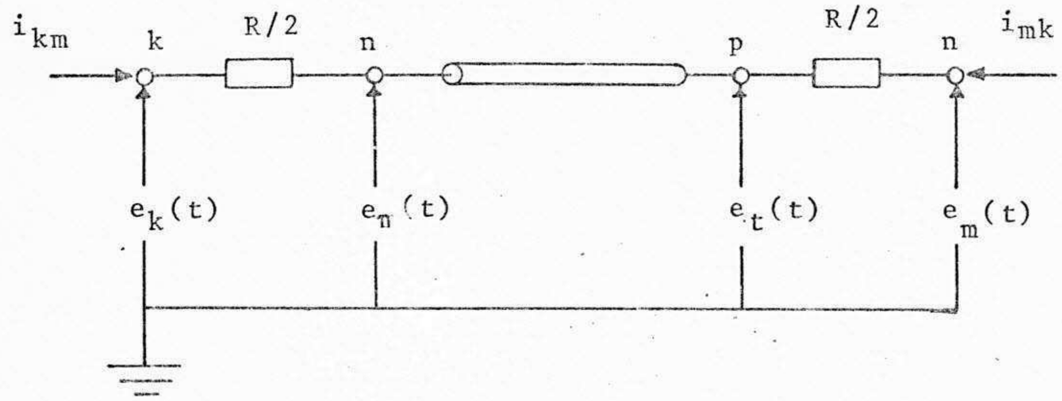


Figura A.II.5

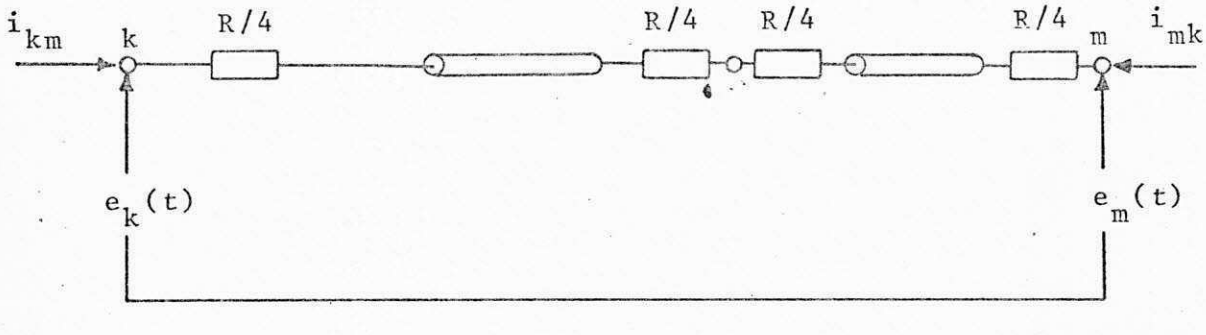


Figura A.II.6

$$i_{mk}(t) = (1/Ze) \cdot e_m(t) - I_m(t-\zeta) \qquad (A.II.23)$$

$$Ze = Z + R/4$$

$$I_k(t-\zeta) = ((1+h)/2) \cdot ((1/Z) \cdot e_m(t-\zeta) + I_K(t-\zeta)) +$$

$$((1-h)/2) \cdot ((1/Z) \cdot e_k(t-\zeta) + I_m(t-\zeta)) \qquad (A.II.24)$$

$$I_m(t-\zeta) = ((1+h)/2) \cdot ((1/Z) \cdot e_k(t-\zeta) + I_m(t-\zeta) +$$

$$((1-h)/2) \cdot ((1/Z) \cdot e_m(t-\zeta) + I_K(t-\zeta)) \qquad (A.II.25)$$

onde

$$h = (Z - R/4)/(Z+R/4)$$

A.II.5 - Procedimento computacional

Substituindo todos os elementos das malhas de um circuito por seus circuitos equivalentes, podemos obter as equações nodais do sistema. Como resultado temos um sistema de equações lineares que fornecem informações do circuito em um tempo t.

$$[Y] \cdot [e(t)] = [i(t)] - [I] \qquad (A.II.26)$$

Onde

[Y] matriz admitância nodal,

[e(t)] vetor coluna das tensões nodais num tempo t,

$[i(t)]$ vetor coluna de correntes nodais injetadas (fontes de corrente ligando qualquer nó ao nó de referência),

$[I]$ vetor coluna conhecido(representam a "história passada" das malhas).

A formação de $|Y|$ segue as regras da matriz admitância nodal em análise de regime permanente.

Na equação A.II.26 parte das tensões serão conhecidas (excitações) e outras desconhecidas. Particionando a matriz condutância e os vetores de correntes, obtemos um subconjunto A de nós cujas tensões são desconhecidas e um subconjunto B de nós cujas tensões são conhecidas.

$$\begin{bmatrix} [Y_{AA}] & [Y_{AB}] \\ [Y_{BA}] & [Y_{BB}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [e_A(t)] \\ [e_A(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i_A(t)] \\ [i_B(t)] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [I_A] \\ [I_B] \end{bmatrix} \qquad \text{(A.II.27)}$$

Daí, temos:

$$[Y_{AA}]\ [e_A(t)] = [I_{tot}] - [Y_{AB}] \cdot [e_B(t)] \qquad \text{(A.II.28)}$$

Onde

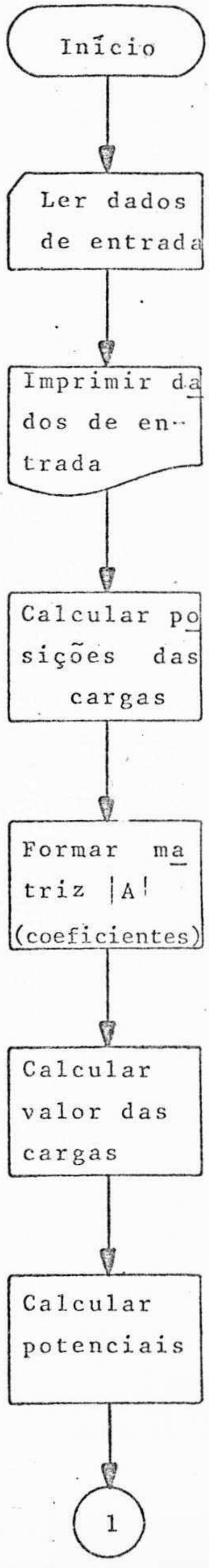
$$[I_{tot}] = [i_A(t)] - [I_A] \qquad \text{(A.II.29)}$$

O cálculo computacional de transitórios finalmente po de ser conseguido resolvendo um sistema de equações lineares. O lado direito de A.II.28 deve ser calculado no início de cada passo de tempo Δt.

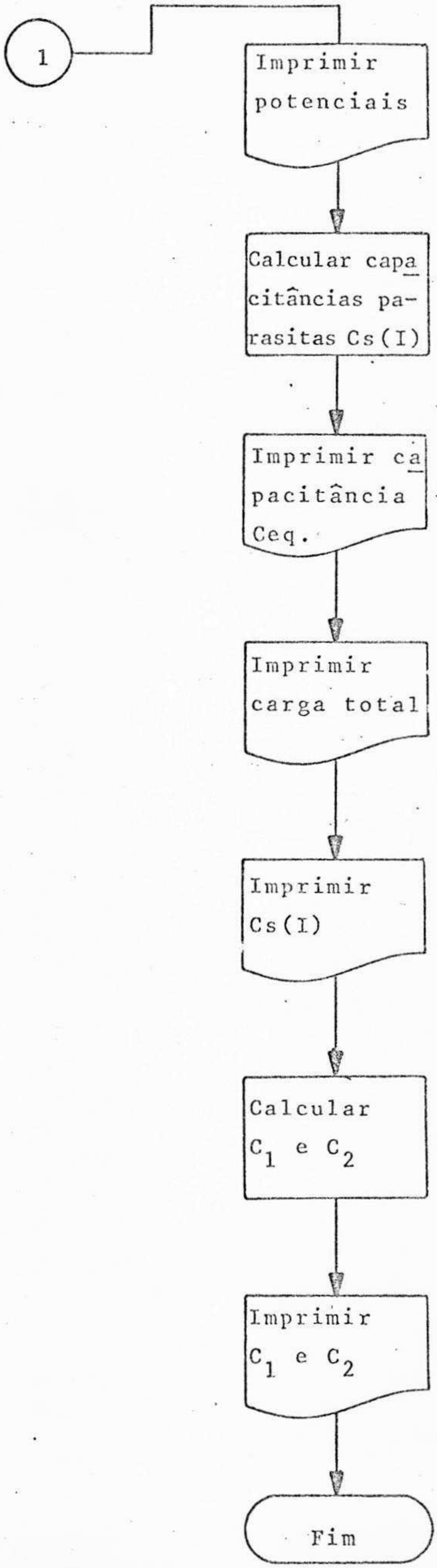
APÊNDICE III

CÁLCULO COMPUTACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE CAPACITÂNCIAS PARASITAS

FLUXOGRAMA



Início
Ler dados de entrada
Imprimir dados de entrada
Calcular posições das cargas
Formar matriz |A| (coeficientes)
Calcular valor das cargas
Calcular potenciais
1



1
Imprimir potenciais
Calcular capacitâncias parasitas Cs(I)
Imprimir capacitância Ceq.
Imprimir carga total
Imprimir Cs(I)
Calcular C_1 e C_2
Imprimir C_1 e C_2
Fim

PROGRAMA COMPUTACIONAL

```
JOB            WASHINGTON,PAGES=50,TIME=5
C EXT
      --------------------------------------------------------------------------
      PROGRAMA QUE CALCULA A DISTRIBUICAO DE CAPACITANCIAS PARASITAS
          AO LONGO DO EIXO DE SIMETRIA DO DIVISOR CAPACITIVO DO LAT
      --------------------------------------------------------------------------
      REAL RS(180),ZS(180),RC(180),ZC(180),E(50),FI(180),Q(180),H(50),
     *    CS(50),Y1(1,50)
      COMMON/NAMI/A(180,180),JPIV(180)
      --------------------------------------------------------------------------

      ------------------------ DADOS DO PROBLEMA ------------------------------

  TPAT - TOPO PLANO DO ELETRODO DE ALTA TENSAO =12.00 CM

  DEAT - DIAMETRO DO ELETRODO DE ALTA TENSAO =22.40 CM

  EEAT - ESPESSURA DO ELETRODO DE ALTA TENSAO = 10.40 CM

  R1  - RAIO DE CURVATURA DO ELETRODO DE ALTA TENSAO = 5.2 CM

  DICAT - DIAMETRO DA COLUNA DE ALTA TENSAO = 12.10 CM

  HBDC - ALTURA DA BASE DO DIVISOR CAPACITIVO = 19.68

  DIBD - DIAMETRO DA BASE DO DIVISOR = 40.80 CM

  HATD - ALTURA TOTAL DO DIVISOR CAPACITIVO = 219,30 CM

  RTOR - RAIO (UM QUARTO DE TOROIDE)=6.70

  CAPAT - CAPACITOR DE ALTA TENSAO = 400 PICOFARADS

  CAPBT - CAPACITOR DE BAIXA TENSAO = 0.2 MICROFARADS

  DICPT - DIAMETRO DA CAIXA INTERNA DA BASE DO DIVISOR = 22.00 CM

  NTPAT - NUMERO DE ANEIS DE CARGA NO TOPO DO ELETRODO DE ALTA TENSAO =

  NPEAT - NUMERO DE ANEIS DE CARGA NA BASE DO ELETRODO DE ALTA TENSAO =

  NCEAT - NUMERO DE ANEIS DE CARGA NA CURVATURA DO ELETRODO DE ALTA TEN

  NTOR - NUMERO DE ANEIS DE CARGA  EM 1/4 DE TOROIDE  NA BASE DO DIVISO

  NPTOR - NUMERO DE ANEIS DE CARGA NA PARTE PLANA DO 1/4 DO TOROIDE = 1

  NCBD - NUMERO DE ANEIS DE CARGA NA CURVATURA DA BASE DO DIVISOR=15

  NPBBD - NUMERO DE ANEIS DE CARGA NA PARTE PLANA DA BASE DO DIVISOR =

  NCV1BD - NUMERO DE ANEIS DE CARGA NA PARTE VERTICAL (1/4 DO TOROIDE)

  NCV2BD - NUMERO DE ANEIS DE CARGA NAS PARTES VERTICAIS DA BASE DO DIV
                                                                       V

  NCCPT - NUMERO DE ANEIS DE CARGA EM QUALQUER DAS CURVATURAS DA BASE D
```

```
      ------------------------------------------------------------------
      READ,TPAT,DEAT,EEAT,R1,DICAT,HBDC,
     1     DIBD,HATD,HTOR,DICBT,CAPAT,CAPBT,
     2     NTPAT,NPDAT,NCEAT,NTOR,NCBD,NPTOR,
     3     NPPBD,NCV1BD,NCV2BD,NUPCN
      WRITE(6,1)
    1 FORMAT(1H1)
      WRITE(6,2)
    2 FORMAT(///,2X,' ---------------DADOS DO PROBLEMA --------------')
      WRITE(6,3)TPAT,DEAT,EEAT,R1,DICAT,HBDC
    3 FORMAT(////,2X,'TPAT=',F7.4,'M',4X,'DEAT=',
     1       F7.4,'M',4X,'EEAT=',F7.4,'M',4X,
     2     'DICAT=',F7.4,'M',4X,'HBDC=',F7.4,'M',
     3     '  R1=',F7.4,'M')
      WRITE(6,4)DIBD,HATD,HTOR,DICBT,CAPAT,CAPBT
    4 FORMAT(////,2X,'DIBD=',F7.4,'M',4X,'HATD=',
     1       F7.4,'M',4X,'HTOR=',F7.4,'M',4X,
     2     'DICBT=',F7.4,'M',4X,'CAPAT=',E9.2,'F',4X,
     3     'CAPBT=',E9.2,'F')
      WRITE(6,5)NTPAT,NPDAT,NCEAT,NTOR,NCBD,NPTOR
    5 FORMAT(////,2X,'NTPAT=',I4,7X,'NPDAT=',I4,7X,
     1     'NCEAT=',I4,7X,'NTOR=',I4,7X,'NCBD=',I4,
     2     7X,'NPTOR=',I4,7X)
      WRITE(6,6)NPPBD,NCV1BD,NCV2BD,NUPCN
    6 FORMAT(////,2X,'NPPBD=',I4,7X,'NCV1BD=',I4,7X,
     1     'NCV2BD=',I4,7X,'NUPCN=',I4)

      ------------------------------------------------------------------
       DISPOSICAO DAS CARGAS NO ELETRODO DE ALTA TENSAO
      ------------------------------------------------------------------


      -------------------- NA CURVATURA DO ELETRODO --------------------

      PI = 3.14159
      DELTAF=PI/NCEAT
      FATOR= SQRT(1+(1.3*DELTAF)**2)-1.3*DELTAF
      DO 10 I=1,NCEAT
         TETA =  DELTAF*(0.5+FLOAT(I-1))
         RS(I)=TPAT/2+FATOR*R1*SIN(TETA)
         ZS(I)=HATD-EEAT/2+FATOR*R1*COS(TETA)
         RC(I)=TPAT/2+R1*SIN(TETA)
         ZC(I)=HATD -EEAT/2+R1*COS(TETA)
   10 CONTINUE
C
C
C     -------------------- NO TOPO DO ELETRODO --------------------
C
      K1=NCEAT+1
      K2=NCEAT+NTPAT
      X=TPAT/(2*NTPAT)
      SOMA=0.
      DO 20 I=K1,K2
         SOMA=SOMA+1
         RS(I)=X*SOMA
         ZS(I)=ZS(1)
         RC(I)=RS(I)
         ZC(I)=HATD
```

```
   20 CONTINUE
C
C
C     -------------------- NA BASE DO ELETRODO ---------------
C
      K3=K2+1
      K4=K2+NRDAT
      DO 30 I=K3,K4
         RS(I)=RS(I-NRDAT)
         ZS(I)=ZS(NCEAT)
         RC(I)=RS(I)
         ZC(I)=HATO-REAT
   30 CONTINUE
C
C
C
C     --------------------------------------------------------------
C       DISPOSICAO DE CARGAS NA BASE DO DIVISOR
C     --------------------------------------------------------------
C
C
C     -------- NA CURVATURA DE 1/4 DO TOROIDE
C
C
      DELTAF=PI/(2*NTOR)
      FATOR= SQRT(1+(1.3*DELTAF)**2)-1.3*DELTAF
      N1=K4+1
      N2=K4+NTOR
      DO 40 I=N1,N2
         TETA =  DELTAF*(0.5+FLOAT(I-N1))
         RS(I)=DICAT/2+RTOR*FATOR*SIN(TETA)
         ZS(I)=HBDC+RTOR*FATOR*COS(TETA)
         RC(I)=DICAT/2+RTOR*SIN(TETA)
         ZC(I)=HBDC+RTOR*COS(TETA)
   40 CONTINUE
C
C  ---------- NA PARTE VERTICAL DO QUARTO DE TOROIDE  -----------
C
      N3=N2+1
      N4=N2+NCV2BD
      X6=(ZS(N1)-HBDC)/(NCV2BD+1)
      SOMA=0.
      DO 50 I=N3,N4
         SOMA=SOMA+1
         RS(I)=RS(N1)
         RC(I)=DICAT/2
         ZS(I)=ZS(N1)-X6*SOMA
         ZC(I)=ZS(I)
   50 CONTINUE
C
C
C  ------------ NA PARTE HORIZONTAL DO QUARTO DE TOROIDE ---------
C
      N5=N4+1
      N6=N4+NCV2RD
      X7=(DICRT/2-RS(N4))/NCV2RD
      SOMA=0.
      DO 55 I=N5,N6
         RS(I)=DICRT/2-X7*SOMA
         ZS(I)=ZS(N4)
```

```
         RC(I)=RS(I)
         ZC(I)=HBDC
         SOMA =SOMA+1
5     CONTINUE
C
C
C ---------------------------------------------------------------------------
C     --------- NA CURVATURA DA BASE DO DIVISOR -------------
C
C
       K5=N6+1
      K6=N6+NCBD
      DELTAF=PI/(2*NCBD)
      FATOR= SQRT(1+(1.3*DELTAF)**2)-1.3*DELTAF
C
      DO 60 I=K5,K6
         TETA =  DELTAF*(0.5+FLOAT(I-K5))
         RS(I)=DIBD/2-ETOR/5+(ETOR/5)*FATOR*SIN(TETA)
         ZS(I)=HBDC-ETOR/5+(ETOR/5)*FATOR*COS(TETA)
         RC(I)=DIBD/2-ETOR/5+(ETOR/5)*SIN(TETA)
         ZC(I)=HBDC-ETOR/5+(ETOR/5)*COS(TETA)
60    CONTINUE
C
C
C     ------------------ NA PARTE PLANA DA BASE DO DIVISOR -----------
C
C
      K7=K6+1
      K8=K6+NPPBD
      X1=(DIBD/2-ETOR/5-RS(N2))/NPPBD
      SOMA=0
      DO 70 I=K7,K8
         RS(I)=DIBD/2-ETOR/5-X1*SOMA
         ZS(I)=ZS(K5)
         RC(I)=RS(I)
         ZC(I)=HBDC
         SOMA=SOMA+1
70    CONTINUE
C
C
C     ------------- NA DIRECAO VERTICAL(FACE EXTERNA) DA BASE DO DIVIS
C
C
      K9=K8+1
      K10=K8+NCVIBD
      SOMA=0
      X2=(HBDC-ETOR/5)/NCVIBD
      DO 80 I=K9,K10
         RS(I)=RS(K8)
         ZS(I)=HBDC-ETOR/5-X2*SOMA
         RC(I)=DIBD/2
         ZC(I)=ZS(I)
         SOMA=SOMA+1
80    CONTINUE
C
C
C
C     ----------- NA PARTE VERTICAL(FACE INTERNA) DA BASE DO DIVISOR
```

```
C
      K15=K10+1
      K16=K10+NCV2BD
      SOMA=0
      X4=(HBDC-BTOF/5)/NCV2BD
      DO 110 I=K15,K16
         RS(I)=DIBD/2-RS(K6)+DICBT/2
         ZS(I)=HBDC-BTOF/5-X4*SOMA
         RC(I)=DICBT/2
         ZC(I)=ZS(I)
         SOMA=SOMA+1
  110 CONTINUE
C
C
C     -------------------------------------------------------------
C     DETERMINACAO DA MATRIZ DOS COEFICIENTES DE POTENCIAL
C     -------------------------------------------------------------
C
C
      DO 115 I=1,K16
      DO 115 J=1,K16
            PROD=RS(J)*RC(I)
            AK1=2.*SQRT(PROD)
            F31=RS(J)+RC(I)
            RS1=F31*F31
            F22=ZC(I)-ZS(J)
            RS2=F22*F22
            F24=ZC(I)+ZS(J)
            RS3=F24*F24
            RS4=2.*RS(J)
            AK2=SQRT(RS1+RS2)
            AM2=SQRT(RS1+RS3)
            AK=AK1/AK2
            AM=AK1/AM2
            CALL ELINK(AK,AM,EK,EM)
            A(I,J)=(EK/AK2-EM/AM2)*2/PI
  115 CONTINUE
C
C     -------------------------------------------------------------
C     CONDICAO DE CONTORNO
C     -------------------------------------------------------------
C
      DO 120 I=1,K4
         FI(I)=1.
  120 CONTINUE
      DO 130 I=N1,K16
         FI(I)=0.
  130 CONTINUE
C
C     -------------------------------------------------------------
C     DETERMINACAO DA INTENSIDADE DAS CARGAS
C     -------------------------------------------------------------
C
      CALL LUSOLV(FI,K16)
      DO 140 I=1,K16
         C(I)=FI(I)
  140 CONTINUE
C
C     -------------------------------------------------------------
C     CALCULO DO POTENCIAL EM DIVERSOS PONTOS DO EIXO DE SIMETRIA
```

```
C     ------------------------------------------------------------------
C
      NX=NUPCN-1
      Z=HATC-CEAT
      Z1=(Z-HPDC)/NX
      DO 150 I=1,NX
         H(I)=Z
         Z=Z-Z1
  150 CONTINUE
      H(NUPCN)=0.
      DO 170 I=1,NUPCN
         ESUM=0.
         DO 160 J=1,K1C
            RS1=RS(J)*RS(J)
            ZS1=(ZS(J)-H(I))**2
            ZS2=(ZS(J)+H(I))**2
            RS2=SQRT(RS1+ZS1)
            RS3=SQRT(RS1+ZS2)
            PIJ=1./RS2-1./RS3
            ESUM=ESUM+PIJ*Q(J)
  160    CONTINUE
         E(I)=ESUM
  170 CONTINUE
      WRITE(6,175)
  175 FORMAT(///,2X,'VALOR DO POTENCIAL ELETRICO',2X)
      WRITE(6,176)(E(M),M=1,NUPCN)
  176 FORMAT(6E18.6,/)
C
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     CARGA TOTAL NO ELETRODO DE ALTA TENSAO
C     ------------------------------------------------------------------
C
      NELEC=NTPAT+NBEAT+NCEAT
      QTOT=0
      DO 180 I=1,NELEC
         QTOT=QTOT+Q(I)
  180 CONTINUE
      QTOT=QTOT*4.*PI*8.854
C
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     CALCULO DAS CAPACITANCIAS PARASITAS
C     ------------------------------------------------------------------
      DO 190 I=1,NX
         J=I+1
         CS(I)=QTOT*1.E-12/(E(I)-E(J))
  190 CONTINUE
      CSUM=0.
      DO 191 I=1,NX
         CSUM=CSUM+1./CS(I)
  191 CONTINUE
      CEQ=1./CSUM
      WRITE(6,195)
  195 FORMAT(///,2X,'CAPACITANCIA PARASITA TOTAL= CEQ',2X)
      WRITE(6,196)CEQ
  196 FORMAT(/,E18.6)
      PRINT,' '
      PRINT,'CARGA TOTAL NO ELETRODO DE ALTA TENSAO =',QTOT*1.E-
      NX1=NX-1
```

```
      DO 200 I=1,NX1
         CS(I)=CS(I)+CAPAT*NX1
  200 CONTINUE
      CS(NX)=CS(NX)+CAPPT
      WRITE(6,205)
  205 FORMAT(///,2X,'VALOR DAS CAPACITANCIAS PARASITAS',2X)
      WRITE(6,215)(CS(I),I=1,NX)
  215 FORMAT(6E18.6,/)
      SUSC=0
      DO 220 I=1,NX1
         SUSC=SUSC+1/CS(I)
  220 CONTINUE
      C1=1/SUSC
      C2=CS(NX)
      WRITE(6,225)
  225 FORMAT(///,2X,'CAPACITANCIAS EQUIVALENTES DO '
     1                ,'BRACO DE ALTA E BAIXA TENSAO')
      WRITE(6,235)C1,C2
  235 FORMAT(/,2E18.6)
      WRITE(6,245)
  245 FORMAT(///)
      STOP
      END
C     ---------------------------------------------------------------
C     SUBROTINA LUSOLV
C     ---------------------------------------------------------------

      SUBROUTINE LUSOLV(BC,N)
      DIMENSION BC(180)
      COMMON/NAM1/A(180,180),JPIV(180)
      DO 4 I=1,N
      JPIV(I)=I
      I1=I+1
      IF( ABS(A(I,I)).LE.1.E-50) GO TO 1
      GO TO 15
    1 CONTINUE
      DO 14 J=I1,N
      IF(I.EQ.N) GO TO 20
      IF( ABS(A(J,I)).LE.1.E-50) GO TO 14
      JPIV(I)=J
      GO TO 16
   14 CONTINUE
      GO TO 20
   16 DO 2 K=1,N
      IPIV=JPIV(I)
      PIV=A(IPIV,K)
      A(IPIV,K)=A(I,K)
      A(I,K)=PIV
    2 CONTINUE
   15 IF(I.EQ.N) GO TO 3
      DO 8 J1=I1,N
    8 A(I,J1)=A(I,J1)/A(I,I)
      DO 4 J=I1,N
      DO 4 K=I1,N
    4 A(J,K)=A(J,K)-(A(J,I)*A(I,K))
    3 CONTINUE
      ENTRY FRBKC(BC,N)
      IFR=1
   64 DO 61 I=1,N
      IPIV=JPIV(I)
```

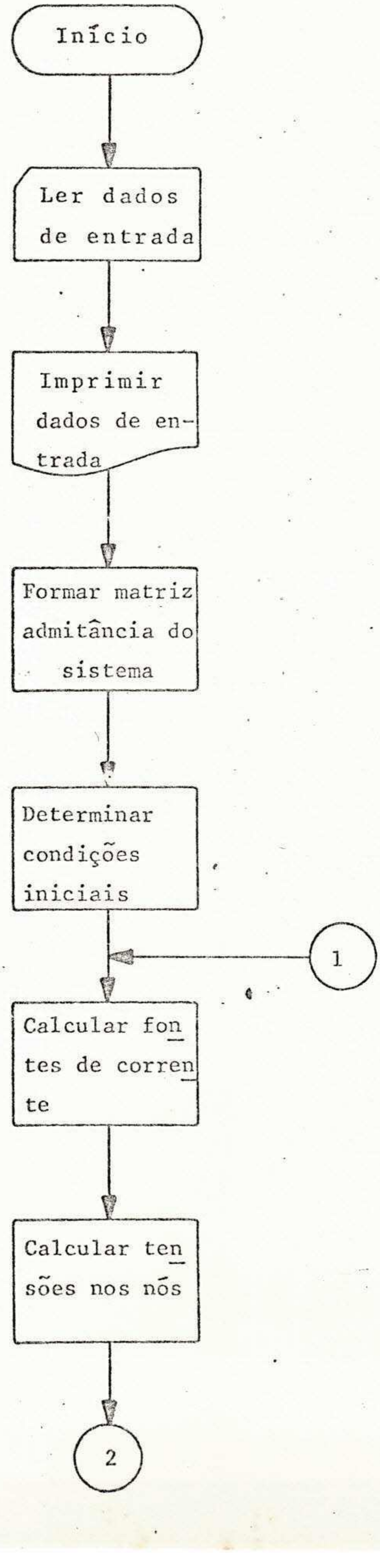
```
      IF(IPIV.LE.I) GO TO 61
      J=I
      PIVA=BC(I)
   62 PIV=BC(IPIV)
      BC(IPIV)=PIVA
      JPIV(J)=-IPIV
      J=IPIV
      IPIV=JPIV(J)
      PIVA=PIV
      IF(IPIV.GT.0) GO TO 62
   61 CONTINUE
      DO 63 I=1,N
   63 JPIV(I)=IABS(JPIV(I))
      GO TO (65,165),IFB
C     FORWARD SUBSTITUTION
   65 DO 31 K=1,N
      SUM=0.0
      IF(K.EQ.1) GO TO 41
      MM=K-1
      DO 51 J=1,MM
   51 SUM=SUM+A(K,J)*BC(J)
   41 BC(K)=(1./A(K,K))*(BC(K)-SUM)
  31  CONTINUE
C     BACKWARD SUBSTITUTION
      DO 91 LL=1,N
      K=(N+1)-LL
      SUM=0.0
      IF(K.EQ.N) GO TO 81
      KK=K+1
      DO 71 J=KK,N
   71 SUM=SUM+A(K,J)*BC(J)
   81 BC(K)=BC(K)-SUM
  91  CONTINUE
      GO TO 30
   20 PRINT 21
   21 FORMAT('EQUATIONS ARE LINEARLY DEPENDENT')
      STOP
   30 CONTINUE
      RETURN
      ENTRY FKBWCT(BC,N)
      IFB=2
      GO TO 64
  165 DO 131 K=2,N
      L=K-1
      SUM=0.
      DO 151 J=1,L
  151 SUM=SUM+A(J,K)*BC(J)
      BC(K)=BC(K)-SUM
  131 CONTINUE
      DO 191 LL=1,N
      K=N-LL+1
      SUM=0.
      IF(K.EQ.N) GO TO 181
      KK=K+1
      DO 171 J=KK,N
  171 SUM=SUM+A(J,K)*BC(J)
  181 BC(K)=(BC(K)-SUM)/A(K,K)
  191 CONTINUE
      RETURN
      END
```

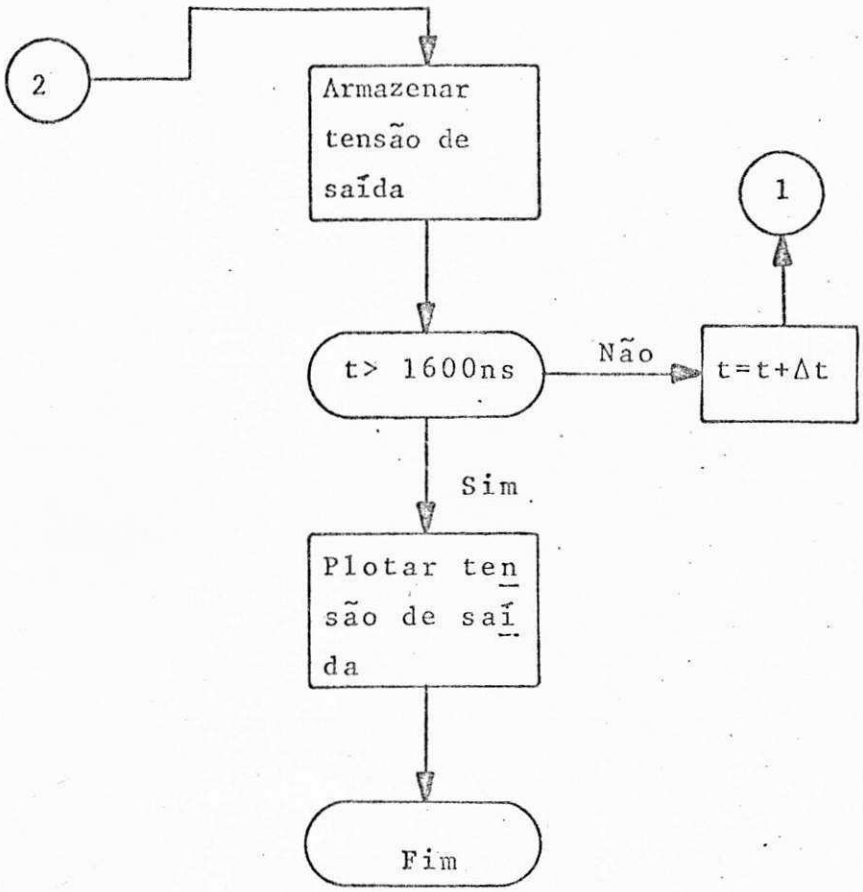
```
C       ------------------------------------------------------------------
        SUBROUTINE ELINK(XP,YP,ZP,WP)
        IMPLICIT REAL*4(A-H,O-Z)
C
C
        P=1.-XP*XP
        Q=1.-YP*YP
        IF(P.EQ.0.)GO TO 6
        ZP=1.38629436+P*(0.09666344+P*(0.03590092+P*(0.03742563+
      1    0.01451196*P)))-ALOG(P)*(0.5+P*(0.12498594+P*(0.06880248+
      2    P*(0.03328355+0.00441787*P))))
      5 IF(Q.EQ.0.)GO TO 7
        WP=1.38629436+Q*(0.09666344+Q*(0.03590092+Q*(0.03742563+
      1    0.01451196*Q)))-ALOG(Q)*(0.5+Q*(0.12498594+Q*(0.06880248+
      2    Q*(0.03328355+0.00441787*Q))))
        RETURN
      6 EX1=88.
        ZP=EXP(EX1)
        GO TO 5
      7 EX2=88.
        WP=EXP(EX2)
        RETURN
        END
C
$ENTRY
```

APÊNDICE IV

CÁLCULO COMPUTACIONAL DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉ TICOS

FLUXOGRAMA


Início
Ler dados de entrada
Imprimir dados de entrada
Formar matriz admitância do sistema
Determinar condições iniciais
1
Calcular fontes de corrente
Calcular tensões nos nós
2


2
Armazenar tensão de saída
1
t> 1600ns
Não
t=t+Δt
Sim
Plotar tensão de saída
Fim

PROGRAMA COMPUTACIONAL

```
[illegible]        WASHINGTON,PAGES=50,TIME=5
[illegible]
C     ------------------------------------------------------------------
C      ESTE PROGRAMA CALCULA A RESPOSTA DEGRAU DO DIVISOR CAPACITIVO
C         DO LABORATORIO DE ALTA TENSAO DA UFPB - CAMPINA GRANDE
C     ------------------------------------------------------------------
C
C
C         ----------- VARIAVEIS DE ENTRADA -------------
C
C     L1 - COMPRIMENTO DO CABO DE ALTA TENSAO
C
C     RL1 - RESISTENCIA DISTRIBUIDA DO CABO DA ALTA TENSAO
C
C     RAIO - RAIO DO CABO DE ALTA TENSAO
C
C     L2 - COMPRIMENTO DO CABO COAXIAL
C
C     RL2 - RESISTENCIA DISTRIBUIDA DO CABO COAXIAL
C
C     R3 - RESISTENCIA COLOCADA ENTRE O CABO COAXIAL
C                          E O DIVISOR DE TENSAO
C
C     C1 - CAPACITANCIA DE ALTA TENSAO
C
C     C2 CAPACITANCIA DE BAIXA TENSAO
C
C     C3 - CAPACITANCIA DO OSCILOSCÓPIO
C
C     R4 - RESISTENCIA INTERNA DO OSCILOSCOPIO
C
C     Z2 - IMPEDANCIA DE SURTO DO CABO COAXIAL
C
C     V1 - VELOCIDADE DE PROPAGACAO DE ONDAS VIAJANTES
C                            CABO DE ALTA TENSAO
C
C     V2 - VELOCIDADE DE PROPAGACAO DE ONDAS VIAJANTES NO CABO COAXIAL
C
C     NCS - NUMERO DE PARTES EM QUE FOI DIVIDIDO O CABO VERTICAL
C
C     DLCT - INDUTANCIA DA COLUNA DE ALTA TENSAO DO DIVISOR
C
C     RB - RESISTENCIA DE BAIXA TENSAO DO DIVISOR
C
C     RESISTENCIA DE ALTA TENSAO DO DIVISOR
C
C     DULOW - INDUTANCIA DE BAIXA TENSAO DO DIVISOR
C
C     DULOW - INDUTANCIA DE BAIXA TENSAO DO DIVISOR
C
C     DELT - INTERVALO DE TEMPO BASICO
C
C
C   -------------------------------------------------------------------
      DIMENSION COF(7),IPIV(7),YI(1,100),D(7,7),COR1(96),COR4(96),[illegible]
     *   CORF(96)
      COMMON/RACON/Z2,R2,C1,C2,DELT,Z1
      COMMON/DATEN/LOX,RD,ITI,V
      COMMON/ETFCOV/Z(4)
      COMMON/TECOEV/[illegible],R1,CONE,[illegible]
```

```
      COMMON/CORVP/VAUX(4)
      COMMON/DAFIX/RA,C2,NCS,N,NF,RX,IT2,H2,F(4)
      COMMON/CONDT/A(7,7),R2
      COMMON/TEMPVS/E1
      COMMON/COTP/COTOP(24)
      CALL DAFIX(FIND,FLCW,RP,RA)
      DO 90 MI=1,2
         READ,R2
         WRITE(6,5)R2
    5    FORMAT(///,2X,'VALOR DE R2=',F10.2,2X,'OHMS')
         R2=R2+RA
         R2=R2+RX*FLOAT(NCS)
         CALL CONDUT(N,FIND,FLCW,RP)
          YC=1./R4+2.*C3/DELT+1./Z2
          YC1=2.*C1/DELT
          YC2=2.*C2/DELT
          YC3=2.*C3/DELT
C
C
C        ---------- ARMAZENAMENTO DA MATRIZ A(I,J) NUMA MATRIZ AUXIL
C
         DO 10 I=1,N
         DO 10 J=1,N
            D(I,J)=A(I,J)
   10    CONTINUE
C
C
         DO 90 MM=1,3
            READ,R1
            WRITE(6,6)R1
    6       FORMAT(///,2X,'VALOR DE R1=',F10.2,2X,'OHMS')
C
C     --------- HISTORIA PASSADA DAS FONTES DE CORRENTES FICTICIAS -
C        ------------ ( ANTES DE INICIARMOS A CONTAGEM DO TEMPO ----
C
            DO 20 K=1,IT2
               COR1(K)=0.
               COR4(K)=0.
               COR5(K)=0.
               COTOP(K)=0.
   20       CONTINUE
            DO 30 I=1,NF
               ENC(I)=0.
               CONG(I)=0.
   30       CONTINUE
            DO 32 I=1,NOS
               VAUX(I)=0.
   32       CONTINUE
            CCLOW=0.
            CORIND=0.
            CORC1=0.
            CORC2=0.
            CORC3=0.
            ETOP=0.
            E4=0.
            DO 35 I=1,N
               E(I)=0.
   35       CONTINUE
            ENG(1)=0.5*(C1+C2)/C1*Z(1)/(R1+Z(1))
            ICONT=0
```

```
      IPLOT=0
      LSC=0
      FS=50.
      TAL=4.
      FATOR=(C1+C2)/C1
      M=K
C
      CTAL=TAL*ALOG(2.)
C     ----------   LOOP DE TEMPO   ----------------------
C
      WHILE(IPLOT.LE.99)DO
C
         CALL COEBAN(NOS)
         CORIND=2.*(E(3)-E(5))/RIND+CORIND
         COLOW=2.*E(6)/RLOW+COLOW
         CORC1=2.*YC1*(E(5)-E(2))-CORC1
         CORC2=2.*YC2*(E(2)-E(4))-CORC2
         CORC3=2.*YC3*E4-CORC3
         COR1(M)=((1.+H2)/2.)*(2.*E4/Z2-COR5(M-IT2))+
     1   ((1.-H2)/2.)*(2.*E(1)/Z2-COR1(M-IT2))
         COR5(M)=((1+H2)/2.)*(2.*E(1)/Z2-COR1(M-IT2))+
     2   ((1.-H2)/2.)*(2.*E4/Z2-COR5(M-IT2))
         COR4(M)=2.*ETOP/Z1-COTOP(M-IT1)
         COTOP(M)=2.*E(4)/Z1-COR4(M-IT1)
         IF(M.EQ.(2*IT2)) THEN DO
            DO 60 I=1,IT2
               J=I+IT2
               COR1(I)=COR1(J)
               COR4(I)=COR4(J)
               COR5(I)=COR5(J)
               COTOP(I)=COTOP(J)
 60         CONTINUE
            M=IT2
         END IF
         DO 40 I=1,NOS
            VAUX(I)=CONC(2*I-1)
 40      CONTINUE
         IF(E4.NE.0.) THEN DO
            IF(LSC.EQ.NF.OR.ICONT.EQ.0) THEN DO
               ICONT=1
               IPLOT=IPLOT+1
               Y1(1,IPLOT)=E4*FS
               LSC=0
            END IF
         END IF
         LSC=LSC+1
C
C     ------------ INCREMENTO NO TEMPO ------------
C
         K=K+1
         M=M+1
         ARG=K-IT2-1
         IF(ARG.GT.100)ARG=100.
         V=FATOR*(1.-EXP(-(ARG+CTAL)/TAL))
         CALL TENSAO(NOS,M,E1(2,Z1)
C
         COR(1)=COR1(M-IT2)
         COR(2)=CORC2-CORC1
         COR(3)=-CORINS
         COR(4)=COR4(M-IT1)
```

```
            CCR(5)=CCRC1+CCLIND
            CCR(6)=-CCRC2-CCLIDK
            CCR(7)=CCLIDK
            IF(K.EQ.(IT2+2)) THEN DO
               CALL ILSOLV(A,CCR,N,JPIV)
            ELSE DO
               CALL FRBKC(A,CCR,N,JPIV)
            END IF
C
            DO 100 I=1,N
               E(I)=CCR(I)
 100        CONTINUE
C
C       -------- TENSAO NA SAIDA DO OSCILOSCOPIO --------
C
C
               R4=(CCR5(M-IT2)+CCRC3)/Y2
          END WHILE
          CALL PLOT(Y),1,100,100)
C
          DO 70 I=1,N
          DO 70 J=1,N
             A(I,J)=D(I,J)
 70       CONTINUE
 80     CONTINUE
 90   CONTINUE
      STOP
      END
C     ----------------------------------------------------------------------
C                   ------------- SUBROTINA DAFIX -----------
C
      SUBROUTINE DAFIX(PIND,PLCK,RP,RA)
C     ----------------------------------------------------------------------
C
      REAL L1,L2
      COMMON/DACON/Z2,R3,C1,C2,DELT,Z1
      COMMON/DATEN/R2X,RD,IT1,V
      COMMON/DTECOV/Z(4)
      COMMON/DAFX/R4,C3,NOS,N,NF,RX,IT2,H2,F(4)
      READ,R3,R4,RL1,RL2,L1,L2,Z2
      READ,V1,V2,C1,C2,C3
      READ,NOS,RAIO,DUCT,DULCK,RP,RA
C
      WRITE(6,12)
      WRITE(6,1)
 1    FORMAT(///,2X,' ---------- DADOS DO PROBLEMA ----------')
      WRITE(6,2)R3,R4
      PRINT,' '
      PRINT,'RL1=',RL1,'  OHMS/METRO',',        RL2=',RL2,'  OHMS/METRO
      PRINT,' '
      PRINT,'DULCK=',DULCK,' HENRIES',',          DUCT=',DUCT,'  HENRIES
      PRINT,' '
 2    FORMAT(/,2X,'R3=',E10.4,2X,'OHMS',5X,'R4=',E10.4,2X,'OHMS')
C
C
      N=7
      NF=2*NOS
      RL1=RL1*L1
      RL2=RL2*L2
      RX=RL1/FLOAT(2*NF)
```

```
      R2X=2.*RX
      RD=RX*FLOAT(1+NOS)
      TR1=L1/(2.*V1)
      TR2=L2/V2
      DELT=TR1/FLOAT(NOS)
      PRINT,'DELT=',DELT,'  SEGUNDOS'
      WRITE(6,3)
    3 FORMAT(///,2X,'             CAPACITORES DE CIRCUITO')
      WRITE(6,4)C1,C2,C3
    4 FORMAT(/,2X,'C1=',E12.6,2X,'FARADS',5X,'C2=',E12.6,2X,
     *       'FARADS',5X,'C3=',E12.6,2X,'FARADS')
      WRITE(6,5)
    5 FORMAT(///,2X,'              COMPRIMENTO DOS CABOS (L1 E L2 ) ')
      WRITE(6,6)L1,L2
    6 FORMAT(/,2X,'L1=',F5.2,2X,'METROS',5X,'L2=',F5.2,2X,'METROS')
      WRITE(6,7)
    7 FORMAT(///,'         VELOCIDADES DE PROPAGACAO DAS ONDAS VIAJANT
     *ES CABOS')
      WRITE(6,8)V1,V2
    8 FORMAT(/,2X,'V1=',E12.6,2X,'METROS/SEG',5X,
     *             'V2=',E12.6,2X,'METROS/SEG')
      WRITE(6,9)
    9 FORMAT(///,' --- NUMERO DE DIVISOES E RAIO DO CABO DE ALTA TEN
     *    ')
      WRITE(6,10)NOS,RAIO
   10 FORMAT(/,2X,'NOS=',I3,5X,'RAIO DO CABO=',E12.6,2X,'METROS',2X
      RIND=2.*DUCT/DELT
      RLCW=2.*DULCW/DELT
      IT1=NOS
      IT2=TR2/DELT+0.5
   12 FORMAT(1H1)
C
C  ----- DETERMINACAO DAS IMPEDANCIAS DE SURTO DO CABO DE ALTA TEN
C
      WRITE(6,15)
   15 FORMAT(///,'  ---- IMPEDANCIAS DE SURTO DO CABO VERTICAL ----
      DO 20 I=1,NOS
         H(I)=L1/(2.*NE)+(L1/(NE))*FLOAT(I-1)
         Z(I)=60.*ALOG(H(I)* 2./RAIO)
      WRITE(6,19)I,Z(I)
   19 FORMAT(/,2X,'Z(',I1,')=',F8.4,'OHMS')
   20 CONTINUE
      Z1=60.*ALOG((H(NOS)+L1/(2.*NE))*2./RAIO )
      WRITE(6,25)
   25 FORMAT(///,'  --- IMPEDANCIA DE SURTO DO CABO HORIZONTAL DE 
     *ENSAIO ----')
      WRITE(6,35)Z1
   35 FORMAT(/,2X,'Z1=',F8.4,2X,'OHMS')
      Z2=Z2+RL2/4.
      R2=(Z2-RL2/4.)/(Z2+RL2/4.)
C
      RETURN
      END
C-----------------------------------------------------------------
C-----------------------------------------------------------------
C                    ----------- SUBROTINA CONDUT -----------
C     -----------------------------------------------------------
C
      SUBROUTINE CONDUT(N,RIND,RLCW,R)
C
```

```
      COMMON/DACON/Z2,R3,C1,C2,DELT,Z1
      COMMON/CONST/A(7,7),R2
C
C
C        --- FORMACAO DA MATRIZ CONDUTANCIA DO CIRCUITO DE MEDICA
C
      DO 5 I=1,N
      DO 5 J=1,N
      A(I,J)=0.
    5 CONTINUE
      A(1,1)=1./Z2+1./R3
      A(1,2)=-1./R3
      A(2,2)=1./R3+2.*(C1+C2)/DELT
      A(2,5)=-2.*C1/DELT
      A(3,3)=1./RIND+1./R2
      A(3,4)=-1/R2
      A(3,5)=-1./RIND
      A(4,4)=1./Z1+1./R2
      A(5,5)=1./RIND+2.*C1/DELT
      A(2,6)=-2.*C2/DELT
      A(6,6)=1./RLEW+2.*C2/DELT
      A(6,7)=-1./RLEW
      A(7,7)=1./RLEW+1./R8
      DO 10 I=1,N
      DO 10 J=1,N
         A(J,I)=A(I,J)
   10 CONTINUE
C
      RETURN
      END
C     ------------------------------------------------------------------
C                   ---------- SUBROTINA TENSAO ----------
C     ------------------------------------------------------------------

      SUBROUTINE TENSAO(N,I,ETOP,Z1)
      COMMON/DATEN/R2X,RP,IT1,V
      COMMON/PTECRV/Z(4)
      COMMON/TECORV/ENO(8),CONC(8)
      COMMON/TENVR/R1
      COMMON/COTP/COTER(96)
      INTEGER T
C
C     ------ TENSOES NOS NOS DO CABO VERTICAL ------
      ENO(1)=Z(1)*V/(R1+Z(1))+Z(1)*R1*CONC(1)/(Z(1)+R1)
C
C        --------- NOS IMPARES (EXCETO O PRIMEIRO) ---------
C
      J=0
      N1=2*N-1
      DO 10 I=3,N1,2
         J=J+1
         R11=(R2X+Z(J))*Z(J+1)/(R2X+Z(J)+Z(J+1))
         R22=Z(J)*Z(J+1)/(R2X+Z(J)+Z(J+1))
         ENO(I)=R11*CONC(I)+R22*CONC(I-1)
   10 CONTINUE
C
C        --------- NOS PARES (EXCETO O ULTIMO) ---------
C
      N2=2*N-2
      J=0
```

```
      DO 20 I=2,N2,2
         J=J+1
         F11=(R2X+Z(J+1))*Z(J)/(R2X+Z(J)+Z(J+1))
         F22=Z(J)*Z(J+1)/(R2X+Z(J)+Z(J+1))
         ENO(I)=F11*CONO(I)+F22*CONO(I+1)
   20 CONTINUE
C
C        ---------- ULTIMA MALHA DO CABO VERTICAL ----------
C
      N22=N*2
      F11=(RD+Z1)*Z(N)/(RD+Z1+Z(N))
      F22=Z1*Z(N)/(RD+Z1+Z(N))
      ENO(N22)=F11*CONO(N22)+F22*CETOP(T-IT1)
      ETOP=((RD+Z(N))*Z1/(RD+Z1+Z(N)))*CETOP(T-IT1)+F22*CONO(N22)
      RETURN
      END
C     ------------------------------------------------------------
C                    ---------- SUBROTINA CORREN ----------
C     ------------------------------------------------------------

      SUBROUTINE CORREN(N)
      COMMON/DTECLV/Z(4)
      INTEGER T
      COMMON/TECCRV/ENO(8),CONO(8)
      COMMON/CORVE/VAUX(4)
C
      N1=2*N-1
      N22=2*N
C
C        --------- FONTES DE CORRENTES FICTICIAS NO CABO VERTICAL
C
C        ------------ NOS IMPARES ------------
C
C
      J=0
      DO 10 I=1,N1,2
         J=J+1
         CONO(I)=2.*ENO(I+1)/Z(J)-CONO(I+1)
   10 CONTINUE
C
C        ---------- NOS PARES
C
      DO 20 I=2,N22,2
         J=I/2
         CONO(I)=2.*ENO(I-1)/Z(J)-VAUX(J)
   20 CONTINUE
      RETURN
      END
C     ------------------------------------------------------------
C     SUBROTINA LUSOLV
C     ------------------------------------------------------------

      SUBROUTINE LUSOLV(A,BC,N,JPIV)
      DIMENSION A(7,7),BC(7),JPIV(7)
      DO 4 I=1,N
      JPIV(I)=I
      I1=I+1
      IF( ABS(A(I,I)).LT.1.E-50) GO TO 1
      GO TO 15
    1 CONTINUE
```

```
      DO 14 J=I1,N
      IF(I.EQ.N) GO TO 20
      IF( ABS(A(J,I)).LT.1.E-5)) GO TO 14
      JPIV(I)=J
      GO TO 16
   14 CONTINUE
      GO TO 20
   16 DO 2 K=1,N
      IPIV=JPIV(I)
      PIV=A(IPIV,K)
      A(IPIV,K)=A(I,K)
      A(I,K)=PIV
    2 CONTINUE
   15 IF(I.EQ.N) GO TO 3
      DO 8 JI=I1,N
    8 A(I,JI)=A(I,JI)/A(I,I)
      DO 4 J=I1,N
      DO 4 K=I1,N
    4 A(J,K)=A(J,K)-(A(J,I)*A(I,K))
    3 CONTINUE
      ENTRY FWBWC(A,BC,N,JPIV)
      IFB=1
   64 DO 61 I=1,N
      IPIV=JPIV(I)
      IF(IPIV.LE.I) GO TO 61
      J=I
      PIVA=BC(I)
   62 PIV=BC(IPIV)
      BC(IPIV)=PIVA
      JPIV(J)=-IPIV
      J=IPIV
      IPIV=JPIV(J)
      PIVA=PIV
      IF(IPIV.GT.0) GO TO 62
   61 CONTINUE
      DO 63 I=1,N
   63 JPIV(I)=IABS(JPIV(I))
      GO TO (65,165),IFB
C     FORWARD SUBSTITUTION
   65 DO 31 K=1,N
      SUM=0.0
      IF(K.EQ.1) GO TO 41
      MM=K-1
      DO 51 J=1,MM
   51 SUM=SUM+A(K,J)*BC(J)
   41 BC(K)=(1./A(K,K))*(BC(K)-SUM)
   31 CONTINUE
C     BACKWARD SUBSTITUTION
      DO 91 LL=1,N
      K=(N+1)-LL
      SUM=0.0
      IF(K.EQ.N) GO TO 81
      KK=K+1
      DO 71 J=KK,N
   71 SUM=SUM+A(K,J)*BC(J)
   81 BC(K)=BC(K)-SUM
   91 CONTINUE
      GO TO 30
   20 PRINT 21
   21 FORMAT('EQUATIONS ARE LINEARLY DEPENDENT')
```

```
      STOP
   20 CONTINUE
      RETURN
      ENTRY FB2K11(A,BC,N,IPIV)
      IEP=2
      GO TO 64
  165 DO 131 K=2,N
      I=K-1
      SUM=0.
      DO 151 J=1,I
  151 SUM=SUM+A(J,K)*BC(J)
      BC(K)=BC(K)-SUM
  131 CONTINUE
      DO 191 LL=1,N
      K=N-LL+1
      SUM=0.
      IF(K.EQ.N) GO TO 181
      KK=K+1
      DO 171 J=KK,N
  171 SUM=SUM+A(J,K)*BC(J)
  181 BC(K)=(BC(K)-SUM)/A(K,K)
  191 CONTINUE
      RETURN
      END
C     ------------------------------------------------------------------

      SUBROUTINE PLOT (Y,M,NF,NS)
      DIMENSION Y(M, NF),LINE(101),L(11),JL(5)
      DATA JL(1),JL(2),JL(3),JL(4 ),JL(5)/1H.,1HB,1HC,1HD,1HE/
      DATA JN,JP,JI,JBLANK,JZ/1H-,1H+,1HI,1H ,1H$/
      WRITE(6,200)
  200 FORMAT(1H1)
      DO 99 I=1,101
      LINE(I)=JBLANK
   99 CONTINUE
      N=0
C-----PRINT ORDINATE SCALE
      DO 101 I=1,11
      L(I)=10*I-110+NS
  101 CONTINUE
      WRITE(6,105)L
  105 FORMAT (2X,11(I4,6X),6HY(1,I))
      GO TO 115
  110 IF (N/10-(N-1)/10) 125,125,115
C
  115 ND=0
      DO 120 I=1,10
      ND=ND+1
      LINE(ND)=JP
      DO 120 J=1,9
      ND=ND+1
  120 LINE(ND)=JN
      LINE(101)=JP
      IF(N) 135,121,135
  121 WRITE(6,170) N,LINE
      GO TO 185
C
C---CONSTRUCT 1 LINE OF ABSCISSA GRAPH LINES
  125 DO 130 I=1,101,10
      LINE(I)=JI
```

```
      130   CONTINUE
      C
      C-----CHANGE NUMERICAL DATA TO LETTERS
      135   DO 160 I=1,M
            XNS=NS
            JA=Y(I,N)+101.49999-XNS
            IF(JA-101) 140,155,145
      140   IF (JA) 150,150,155
      145   LINE(101)=JZ
      14    GO TO 160
      150   LINE(1)=JZ
            GO TO 160
      155   LINE(JA)=JL(I)
      160   CONTINUE
      C
      C-----PRINT LINE OF DATA
            IF (N/10-(N-1)/10) 175,175,165
      165   WRITE(6,170) N,LINE,Y(1,N)
      170   FORMAT (1X,I4,101A1,1X, F12.5)
            GO TO 185
      175   WRITE(6,180) LINE,Y(1,N)
      180   FORMAT (5X,101A1,1X,F12.5)
      C
      C-----SET LINE VARIABLES TO ZERO
      185   DO 190 I=1,101
            LINE(I)=JBLANK
      190   CONTINUE
      195   N=N+1
      19    IF (N-NF) 110,110,200
       200  WRITE(6,300)
            RETURN
            END
      C     ----------------------------------------------------------------

      $ENTRY
```

REFERÊNCIAS

01. International Electrotechnical Comission, High Voltage Test Techniques, Test procedures, "IEC Publication 60-2", 1973.

02. International Electrotechnical Comission, High Voltage Test Techniques, Measuring devices, "IEC publication 60-3",1976.

03. International Electrotechnical Comission, High Voltage Test Techniques, Aplication guide for Measuring devices, "IEC publication 60-4", 1977.

04. N. CAVALLIUS, T. PARNEL. "The Measurement of Standard Lightning Impulses" - Third International Symphosium on High Voltage Engineering, Milan, 1979.

05. Cigrê Study Committee nº 3, IRR-IMS Group(1), "Facing UHV Measuring Problems", Electra, 1974, p.p. 157 - 254.

06. F. C. CREED, T. KAWAMURA, G. NEWI. "Step response of Measuring Systems for High Impulse Voltage". - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, 1967, pp.1408-1420.

07. A. J. Schwab. "High Voltage Measurement Techniques". M.I.T, Cambridge, 1972, cap.3.

08. S. R. NAIDU. "On Modelling the stray capacitances of resistive impulse voltage dividers". Relatório de Pesquisa - LAT 81/1.

09. H.W. Dommel. "Digital Computer Solution on Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-88, 1969. p.p. 388-399.

10. L. S. PALMA. "Força de levitação e distorção do campo elétrico devido a partículas condutoras livres". Tese de Mestrado, 1979. cap. 3.

11. S. R. NAIDU. "Generation and Measurement of Steeply rising impulse voltages". Tese de Mestrado, 1970. cap. 3.

12. N. H. CAVALLIUS, R. Lewis Vaughan. "Calibration and checking methods of rapid high-voltage impulse measuring circuits". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,

Vol.PAS-89, 1970, p.p. 1393 - 1403.

13. N.H.CAVALLIUS, T.M. Parnel. "Unsuspected Erros in impulse voltage measurement". Queensland division Technical Papers, Brisbane, Austrãlia, 1980.

14. H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss. "A charge simulation method for the calculation on high voltage fields". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-93,1974, p.p. 1660 - 1668.

15. Aa Pedersen, P. Lausen. "Dynamic Properties of impulse measuring systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Denmark, 1970, p.p. 1424 - 1432.

WTSF.