

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS  
LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO**

# **RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO**

**ALUNO: LOURIVAL ANTÔNIO SIMÕES NETO  
ORIENTADOR: PROFº GENOILTON J. DE C. ALMEIDA**

**CAMPINA GRANDE, 24 DE OUTUBRO DE 2003**



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

# **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente minha família pelo incentivo e suporte financeiro indispensável a minha sobrevivência em Campina Grande. Aos professores Genoilton Almeida e Damásio Fernandes pela orientação de estágio. Ao prof<sup>o</sup> Edson Guedes da Costa pela enorme contribuição intelectual ao decorrer do curso. Aos amigos de GSE Max Néri, Ronimack Trajano, Kleber Melo, Vanessa Batista, José Antônio, José Carlos, Pollyana Caetano e demais estudantes do departamento. Especialmente aos amigos Wemmerson Silveira e Luiz Heront. E por último e mais especial a minha namorada Ana Cristina pela paciência em suportar a distância enquanto corria atrás de um sonho.

# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>4</b>
<b>2 – ATIVIDADES REALIZADAS</b>	
<b>2.1 – MEDIÇÕES DE TENSÕES TRANSITÓRIAS EM UM TPC</b>	<b>5</b>
<b>2.1.1 – INTRODUÇÃO TEÓRICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2 – MEDIÇÕES DE TENSÕES TRANSITÓRIAS</b>	<b>10</b>
<b>2.2 – MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE TERRA</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1 – INTRODUÇÃO TEÓRICA</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2 – MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE TERRA</b>	<b>27</b>
<b>3 – CONCLUSÃO</b>	<b>31</b>
<b>4 – BIBLIOGRAFIA</b>	<b>32</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O presente relatório tem a finalidade de descrever as atividades realizadas durante o Estágio Supervisionado em Engenharia Elétrica com uma carga horária total de 120h. O estágio foi realizado no Laboratório de Alta Tensão na Universidade Federal de Campina Grande. O Estágio Supervisionado é integrante da grade curricular na obtenção do diploma de graduação em Engenharia Elétrica.

O estágio constituiu-se de atividades realizadas nas áreas de equipamentos elétricos e de medições elétricas.

Durante o período de estágio medições de tensões transitórias e medição de ferroressonância em um Transformador de Potencial Capacitivo (TPC), fabricado pela Passoni & Villa, com tensão nominal de 230 kV, tipo CVT 245/8 M, Ano 1979. O objetivo é induzir tensões transitórias no primário e no secundário do TPC e avaliar a operação do filtro supressor de ferroressonância no amortecimento dessas tensões. Um dos ensaios a ser realizado é o ensaio de ferroressonância catalogado pela Norma IEC 186 de 1969 e revisada em 1978 (IEC 186, 1969).

Outra atividade foi à medição da resistência de terra através de um Megger (medidor de resistência de terra) para avaliar o estado do aterramento do prédio da CREDUNI localizado na Universidade Federal de Campina Grande.

## **2. ATIVIDADES REALIZADAS**

### **2.1. MEDIÇÕES DE TENSÃO TRANSITÓRIA EM UM TPC**

#### **2.1.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA**

Os transformadores para instrumentos são equipamentos elétricos projetados e construídos especificamente para alimentar instrumentos de medição, controle ou proteção (Medeiros Filho, 1997). São dois os tipos de transformadores para instrumentos:

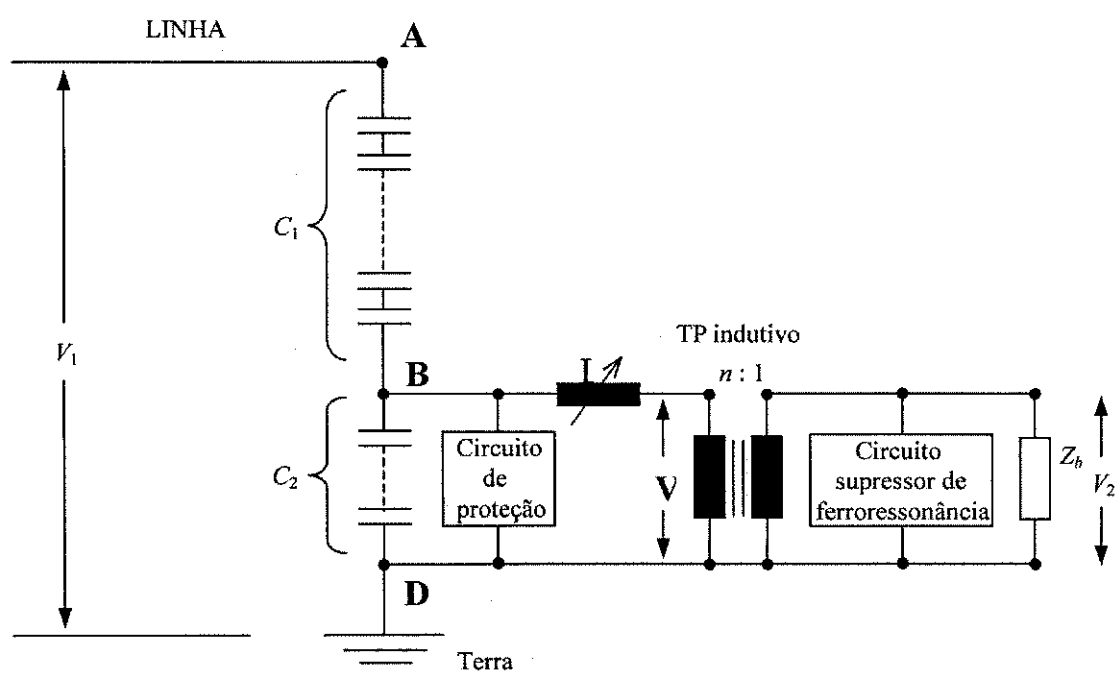
- Transformador de Potencial (TP): É um transformador para instrumento cujo enrolamento primário é ligado em derivação com um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção.
- Transformador de Corrente (TC): É um transformador para instrumento cujo enrolamento primário é ligado em série em um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de corrente de instrumentos de medição, proteção ou controle.

No estágio realizado o transformador para instrumento utilizado foi o de potencial do tipo capacitivo fabricado pela Passoni & Villa, Tipo CVT 245/8 M, 230 kV de Tensão Nominal, Ano 1979. Em circuitos de alta e extra alta tensão que operam em níveis de tensão iguais ou superiores a 138 kV é mais conveniente e econômico o emprego de TP tipo capacitivo em lugar dos TP tipo indução. O TPC (Transformador de Potencial Capacitivo) apresenta maior complexidade em seu circuito equivalente, devido à presença de capacitores de alta tensão, elementos não lineares e capacitâncias parasitas nos enrolamentos do seu transformador indutivo.

Os TPC têm sido usados em sistemas de potência com bastante sucesso, como uma forma conveniente e econômica de transformar tensões de transmissão em tensões

suportáveis pelos instrumentos de medição e proteção. Entretanto, existe uma relação de compromisso entre a economia e a precisão desses transformadores. Os TPC perdem alguma fidelidade na reprodução da tensão transitória devido aos elementos indutivos, capacitivos e não lineares presentes em sua configuração. Os TP se comportam melhor do que os TPC com relação à resposta transitória, embora sejam mais dispendiosos em altas tensões. Os TPC tem perdas bastante reduzidas e oferecem a possibilidade de acoplamento para onda portadora de alta frequência, (Medeiros Filho, 1997).

O diagrama elétrico de um TPC pode ser visualizado na Fig. 2.1.



**Figura 2.1** – Diagrama elétrico de um TPC.

O primário é constituído pelo conjunto de capacitores  $C_1$  e  $C_2$  em série ligado entre a fase e a terra. Há uma derivação intermediária B, correspondendo a uma tensão intermediária  $V$ , para alimentar o enrolamento primário de um TP indutivo intermediário, o qual fornecerá a tensão secundária  $V_2$  suportável aos instrumentos de

medição e dispositivos de proteção ali inseridos. A relação entre a tensão de entrada  $V1$  e a tensão intermediária  $V$  é:

$$\frac{V1}{V} = \frac{C1 + C2}{C1} \quad (1)$$

O TP indutivo apresenta uma relação de tensão  $V = nV2$ . Portanto, a relação de transformação do TPC é:

$$\frac{V1}{V2} = \frac{C1 + C2}{C1} n \quad (2)$$

sendo  $V1$  e  $V2$  as tensões nominais no primário e no secundário a relação da equação (2) é chamada de Relação de Transformação Nominal (Medeiros Filho, 1997).

Os TPC devem reproduzir os efeitos transitórios e de regime permanente aplicados ao circuito de alta tensão o mais fielmente possível no circuito de baixa tensão. Para isto, um reator de compensação ajustável, projetado e construído pelo fabricante para controlar a defasagem no divisor capacitivo é posto em série com o primário do TP indutivo, de modo que o conjunto  $L\omega + X_1 + n^2 X_2$  tenha uma reatância que satisfaça a seguinte igualdade:

$$L\omega + X_1 + n^2 X_2 = \frac{1}{(C_1 + C_2)\omega} \quad (3)$$

sendo  $X_1$  e  $X_2$  as reatâncias primária e secundária do transformador indutivo respectivamente,  $n$  a relação de transformação e  $\omega = 2\pi f$  sendo  $f$  a frequência do sistema.

A configuração básica de um TPC inclui ainda um circuito destinado a proteção da parte indutiva do equipamento contra sobretensões. O circuito de proteção consta de um pára-raios de carbonato de silício (SiC) ou de óxido de zinco (ZnO). Outro circuito projetado para eliminar as oscilações a frequências industriais, harmônicas ou



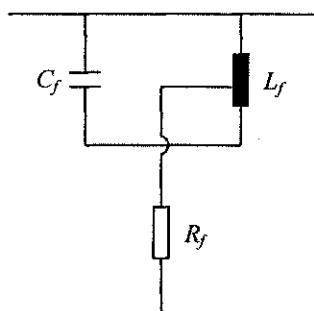
subharmônicas que podem aparecer nos terminais do secundário do TPC, denominadas oscilações ferroressonantes, é o circuito supressor de ferroressonância (CSF).

Os requisitos gerais para o surgimento da ferroressonância são: uma fonte de tensão senoidal aplicada ou induzida, uma indutância de magnetização saturável de um transformador, uma capacitância e pouco amortecimento (representado por uma pequena carga no transformador ou mesmo um transformador sem carga). E entre os eventos que podem gerar o fenômeno da ferroressonância incluem-se chaveamentos ou atuação de fusíveis e perdas de aterramento em um determinado ponto do sistema.

Embora a ferroressonância ocorra envolvendo capacitância e indutância, não há uma frequência de ressonância definida em que a oscilação possa aparecer. Na verdade, o comportamento não linear da ferroressonância se enquadra em dois modos. No primeiro deles, a resposta é uma forma de onda periódica distorcida no secundário do transformador, envolvendo oscilações com pequena troca de energia entre indutância e capacitância que podem conter a frequência fundamental e frequências harmônicas de ordem ímpar. O segundo modo ferroressonante é caracterizado por uma resposta não periódica ou caótica e apresenta maior quantidade de energia por envolver capacitâncias relativamente grandes e pouco amortecimento. Em ambos os casos, o espectro de frequência da resposta contém a fundamental e componentes harmônicos de ordem ímpar, entretanto, na resposta caótica, há também frequências subharmônicas.

Mudanças repentinas de tensão podem saturar o TPC e levá-lo a ferroressonância, dependendo do estado de magnetização prévia do núcleo e do instante na forma de onda da tensão em que o chaveamento ocorre. A ferroressonância em TPC não pode ser tolerada, uma vez que informações falsas poderiam ser transferidas aos medidores e relés de proteção, assim como sobretensões e sobrecorrentes destrutivas. Para amortecer as sobretensões oriundas do fenômeno de ferroressonância, normalmente é colocado um circuito supressor de ferroressonância num dos terminais secundários do TPC.

Os circuitos supressores de ferroressonância podem ser ativos ou passivos. Eles são do tipo passivo quando compostos por resistores, capacitores e/ou indutores, e ativos quando apresentarem dispositivos semicondutores. O TPC utilizado neste trabalho possui um circuito passivo. Um dos dispositivos mais utilizados é um indutor  $L$  em paralelo com um capacitor  $C$  sintonizados na frequência do sistema e em série com um resistor, conforme Fig. 2.2. O circuito consome pouca energia durante condições normais de operação e amortecem as oscilações provocadas pelos fenômenos transitórios.



**Figura 2.2** – Exemplo de um circuito supressor de ferroressonância passivo.

Simulações realizadas no EMTP (Eletromagnetic Transient Programs) com a rotina BCTRAN utilizando o modelo de TPC proposto por Fernandes Jr. (2003) com três enrolamentos (1 no primário e 2 no secundário) comprovam que o circuito ferroressonante do TPC é constituído pela fonte de tensão senoidal, pela coluna capacitiva de alta tensão e a indutância não linear do TP intermediário.

Segundo a Norma IEC 186 de 1969 e revisada em 1978 (IEC 186, 1969) os ensaios de ferroressonância em transformadores de potencial capacitivos compreendem dois tipos:

- Ensaio N° 1: O TPC deve ser energizado a 120% de sua tensão nominal em regime permanente, com carga substancialmente nula no enrolamento secundário a ser curto-circuitado. Após esta condição inicial, o curto-circuito deverá ser eliminado. Antes,

durante e depois do curto-circuito as formas de onda de tensão e corrente no secundário deverão ser registradas;

- Ensaio N° 2: O TPC deve ser energizado a 150% de sua tensão nominal durante 30 segundos, com o enrolamento secundário curto-circuitado. Após esta condição inicial, o curto-circuito deverá ser removido subitamente. As formas de onda de tensão e corrente no secundário deverão ser registradas antes durante e após o curto-circuito.

O ensaio de ferroressonância realizado durante o estágio foi o Ensaio N° 1. Como procedimentos comuns a ambos os ensaios, a Norma IEC 186 faz as seguintes observações:

- Cada curto-circuito deve ser mantido por um tempo mínimo de 3 ciclos (base 60 Hz);
- A carga imposta pelos equipamentos de registro dos ensaios conectados ao enrolamento secundário não deve exceder 5 VA;
- Durante o curto-circuito, a tensão da fonte de potência não poderá diferir em mais do que +10% e -5% do valor da tensão antes do curto-circuito e deverá manter-se senoidal.
- Para o ensaio nº 1: o pico da tensão secundária deverá retornar a um valor que não difira do seu valor normal por mais que 10% após dez ciclos à frequência nominal (Fernandes Jr, 2003).

### **2.1.2 MEDIÇÕES DE TENSÕES TRANSITÓRIAS**

A primeira medição realizada no TPC consiste em inserir um disjuntor entre a fonte de alimentação e a coluna capacitiva do transformador com a finalidade de produzir uma tensão transitória no primário do TPC através do fechamento e da abertura do disjuntor. Durante a medição a forma de onda no primário e no secundário do TPC antes do fechamento, durante as operações de fechamento e abertura e depois da abertura serão

monitoradas. O objetivo é analisar como as sobretensões provocadas pela atuação do disjuntor serão vistas no secundário do TPC e se o circuito supressor de ferroressonância realiza o amortecimento dessas tensões transitórias.

É necessário que o TPC esteja alimentado com sua tensão nominal. O disjuntor de que dispõe o Laboratório de Alta Tensão possui uma tensão nominal de 17,5 kV. O TPC é de tensão nominal de linha de 230 kV. Como o TPC é monofásico, a tensão de fase  $V_I$  é de aproximadamente 133 kV, tensão maior que a tensão nominal do disjuntor. A operação de fechamento e de abertura provocará também, sobretensões transitórias maiores que os valores nominais, portanto, não possuindo o disjuntor isolamento suficiente para operar com a tensão nominal do TPC.

Para a realização da medição com o disjuntor foi necessário realizar um curto-circuito entre o terminal de alta tensão do TPC e o seu terminal de aterramento, ou seja, ligar o conjunto de capacitores  $C_1$  e  $C_2$  em paralelo. Aplicando o Teorema de Thevenin no ponto de tensão intermediário B a tensão aplicada ao TPC será:

$$V = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_I \quad (4)$$

sendo:

$$C_1 = 9660 \text{ pF};$$

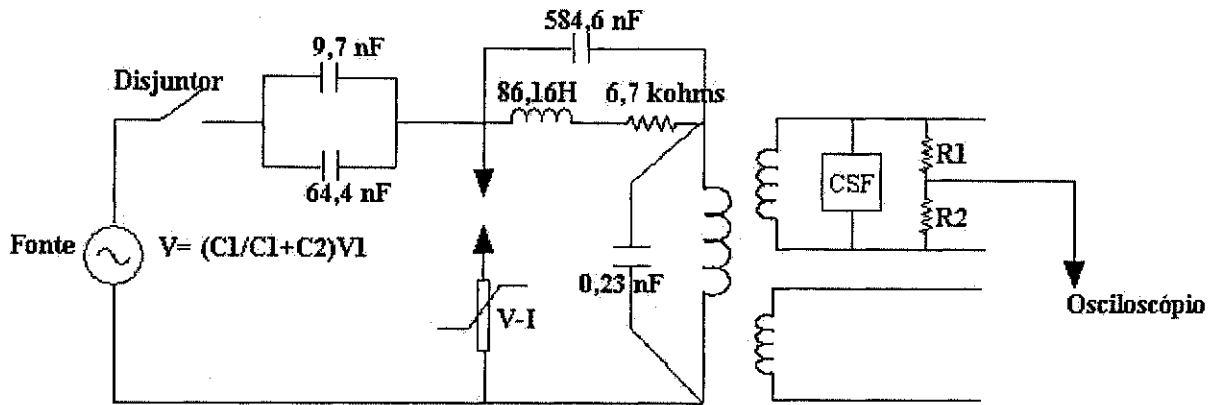
$$C_2 = 64400 \text{ pF};$$

$$V_I = 133 \text{ kV}.$$

A tensão no ponto intermediário  $V$  será igual a 17,3 kV. O circuito de medição é visualizado na Fig. 2.3.

No ensaio, o secundário do TPC esta conectada a uma carga muito pequena não havendo, portanto, uma drenagem de corrente significativa no secundário e conseqüentemente, no primário. Devido a esse baixo valor de corrente a queda de tensão sobre os capacitores pode ser desprezada por ser muito pequena. Com esse arranjo o disjuntor poderá ser usado para provocar uma tensão transitória diretamente no primário do TP indutivo. Porém, para aumentar a margem de segurança do disjuntor, os três pólos

foram ligados em série para diminuir e extinguir mais rápido o arco elétrico durante o fechamento e a abertura.



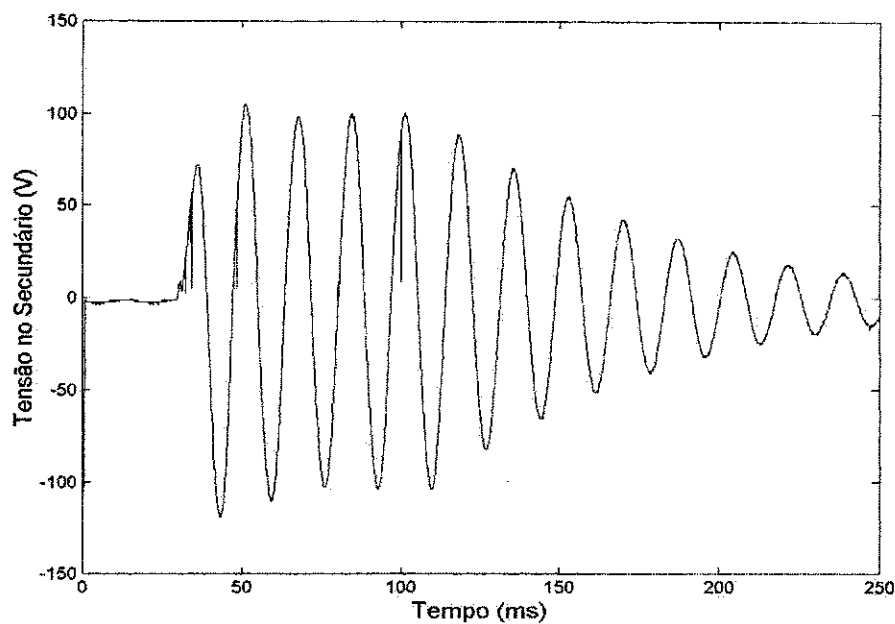
**Figura 2.3** - Circuito de medição com o disjuntor conectado entre a fonte de tensão e o TPC.

O disjuntor possui operação manual. Para a realização da medição o disjuntor inicialmente estará aberto. Quando fechado, deverá ser aberto após alguns milissegundos. Manualmente essa operação não poderá ser feita devido ao tempo que seria gasto para fechar o disjuntor e depois abri-lo. O curto-circuito deverá ser o mais rápido possível devido aos elevados níveis de corrente que irá drenar da fonte de tensão. O disjuntor possui uma bobina de abertura automática do disjuntor quando fechado. A operação gasta um tempo de 55 ms para o fechamento e 45 ms para a abertura, num total de 100 ms durante toda a operação.

A medição da tensão no secundário do TPC será feita através de um osciloscópio digital Tektronix TDS 2014, 100 MHz e 1 GigaAmstras/s. Um programa em linguagem Matlab® grava os dados das tensões e confecciona os gráficos. O osciloscópio possui um módulo de comunicação RS 232 serial padrão de 8 bits que permite comunicar com um dispositivo RS 232 externo (computador) para aquisição de dados. O sinal de tensão será obtido por um divisor de tensão resistivo ligado ao secundário para proteger o osciloscópio das sobretensões durante o período transitório. Foram utilizadas duas

décadas resistivas de  $1,1 \text{ M}\Omega$  com uma relação resistiva de 2. Em regime permanente a tensão RMS nominal no secundário é de 115 V. Portanto, a tensão registrada pelo osciloscópio será metade da tensão total no secundário.

O gráfico abaixo, Fig. 2.4, corresponde à tensão no secundário do TPC com a operação de fechamento e abertura do disjuntor com uma tensão aplicada de 17,3 kV.



**Figura 2.4** – Tensão no secundário registrada pelo osciloscópio.

Com uma relação menor, o sinal de tensão no secundário se sobrepõe ao sinal de ruído por ter maior amplitude. De acordo com o gráfico, a amplitude de tensão no regime permanente, entre 56 e 100 ms, é de 100 V. Como o TPC está alimentado com tensão nominal no ponto intermediário B, a tensão RMS no secundário seria de aproximadamente 115 V com amplitude de 162 V. Havendo, portanto, uma diferença de 62 V. As possíveis causas da diferença são:

- O valor da relação nominal do TPC não se manteve em 1154,7;
- Erro na medição do valor RMS de tensão da fonte de alta tensão;
- Queda de tensão na coluna capacitiva.

- Falta de precisão no valor do resistor de alta tensão ( $288M\Omega$ ) e das décadas resistivas;

A relação nominal do TPC é de 1154,7. A medição para a verificação da relação foi feita aplicando vários níveis de tensão ao primário do TPC e medindo com o osciloscópio a tensão RMS no secundário, Tabela 2.1. Para a realização da medição o curto-circuito ligando o conjunto  $C1$  e  $C2$  em paralelo foi retirado.

**Tabela 2.1** – Medição da relação de transformação nominal do TPC.

V1 (kV)	V2 (V)	Relação (V1/V2)	Erro (%)
29,4	25,9	1135,1	1,69
39,0	34,9	1117,5	3,22
68,0	60,5	1123,9	2,67
76,0	67,2	1130,9	2,06

A medição de relação do TPC mantém-se com um erro médio de 2,5 %. Portanto, não há erro no valor da relação nominal do TPC.

O circuito da Fig. 2.5 possibilita averiguar se há queda de tensão sobre a coluna capacitiva curto-circuitada e se o medidor de tensão da fonte está calibrado.

As tensões  $V1$  (tensão da fonte) e  $V1'$  (tensão intermediária do divisor capacitivo da fonte formado por dois capacitores em série de 0,2 nF e 1563 nF) serão utilizados para analisar se há incerteza na medição da tensão da fonte. As tensões  $V1$  e  $V3$  serão utilizados para analisar se há queda de tensão na coluna capacitiva. O valor da tensão RMS de  $V1'$  obtido pelo osciloscópio será multiplicado pela relação do divisor capacitivo da fonte de tensão e comparado com o valor medido na mesa. A relação nominal do divisor capacitivo da fonte é 7816. Primeiramente, medições com alguns

valores de tensões foram feitas para medir a relação capacitiva do divisor da fonte e comparar com o valor nominal, Tabela 2.2.

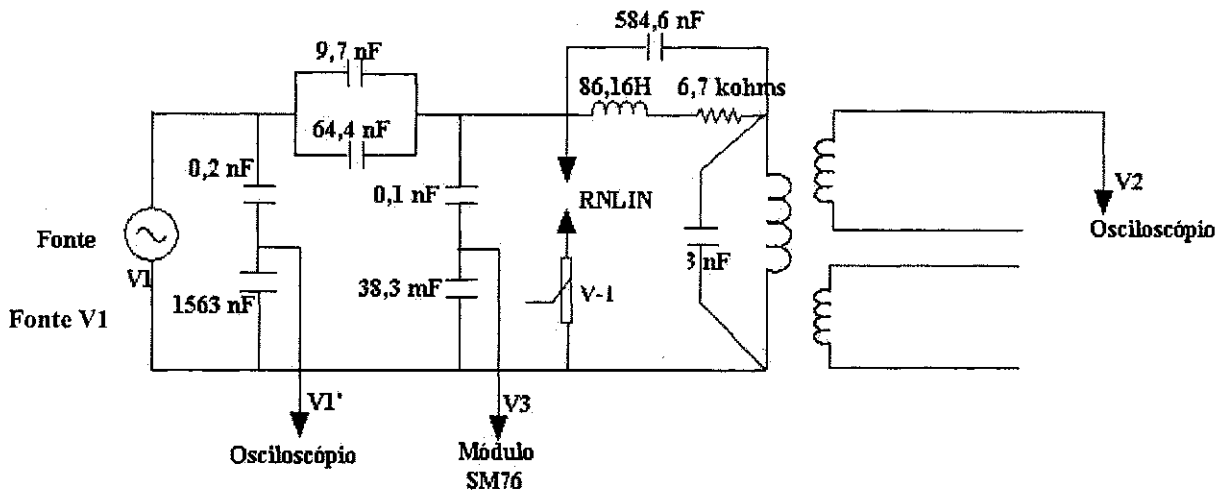


Figura 2.5 – Circuito de medição para averiguar queda de tensão na coluna capacitiva e erro de medição na tensão da fonte.

Tabela 2.2 – Medição da relação do divisor capacitivo da fonte.

Tensão V1 (kV)	Tensão V1' (V)	Relação (V1/V1')	Erro (%)
2,3	0,291	7903,8	1,0
6,2	0,813	7624,0	2,4
10,9	1,430	7622,3	1,7
19,5	2,520	7738,1	0,2
18,3	2,370	7721,5	1,0

O que se pode concluir com os resultados das medições acima é que a relação do divisor capacitivo da fonte apresenta um erro muito pequeno e praticamente mantém-se constante.



A tensão  $V_3$  é medida pelo módulo SM76 do kit de alta tensão, Fig. 2.5, que consta de um capacitor variável de valores iguais a 38,3 nF, 97,8 nF e 201 nF cujo valor dependerá da escala de medição desejada (20, 50, 100). Na medição o valor de escala utilizado é 20, portanto, o capacitor que estará em série com o capacitor fixo de 100 pF é o de 38,3 nF formando um divisor capacitivo. O divisor foi colocado depois da coluna capacitiva do TPC com os capacitores  $C_1$  e  $C_2$  em paralelo. A tensão RMS no secundário  $V_2$  será medida diretamente pelo osciloscópio.

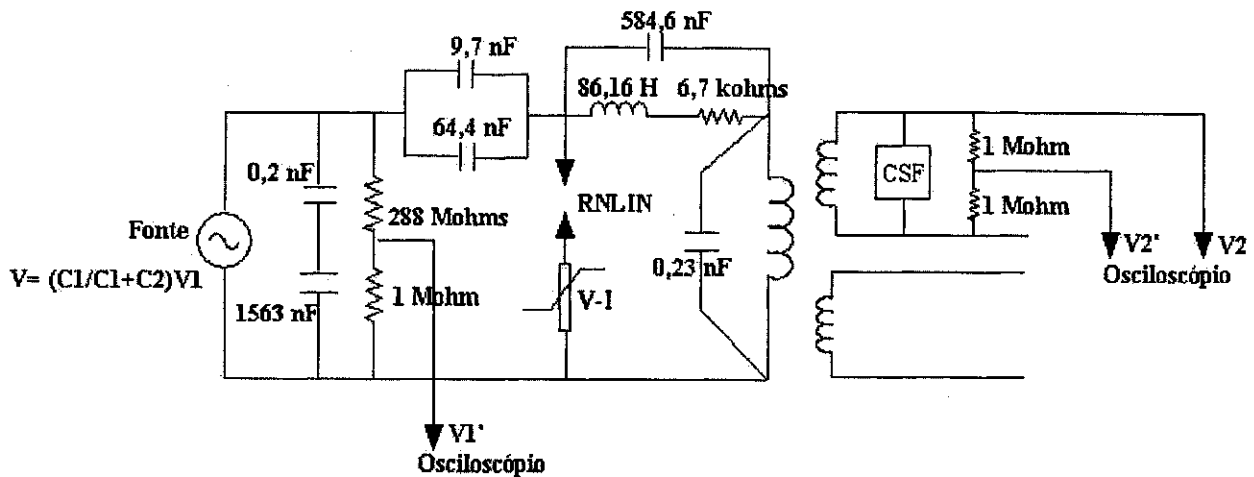
Na Tabela 2.3 encontram-se todos os valores medidos.

**Tabela 2.3** – Valores medidos de tensões para o circuito da Fig. 2.6.

V1 (kV)	V1' (V)*Relação	V3 (kV)	V2 (V)
10,1	$1,31*7676,06 = 10,05$	10,0	69,3
15,7	$2,01*7754,2 = 15,60$	15,6	106,0
17,9	$2,29*7754,2 = 17,80$	17,8	120,0

Analisando os valores de  $V_1$  e  $V_1'$  multiplicado pela relação do divisor capacitivo da fonte. Não há erro na medição da tensão da fonte, pois a diferença entre os dois valores é bastante pequena com erro abaixo de 1 %. Analisando os valores de  $V_1$  e  $V_3$  há uma pequena queda de tensão de 100 V sobre a coluna com os capacitores  $C_1$  e  $C_2$  em paralelo. Porém, essa queda de tensão não é responsável pela grande diferença entre as amplitudes dos sinais de tensões.

A única fonte de erro é falta de precisão nos valores das resistências. Portanto, os valores medidos pelo osciloscópio serão multiplicados pela relação de tensão dos divisores resistivos e não mais pela relação dos valores das resistências. Na medição o disjuntor permaneceu fechado. As medições iniciais são para a medição das relações de tensão na fonte e no secundário do TPC, Fig. 2.6.



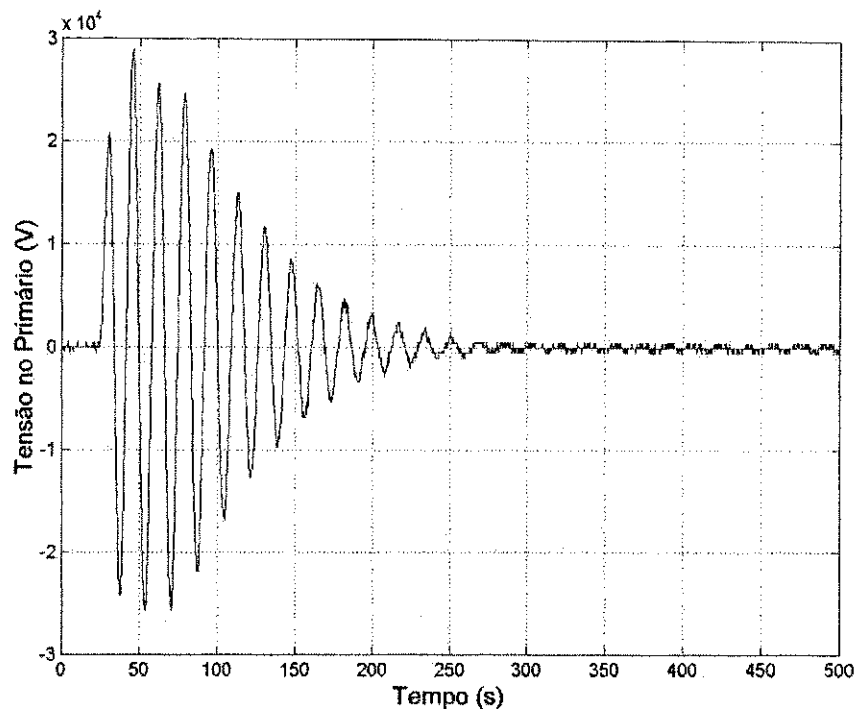
**Figura 2.6** – Circuito para medição da relação de tensão dos divisores resistivos.

A utilização de resistores na medição da relação de tensão na fonte no lugar dos capacitores é para evitar possível defasagem entre os sinais de tensão do primário e do secundário. Os valores de tensão  $V1'$ ,  $V2$  e  $V2'$  serão medidos pelo osciloscópio. A tensão  $V1$  será medida diretamente pelo medidor da fonte de alta tensão, Tabela 2.4.

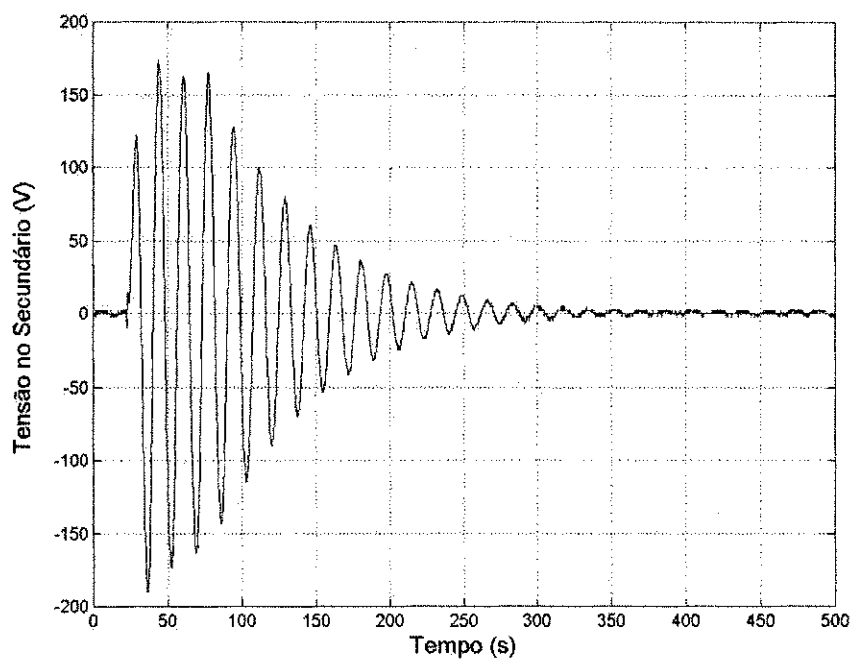
**Tabela 2.4** – Valores medidos de tensões para o circuito da Fig. 2.6.

$V1$ (kV)	$V1'$ (V)	$V2$ (V)	$V2'$ (V)	$V1/V1'$	$V2/V2'$
6,2	12,8	40,4	18,0	484,4	2,2
10,0	21,5	67,3	30,1	465,1	2,2
17,0	38,4	114,0	51,0	442,7	2,2

A relação média de tensão no divisor resistivo da fonte ( $V1/V1'$ ) é 464,1. A relação dos resistores do divisor de alta tensão é 289, um erro de 38 %. A relação média de tensão no divisor do secundário do TPC ( $V2/V2'$ ) é 2,2. A relação dos resistores é 2, um erro de 9 %. Portanto, a causa dos erros são os valores dos resistores utilizados nos divisores de tensão que não estão exatos.



**Figura 2.7** – Gráfico da forma de onda da tensão no primário do TPC.



**Figura 2.8** – Gráfico da forma de onda da tensão no secundário do TPC.

Analisando o gráfico da tensão no secundário do TPC, o pico da tensão em regime permanente, entre 60 e 80 ms, é de 161 V. Portanto, o circuito supressor de ferroressonância amorteceu as primeiras sobretensões durante o período de fechamento do disjuntor entrando em regime permanente após dois ciclos. Após a abertura da chave o TPC passa por um período de desenergização durante um período de aproximadamente 250 ms. O amortecimento da tensão é devido às perdas entre capacitores e indutores do circuito do TPC.

O segundo ensaio a ser realizado é o de ferroressonância. No circuito para medição de ferroressonância, Fig. 2.9, o disjuntor esta localizado no secundário do TPC para provocar um curto-circuito com o TPC energizado. O problema com o ensaio de ferroressonância é a corrente no secundário do transformador no momento do curto-circuito ser bastante elevada.

O ensaio de ferroressonância a ser realizado é o Ensaio N° 1 catalogado pela Norma IEC 186. No ensaio, a tensão da fonte é 120 % da tensão nominal de 133 kV. Portanto, a tensão a ser aplicada é de 159,6 kV.

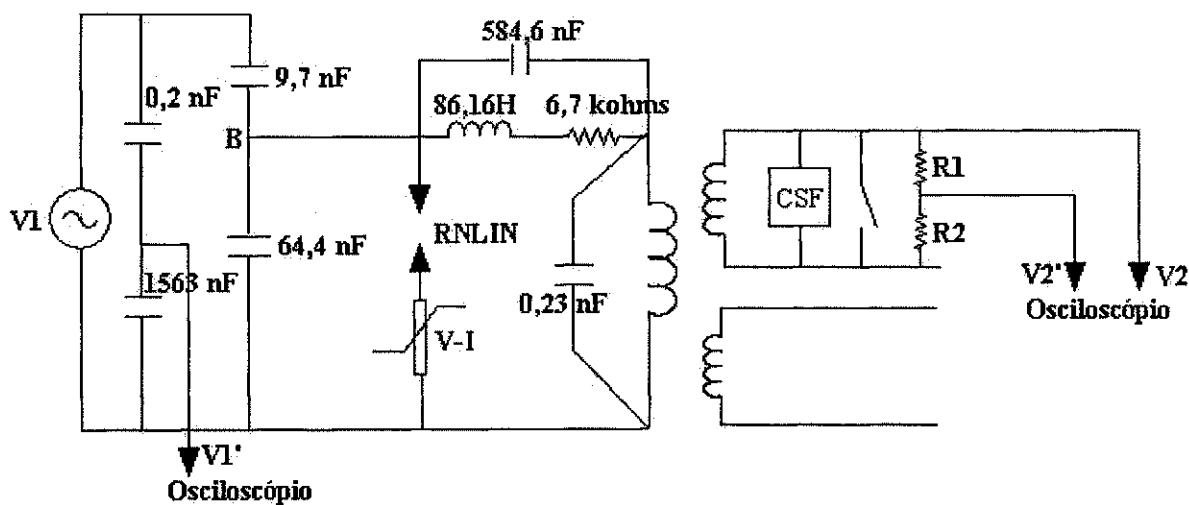


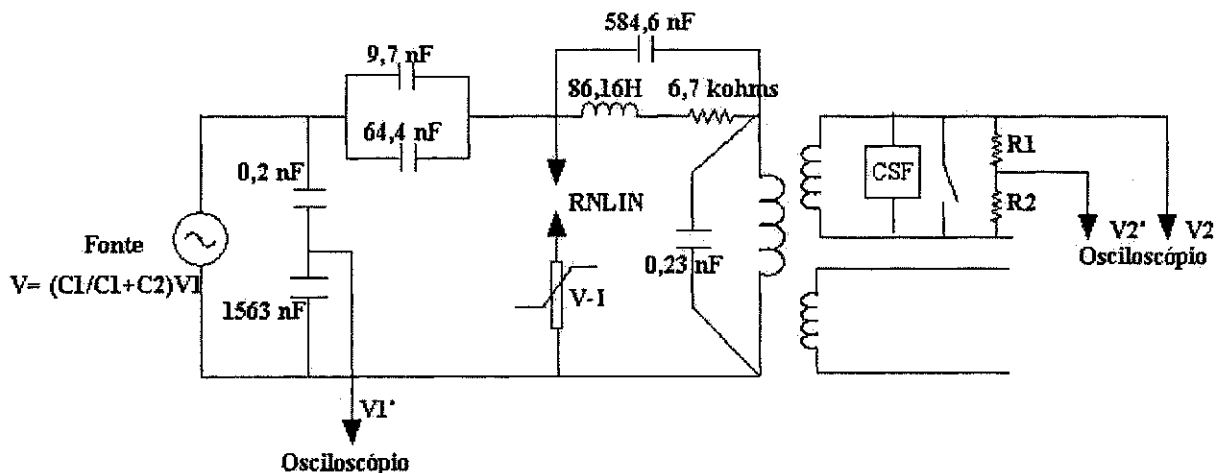
Figura 2.9 – Circuito para medição de ferroressonância.

Inicialmente, o ensaio foi sendo realizado com a aplicação de vários níveis de tensão e realizando a operação do disjuntor para monitorar o comportamento da tensão no secundário e, conseqüentemente, da corrente.

A fonte de tensão do laboratório possui um relé de proteção contra sobrecorrentes. O relé de sobrecorrente, com uma unidade instantânea apenas, atuava quando o disjuntor era operado com tensões superiores a 60,3 kV, desligando a fonte e impossibilitando a realização do ensaio. A alternativa utilizada foi inserir um resistor de alta tensão de 23,4 k $\Omega$  (valor medido no local do ensaio com um ohmímetro digital e outro analógico) entre a fonte e o TPC para limitar a corrente e conseguir um nível de tensão maior.

O ensaio pôde ser feito com uma tensão máxima de 100 kV, acima desse valor houve desligamento da fonte pelo relé de sobrecorrente. A intensidade da corrente de curto-circuito, devido às repetidas operações do disjuntor, provocou também a danificação do resistor de alta tensão por causa da dissipação de energia térmica.

O ensaio de ferroressonância pode ser feito com a utilização do circuito do ensaio anterior com a diferença da chave continuar no secundário do TPC, Fig. 2.10.



**Figura 2.10** – Circuito para medição de ferroressonância com os capacitores C1 e C2 em paralelo.

Com os capacitores C1 e C2 em paralelo a tensão é aplicada diretamente no ponto intermediário do TPC. A tensão nominal no ponto intermediário é 17,3 kV. Como a

tensão a ser aplicada é 120 % da tensão nominal, a tensão aplicada pela fonte foi de 20,4 kV.

Os resistores R1 e R2 no secundário do TPC são décadas resistivas de valores 2 M $\Omega$  e de 400 k $\Omega$ , respectivamente, com uma relação resistiva de 6. Inicialmente, o circuito foi utilizado na medição das relações de tensões no divisor resistivo do secundário do TPC e da relação de tensão no primário, com o sinal proveniente do divisor capacitivo da fonte, Tabela 2.5.

**Tabela 2.5** – Valores medidos de tensões para o circuito da Fig. 2.10.

V1 (kV)	V1' (V)	V2 (V)	V2'(V)	V1/V1'	V2/V2'
17,4	2,23	117,0	16,8	7802,7	6,964
20,8	2,72	140,0	20,5	7647,1	6,829
20,5	2,63	138,3	20,0	7794,7	6,915

A relação média da tensão no divisor capacitivo da fonte é de 7748,17. O valor nominal da relação dos capacitores é de 7816, um erro de aproximadamente 1%. A relação média de tensões no divisor resistivo do secundário é de 6,903. O valor da relação dos resistores é de 6, um erro de 13%. Portanto, nas medições o valor da tensão intermediária  $V1'$  no primário será multiplicado pela relação de 7816 e o valor da tensão intermediária  $V2'$  no secundário será multiplicado pela relação de 6,903.

Na medição, a tensão aplicada foi de 20,8 kV e o disjuntor provocou um curto-circuito no secundário do TPC. Os gráficos das Fig. 2.11 e Fig. 2.12 representam as tensões no primário e no secundário, respectivamente.

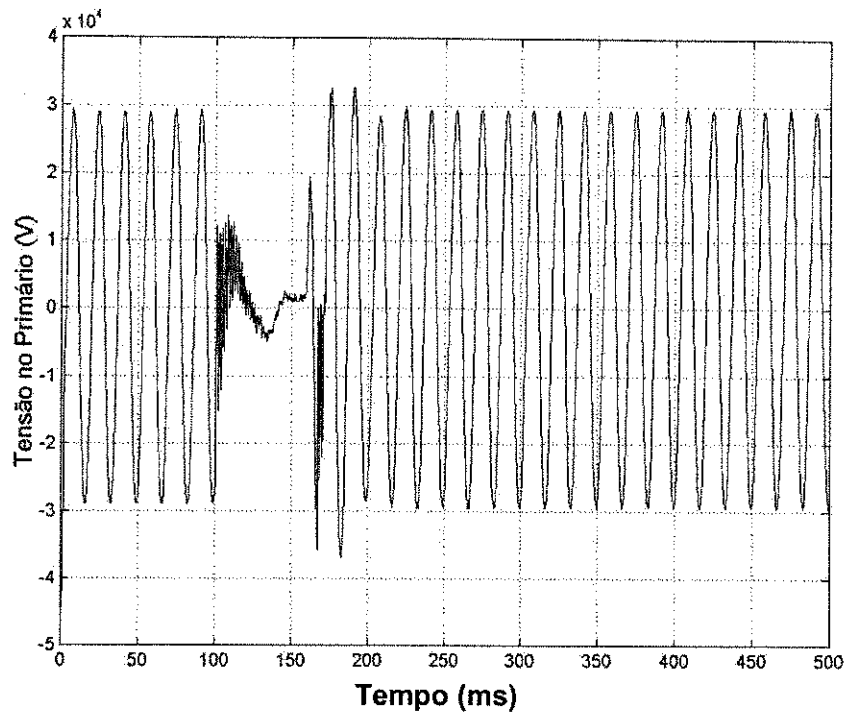


Figura 2.11 – Gráfico da tensão no primário do TPC para o ensaio de ferroressonância.

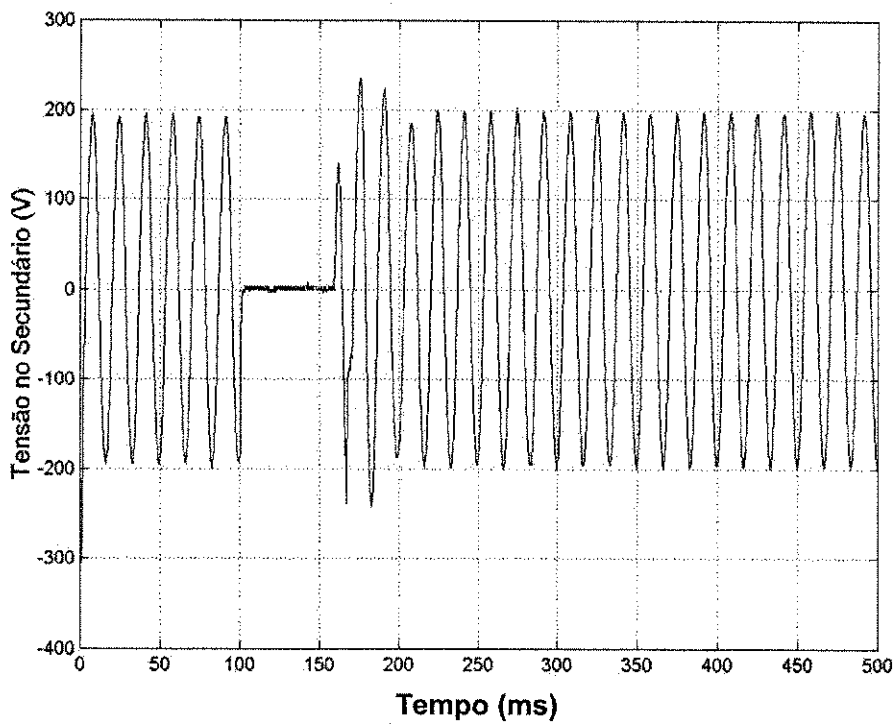


Figura 2.12 – Gráfico da tensão no secundário do TPC para o ensaio de ferroressonância.

O curto-circuito durou aproximadamente 58 ms, tempo maior que o mínimo estabelecido por norma de 50 ms.

A tensão da fonte (primário do TPC) manteve-se senoidal. Antes do curto, o pico positivo é 28,9 kV e após o curto a amplitude é de 29,4 kV um aumento de 1,7%, abaixo do máximo de 10%. O pico negativo da tensão antes do curto é de - 28,9 kV e após o curto a amplitude é de -29,4 kV, uma diminuição de -1,7%, acima de -5%. Os limites de 10% e -5% são estabelecidos por norma.

Nominalmente, a relação do TP indutivo é de 150, 6 e com uma tensão RMS de 20,8 kV no primário, a tensão no secundário é de 138,1 V com amplitude de 195,3 V. No gráfico, a amplitude da tensão no secundário antes do curto-circuito é 195,34 V, após o curto-circuito a amplitude é de 198,96 V, pode-se considerar que a amplitude do sinal de tensão permaneceu constante. O período transitório da tensão no secundário durou apenas quatro ciclos após a eliminação do curto. Comprovando a eficácia do circuito supressor de ferroressonância no amortecimento de sobretensões transitórias que podem aparecer nos terminais secundários de um TPC.



## **2.2. MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE TERRA**

### **2.2.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA**

Aterrar um equipamento elétrico, ou um componente de um sistema elétrico significa ligá-lo eletricamente a terra por meio de dispositivos apropriados.

Os aterramentos têm por objetivo assegurar a proteção do material, a melhoria dos serviços elétricos e a segurança do pessoal. Dentro dessa sistemática, os aterramentos podem ser classificados em:

- Aterramento de serviço;
- Aterramento de segurança.

Os aterramentos de serviço fazem parte integrante dos circuitos elétricos, como por exemplo, o aterramento do ponto neutro dos transformadores trifásicos ligados em estrela.

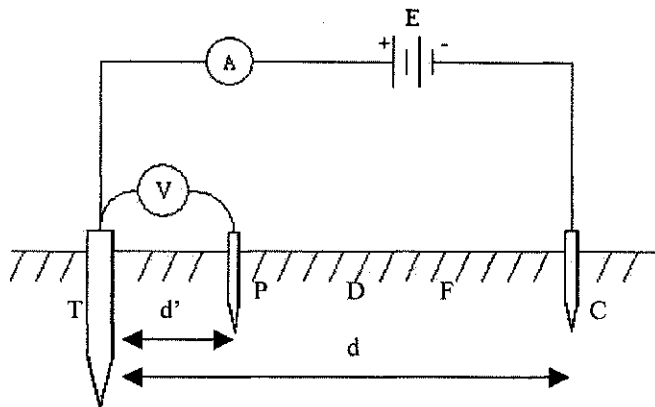
Os aterramentos de segurança evitam acidentes com o pessoal no caso de as partes aterradas serem acidentalmente energizadas, como por exemplo, o aterramento da carcaça dos motores.

A resistência de terra é a oposição oferecida à passagem da corrente elétrica do eletrodo de aterramento para a terra circunvizinha. Portanto, um aterramento para desempenhar satisfatoriamente a sua finalidade (serviço ou segurança) deve ter uma baixa resistência de terra a fim de que uma corrente elétrica que chegue ao mesmo possa facilmente circular para a terra circunvizinha.

A resistência de terra apresenta três componentes principais:

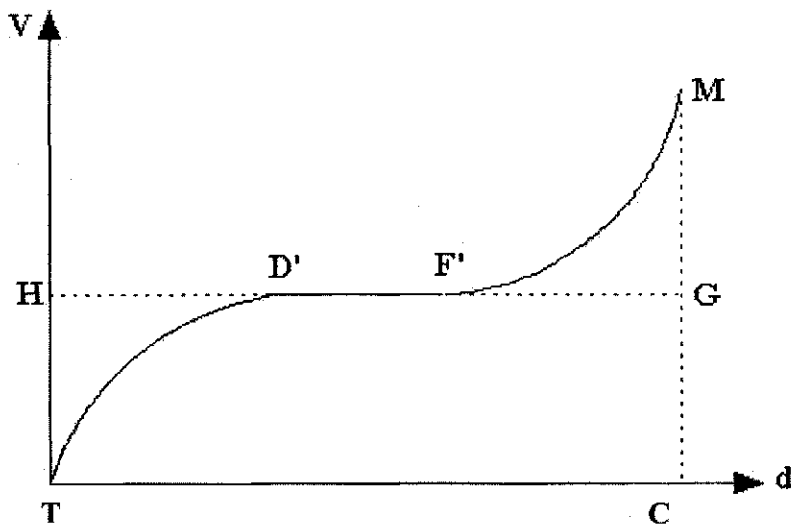
- A resistência elétrica do próprio eletrodo de aterramento;
- A resistência de contato entre o eletrodo de aterramento e a terra que o envolve;
- A resistência de terra circunvizinha, a qual depende da temperatura, da natureza do solo e do estado do solo.

O circuito da Fig. 2.13 é utilizado para medição de resistência de terra.



**Figura 2.13** – Circuito para medição de resistência de terra.

O circuito é composto por dois eletrodos de aterramento T e C separados por uma distância  $d$ . A haste P é um eletrodo de sonda que pode ser deslocado ao longo da reta TC de uma distância constante a partir da haste de aterramento C. Em cada ponto que P é fincado, à distância  $d'$  de T, é feita a correspondente leitura da tensão no voltímetro V. A variação dos potenciais entre os dois eletrodos T e C tem a forma da curva mostrada na Fig. 2.14.



**Figura 2.14** – Curva de variação dos potenciais em função da distância  $d$ .

A reta D'F' paralela ao eixo horizontal representa uma região de potencial constante. Para uma corrente  $I$  passar do eletrodo de aterramento  $X$  para a terra circunvizinha, foi necessário aplicar a diferença de potencial  $V_{XH}$ , podendo-se então concluir que a resistência de terra  $R_X$  do aterramento será:

$$R_X = \frac{V_{TH}}{I} \quad (5)$$

como conseqüência teremos:

$$R_B = \frac{V_{GM}}{I} \quad (6)$$

portanto, resistência total da terra será:

$$R_X + R_B = \frac{V_{CM}}{I} \quad (7)$$

A reta D'F' constitui o que na prática se chama de região de "patamar". A dimensão da região de "patamar" varia com o afastamento entre os eletrodos de aterramento e com as suas respectivas resistências de terra, porém situa-se sempre no centro da distância entre o eletrodo de aterramento  $T$  e o de injeção de corrente  $C$ . Normalmente, situa-se no ponto médio entre os dois eletrodos. O valor da resistência de terra é encontrado nessa região.

A ordem de grandeza da resistência de terra é função do tipo, da importância e do desempenho que deve ter a instalação elétrica à qual serve o aterramento. Normalmente, existem quatro categorias em termos absolutos.

- Excelentes: os aterramentos com resistência inferior a 5 ohms;
- Bons: os aterramentos com resistência compreendida entre 5 e 15 ohms;
- Razoáveis: os aterramentos com resistência entre 15 e 30 ohms;
- Condenáveis: os aterramentos com resistência superior a 30 ohms.

Em instalações elétricas de grande porte, como o caso das subestações, é desejável que o sistema de aterramento tenha resistência menor que 5 ohms (Excelente). Para o

caso de instalações de sistemas de distribuição é desejável que o valor dessa resistência seja até 10 ohms (Bom), sendo aceitável o limite máximo de até 25 ohms (Medeiros Filho, 1981).

## 2.2.2 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE TERRA

A medição da resistência de terra foi obtida no prédio da CREDUNI localizado no Campus da Universidade Federal de Campina Grande.

Na medição de resistência de terra foi utilizado um Megger (medidor de resistência de terra). O esquema de ligação conforme a Fig. 2.15 é constituído de um eletrodo T de aterramento da malha, os eletrodos P e C são, respectivamente, os eletrodos de prova de tensão e de corrente. A haste C é a de injeção de corrente e a haste P a de medição de potencial (Costa, 2002).

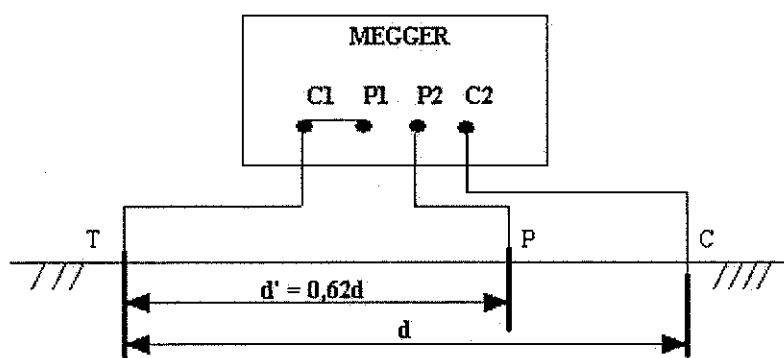


Figura 2.15 – Esquema de ligação para medição de resistência de aterramento.

Inicialmente o aterramento foi desligado da malha de terra para evitar que correntes de fuga que vêm a circular pelo solo possam interferir no instrumento. Outro problema que poderia ocorrer é uma falha na instalação protegida pelo sistema de aterramento que está sob ensaio e uma corrente intensa circularia através deste sistema para a terra circunvizinha. Uma parte desta corrente poderia circular pelo condutor elétrico que liga

o aterramento sob ensaio ao instrumento e este se danificaria. Ou ainda, o operador sofrer um choque elétrico, podendo ser até fatal (Medeiros Filho,1981).

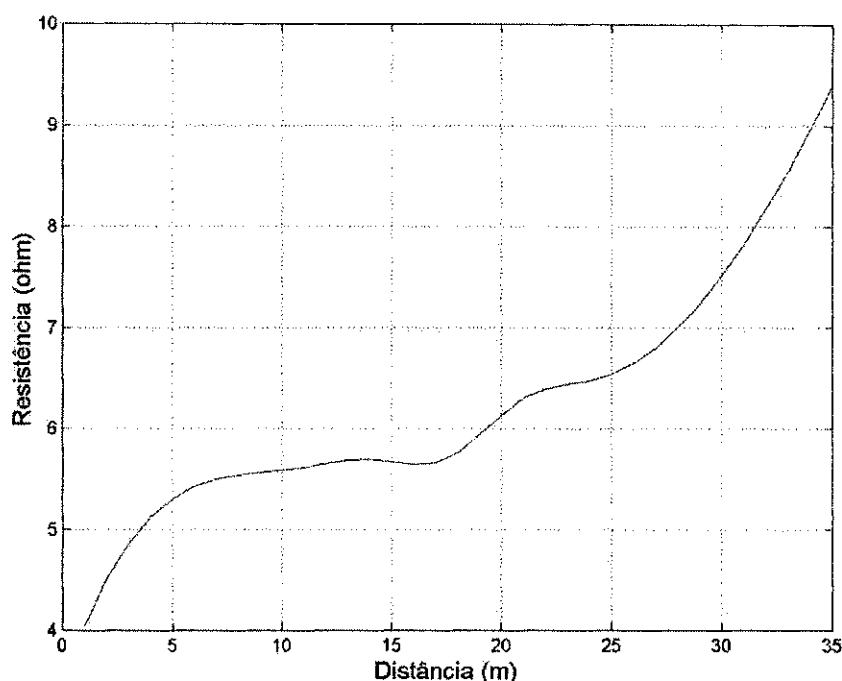
O eletrodo de corrente C foi cravado a uma distância de 35 metros da haste de aterramento T. A haste de potencial P foi cravada a uma distância inicial de 3,5 m do eletrodo de aterramento. Uma corrente foi injetada pelo Megger no eletrodo de corrente C e medida a diferença de potencial entre o eletrodo de potencial P e o aterramento T. O valor da resistência do aterramento é fornecido diretamente pelo equipamento de medição Megger.

O valor da resistência de aterramento é obtido para diversos pontos da localização da haste de potencial. O intervalo de medições foi feito com uma distância de 3,5 m. Na Tabela 2.6 encontram-se os valores da resistência medida para cada valor de distância.

**Tabela 2.6** – Valores medidos da resistência de terra para cada valor de distância da haste T.

<b>Medição</b>	<b>Distância(m)</b>	<b>Resistência (<math>\Omega</math>)</b>
1	3,50	5,0
2	7,00	5,0
3	10,50	5,5
4	14,00	5,7
5	17,50	5,7
6	21,00	6,3
7	24,50	6,5
8	28,00	7,0
9	31,50	8,0

A curva da resistência em função da distância pode ser visualizada na Fig. 2.16. Como foram poucas a quantidades de pontos uma interpolação através de uma função cúbica para melhorar a visualização do gráfico foi realizada.



**Figura 2.16** – Curva da resistência de terra em função da distância

Alternativamente, a resistência de aterramento pode ser obtida com uma única medição. Analiticamente, a distância  $d'$  entre o eletrodo de potencial P e o centro da malha de aterramento deve ser de 61,8 % da distância entre o aterramento T e o eletrodo de corrente C (Costa, 2002). Portanto, 61,8 % da distância de 35 m é 21,63 m. De acordo com a Tabela 2.6 a resistência de terra do aterramento do prédio da CREDUNI é um pouco abaixo de 6,5  $\Omega$ . O valor da resistência encontra-se um pouco acima da região de patamar no gráfico da Fig. 2.16.

O valor da resistência de 6,5  $\Omega$  pode ser considerado como um bom valor para resistências de instalações de distribuição (entre 5 e 15 ohms). Porém, o valor da resistência podia ser melhorado com um projeto de aterramento mais adequado. No local

da medição foram encontradas as seguintes falhas: o fio utilizado não é o adequado para o aterramento. O mais adequado para sistemas de aterramento é o fio de cobre nu de 16 mm<sup>2</sup>. Outra falha é a haste de terra que não estava bem fixa ao solo e com pouca profundidade.

A melhoria da resistência de terra poderá ser feita através de quatro processos (Medeiros Filho, 1981):

- Aprofundamento das hastes de aterramento;
- Aumento da quantidade de hastes em paralelo;
- Tratamento do solo;
- Aumento da área própria das hastes de aterramento.

### 3. CONCLUSÕES

O Estágio foi realizado cumprindo toda a carga horária estabelecida de 120 h de forma proveitosa e didática.

As medições de tensões transitórias no TPC possibilitaram avaliar o ótimo funcionamento do circuito supressor de ferroressonância no amortecimento de sobretensões transitórias. A falta do circuito supressor de ferroressonância não protegeria os equipamentos de medição, proteção e controle ligados ao secundário do TPC. No ensaio de ferroressonância, as tensões no primário e no secundário, com a tensão aplicada no ponto intermediário na entrada do TP indutivo, obedeceram às observações dadas pela Norma IEC 186.

A medição da resistência de terra no prédio da CREDUNI possibilitou avaliar o estado do aterramento do prédio. O valor de resistência medido de  $6,5 \Omega$  é um valor considerado como bom em instalações de distribuição elétrica. Porém, a resistência de terra poderia diminuir com um projeto mais adequado de aterramento.

O estágio possibilitou aplicar conhecimentos de disciplinas como Circuitos Elétricos, Instalações Elétricas, Técnicas de Medição, Equipamentos Elétricos e Matérias Elétricas.



## 4. BIBLIOGRAFIA

- COSTA, E. G. – *Malha de aterramento da estação rádio base (ERB) da Telemar – São José*, Relatório de Ensaio, 2002;
- FERNANDES Jr., D. *Investigação da Resposta Ferroressonante de um Transformador de Potencial Capacitivo, Projeto e Pesquisa (Relatório)*, UFPB, setembro 2001.
- IEC 186 (1969). *Voltage Transformers, First Supplement (1970), Amendment No. 1*, 1978. *Apud* D’AJUZ, A., RESENDE, F. M., CARVALHO, F. M. S., NUNES, I. G., AMON FILHO, J., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., KASTRUP FILHO, O. e MORAIS, S. A. *Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. Rio de Janeiro, FURNAS 1985.
- FERNANDES Jr., D. *Representação de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*, Exame de Qualificação, UFCG, fevereiro 2003.
- MEDEIROS Fº, S. – *Fundamentos de Medidas Elétricas*, Livros Técnicos e Científicos Ltda, Segunda Edição, 1981;
- MEDEIROS Fº, S. – *Medição de Energia Elétrica*, Livros Técnicos e Científicos Ltda., Primeira Edição, 1997;