TESE
333

COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A SF_6

Preparado por:
Francisco Manoel Salgado Carvalho

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca MAUÁ
Itajubá

Orientado por:
Banca Examinadora:

José Carlos de Oliveira
Paulo Cesar Vaz Esmeraldo
João Roberto Cogo

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
04 JUN 1982
BIBLIOTECA MAUÁ

MAIO 1982

CLASS. 621.315.625:621.311.4(043.2)
CUTT. C 331 c
TOMBO 333

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

PORTARIA Nº 101, DE 06 DE MAIO DE 1982.

O Presidente da Comissão de Pós-Graduação, usando das atribuições que lhe são conferidas pelo Art. 9º do Regulamento da Comissão de Pós-Graduação

Resolve designar a Comissão composta pelos Senhores PAULO CESAR VAZ ESMERALDO, JOÃO ROBERTO COGO e JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA (Orientador) para, na forma do Regulamento para Defesa de Dissertação de Mestrado, constituir a Banca Especial que, publicamente e a partir das 9.00 horas do dia 08 de maio de 1982, examinará o candidato FRANCISCO MANOEL SALGADO CARVALHO, autor do trabalho de Dissertação intitulado: "Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6", e apresentado como exigência final para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica a ser-lhe concedido, se aprovado e satisfeitas as demais exigências regulamentares.

Prof. Antonio Eduardo Hermeto
Presidente
Comissão de Pós-Graduação

./jmm

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 101 de 06 / 05 / 82, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A SF_6"

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à FRANCISCO MANOEL SALGADO CARVALHO.

Itajubá, 08 de maio de 1982

1º Examinador
Engº Paulo Cesar Vaz Esmeraldo
FURNAS S/A

2º Examinador
Prof. João Roberto Cogo-EFEI

3º Examinador
Prof. José Carlos de Oliveira
ORIENTADOR

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A SF_6"

Autor: FRANCISCO MANOEL SALGADO CARVALHO

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	
2º	A	
3º	A	

Resultado médio: Conceito A, ou seja APROVADO

Observações:

Itajubá, 08 de maio de 1982

1º Examinador
Engº Paulo Cesar Vaz Esmeraldo
FURNAS S/A

2º Examinador
Prof. João Roberto Cogo-EFEI

3º Examinador
Prof. José Carlos de Oliveira
ORIENTADOR

AGRADECIMENTOS

Agradeço a FURNAS-Centrais Elétricas S.A., na pessoa dos engenheiros Sérgio de Oliveira Frontin & Luiz Eduardo Nora Dias, da Divisão de Estudos de Equipamentos e do Departamento de Sistemas Elétricos, que me indicaram para o Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos (CESE), realizado na Escola Federal de Engenharia de Itajubá, durante o ano de 1980, em convênio com a ELETROBRÁS. O atendimento ao CESE-80, simultaneamente com a Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da EFEI, permitiu-me obter os créditos que somados, agora, a este trabalho de dissertação completam as exigências regimentais do Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica.

Da mesma forma, agradeço aos meus orientadores e examinadores, engenheiros José Carlos de Oliveira, Paulo Cesar Vaz Esmeraldo e João Roberto Cogo, pelo apoio, incentivo e boa vontade a mim dedicados durante toda a elaboração deste trabalho. Tenho em conta que isto contribuiu para que o objetivo final fosse alcançado.

Francisco M. Salgado Carvalho
Itajubá - Maio 1982

RESUMO

O contínuo crescimento dos meios de produção e de transmissão de energia elétrica impõe à Engenharia de Sistemas Elétricos a procura de soluções novas para os problemas que vão aparecendo no setor.

No que se refere mais particularmente a novos equipamentos, o desenvolvimento das subestações blindadas a SF_6 é, seguramente, um dos fatos mais representativos destes últimos 10 anos.

O objetivo deste trabalho de dissertação é apresentar o "estado da arte" da Coordenação de Isolamento deste novo tipo de subestações.

O trabalho se divide em duas partes principais. Na Parte 1 é apresentada a Teoria da Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6, com destaques para os seguintes pontos principais:

- Sobretensões Impostas a uma Subestação Isolada a SF_6
- Princípio de Propagação de Sobretensões Atmosféricas numa Subestação Isolada a SF_6
- Características das Descargas Atmosféricas e Origem das Sobretensões Atmosféricas que Atingem uma Subestação Isolada a SF_6
- Características Nominais de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6
- Métodos de Limitação de Sobretensões em uma Subestação Isolada a SF_6
- Dados Utilizados em Estudos de Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6

- Parâmetros que Influenciam as Sobretensões de Origem Atmosféricas numa Subestação Isolada a SF_6

Na Parte 2 é feito um estudo completo da Coordenação de Isolamento de uma subestação isolada a SF_6, consolidando-se os conceitos teóricos definidos anteriormente.

Finalmente, cabe observar que, sendo este trabalho uma dissertação sobre a aplicação prática do tema Coordenação de Isolamento, conceitos básicos de sobretensões em sistemas elétricos são admitidos como previamente conhecidos, não sendo aqui apresentados.

ÍNDICE

PÁGINA

PARTE 1 - TEORIA DA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A SF_6

CAPÍTULO I

1.1. Introdução 1

1.2. Objetivo 1

CAPÍTULO II

2.1. Sobretensões Impostas a uma Subestação Isolada a SF_6... 5

2.2. Sobretensões Temporárias 8

2.3. Sobretensões de Manobra 11

2.4. Sobretensões Atmosféricas 12

CAPÍTULO III

3.1. Princípio de Propagação de Sobretensões Atmosféricas numa Subestação Isolada a SF_6 13

CAPÍTULO IV

4.1. Características das Descargas Atmosféricas que Atingem as Linhas de Transmissão Ligadas à Subestação Isolada a SF_6 22

CAPÍTULO V

5.1. Origem das Sobretensões Atmosféricas que Atingem uma Subestação Isolada a SF_6 29

5.2. Descargas Diretas 29

5.2.1. Valores Recomendados pela Literatura 29

5.2.2. Cálculo Através do Modelo Eletrogeométrico 30

5.3. Descargas Indiretas 36

PÁGINA

CAPÍTULO VI

6.1. Características Nominais de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6 39

6.2. Escolha dos Níveis de Isolamento (Margens de Proteçao) 40

CAPÍTULO VII

7.1. Métodos de Limitação de Sobretensões em uma Subesta - ção Isolada a SF_6 42

7.2. Limitação das Sobretensões por Pára-raios Convencio nais 42

7.3. Limitação das Sobretensões por Pára-raios de Óxido de Zinco (sem "Gap")..... 43

7.4. Limitação das Sobretensões por Centelhadores 44

7.5. Limitação das Sobretensões por Cabos Pára-raios e Aterramento das Linhas Conectadas à Subestação Isola- das à SF_6 46

CAPÍTULO VIII

8.1. Dados Específicos e Fundamentais a Serem Utilizados nos Estudos de Coordenação de Isolamento de Subesta - ções Isoladas a SF_6 53

8.2. Barramento Isolado a SF_6 53

8.3. Elementos Dentro do Barramento Isolado a SF_6 56

8.3.1. Disjuntores 56

8.3.2. Buchas 57

8.3.3. Transformadores de Potencial ..,..... 58

a) Transformador de Potencial Indutivo 58
b) Divisor Capacitivo de Potencial 58

8.3.4. Demais Elementos 60

8.4. Elementos Fora do Barramento Isolado a SF_6 60

8.4.1. Linha de Transmissão 60

8.4.2. Transformadores de Potência 60

8.4.3. Transformadores de Potencial 61

PÁGINA

a) Transformador de Potencial Indutivo 61
b) Divisor Capacitivo de Potencial 61

8.4.4. Pára-raios 62

a) Pára-raios Convencionais 62
b) Pára-raios de Óxido de Zinco (sem "Gap") 63
c) Pára-raios Blindados ou Encapsulados 65

8.4.5. Centelhadores 65

8.4.6. Torre de Transmissão 65

8.4.7. Resistência de Aterramento das Torres de Transmissão 66

CAPÍTULO IX

9.1. Parâmetros que Influenciam as Sobretensões de Origem Atmosféricas numa Subestação Isolada a SF_6 67

9.2. Localização dos Pára-raios 67

9.3. Comprimento das Ligações dos Pára-raios às Fases 75

9.4. Amplitude e Taxa de Crescimento das Ondas de Tensão que Incidem na Subestação Isolada a SF_6 81

9.5. Divisor Capacitivo de Potencial Localizado na Entrada da Subestação Isolada a SF_6 88

9.6. Capacitância de Surto do Transformador de Potencia .. 95

9.7. Tensão à Frequência Industrial do Sistema, no Instante da Incidência da Descarga Atmosférica 101

9.8. Arranjo Físico da Subestação Isolada a SF_6 e Características das Linhas de Transmissão a elas Conectadas. 108

CAPÍTULO X

10.1. Regras Básicas Recomendáveis para a Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6 109

10.2. Seleção dos Pára-raios 109

10.3. Localização dos Pára-raios para Proteção de uma Subestação Isolada a SF_6 110

CAPÍTULO XI

11.1. Conclusões (Parte 1) 112

PÁGINA

PARTE 2 - SIMULAÇÃO DE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO ISOLADA A SF_6, NA TENSÃO DE 500 kV

CAPÍTULO XII

12.1. Sumário 114

CAPÍTULO XIII

13.1. Configuração da Subestação Isolada a SF_6 Estudada .. 116

13.2. Configuração Particular (Linha Aberta) 122

CAPÍTULO XIV

14.1. Parâmetros Utilizados 127

14.2. Barramento Isolado a SF_6 127

14.3. Elementos Dentro do Barramento Isolado a SF_6 127

14.3.1. Disjuntores 127

14.3.2. Buchas 127

14.3.3. Divisores Capacitivos de Potencial 127

14.3.4. Demais Elementos 128

14.4. Elementos Fora do Barramento Isolado a SF_6 128

14.4.1. Linha de Transmissão 128

14.4.2. Transformador de Potência 133

14.4.3. Divisores Capacitivos de Potencial 133

14.4.4. Pára-raios 134

14.4.5. Torre de Transmissão 134

14.4.6. Resistência de Aterramento das Torres..... 134

14.4.7. Isoladores 134

14.5. Descargas Atmosféricas 134

14.5.1. Descargas Diretas 135

14.5.2. Descargas Indiretas 135

PÁGINA

CAPÍTULO XV

15.1. Descrição dos Casos Simulados 136

CAPÍTULO XVI

16.1. Resultados Obtidos 155

CAPÍTULO XVII

17.1. Análise dos Resultados e sua Utilização na Coordenação de Isolamento da Subestação (Conclusões - Parte 2) 224

APÊNDICE I - Programa Digital Utilizado nas Simulações - Electromagnetic Transients Program 226

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 232

PARTE 1

TEORIA DA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A SF_6

CAPÍTULO I

1.1. Introdução

A utilização de subestações isoladas a SF_6 vem crescendo em todo o mundo, na medida que vão se tornando mais econômicas e mais adequadas que as subestações convencionais. Esta utilização ocorre, principalmente, no caso de subestações dentro de áreas metropolitanas com problemas de espaço. Outra grande aplicação de subestações isoladas a SF_6 é nos centros de geração, onde a natureza do terreno (não quanto a área disponível) solicita, às vezes, a utilização de equipamentos que ocupem pouco espaço.

Conforme já dito, a grande vantagem das subestações isoladas a SF_6 são as suas dimensões compactas. Os espaços típicos ocupados por este tipo de subestações são bem menores quando comparados com subestações convencionais. Na referência [26] há a informação que uma subestação isolada a SF_6 ocupa 1/25 do volume e 1/10 da área de uma subestação convencional. Naturalmente, quanto menor for a tensão nominal do sistema menores serão as dimensões ocupadas pelas mesmas.

Esta realidade começa a chegar ao Brasil onde já são encontradas nos sistemas da LIGHT e da ELETROPAULO algumas subestações isoladas a SF_6 nas regiões metropolitanas do Rio e São Paulo, respectivamente. No sistema de Extra Alta Tensão (E.A.T.) já existem as subestações de Grajaú, de FURNAS-Centrais Elétricas S.A., nas tensões de 500 kV e 138 kV, bem como a de Foz de Areia, da Companhia Paranaense de Energia Elétrica S.A. (COPEL). Também as subestações das duas maiores usinas atualmente em construção (Tucuruí, da ELETRONORTE, e Itaipu, da ITAIPU-BINACIONAL), ambas na tensão de 500 kV, deverão ser isoladas a SF_6. Não é de difícil previsão que outras se seguirão a estas.

1.2. Objetivo

Diante deste quadro, a escolha do tema "Coordenação de Isolamento

de Subestações Isoladas a SF_6", para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação, tem por objetivo apresentar o "estado da arte" desta nova tecnologia que, certamente, será largamente empregada no sistema elétrico brasileiro.

Com as subestações isoladas a SF_6 se consegue os mesmos tipos de esquemas de manobra que numa subestação convencional (barra dupla, anel, disjuntor e meio, etc.). Na Figura 1.1, a seguir, é apresentado, para efeito ilustrativo, um terminal típico de uma subestação isolada a SF_6 [5].

O trabalho, a ser apresentado, será constituído de duas partes distintas. Na Parte 1 intitulada "Teoria da Coordenação de Isolamento de Subestações a Isoladas a SF_6", é apresentada uma descrição detalhada da situação atual do assunto em questão. Na Parte 2, os conceitos teóricos são aplicados de forma prática, ao se fazer a coordenação de isolamento, completa, de uma subestação isolada a SF_6, na tensão de 500 kV.

Para melhor ilustrar os objetivos da Parte 1 vale lembrar a definição tradicional de Coordenação de Isolamento:

> "É o processo da correlação da capabilidade da isolação do equipamento elétrico com os valores das sobretensões elétricas a ele impostas e as características dos dispositivos de proteção contra surtos".

Face à conceituação acima analisar-se-á, então, na Parte 1, as sobretensões impostas às subestações isoladas a SF_6 distinguindo-se aquelas que definem o seu isolamento (CAPÍTULO II). Será descrita, também, a formação das sobretensões de origem atmosférica no interior do barramento isolado a SF_6 (CAPÍTULO III), e definidas as sobretensões mais severas desta natureza (dentro da realidade) que atingem as subestações (CAPÍTULOS IV e V). Um levantamento completo dos dados específicos e fundamentais usados em estudos de Coordenação de Isolamento é apresentado (CAPÍTULO VIII). Estes dados foram recolhidos ao longo das Referências Bibliográficas.

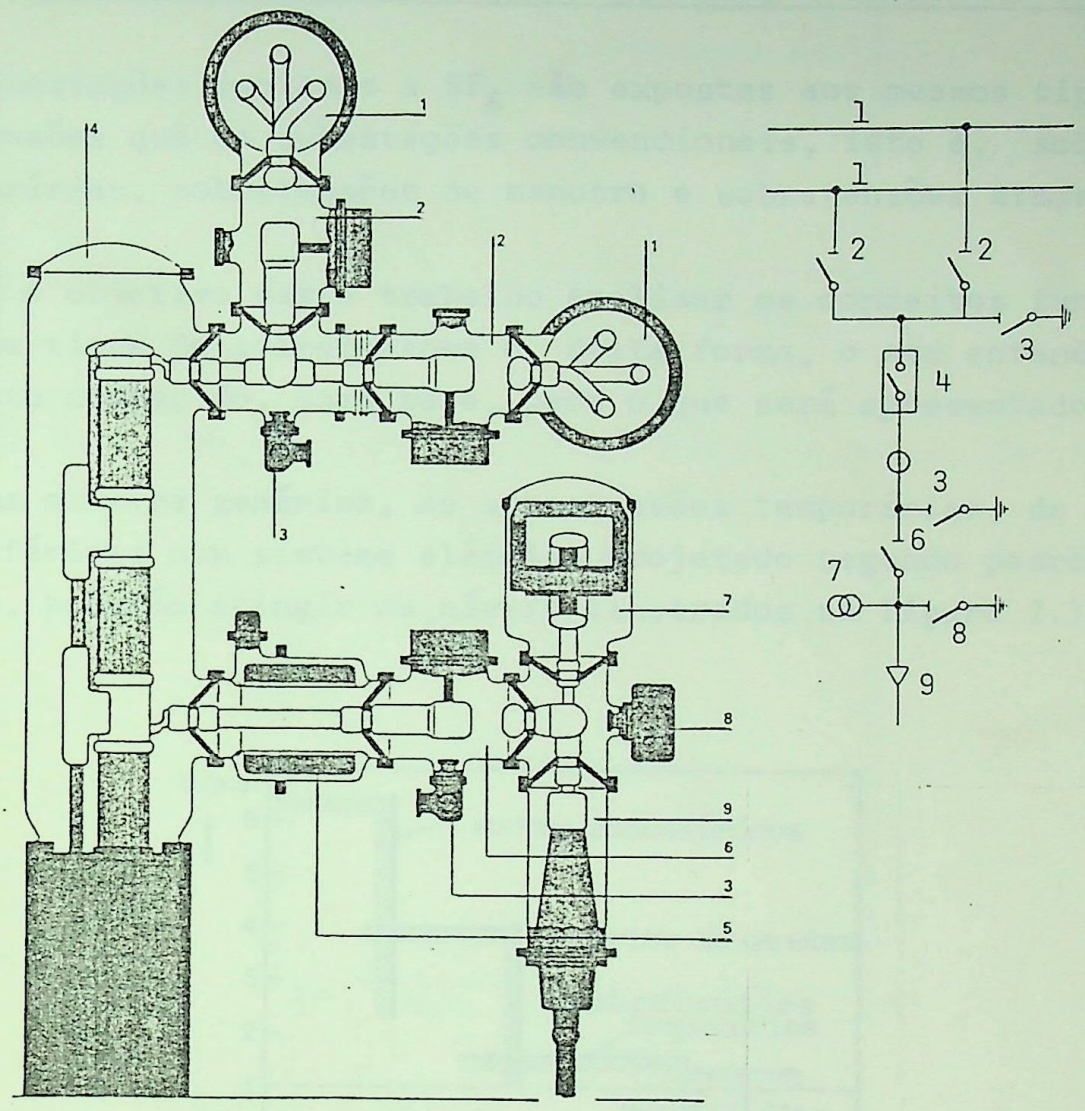
Também, são mostrados os isolamentos padronizados pela IEC e ANSI, assim como regras sugeridas pela literatura atual para se efetuar a escolha dos isolamentos, quando se conhece as sobretensões a eles impostas (CAPÍTULO VI).

A seguir, são mostrados os métodos de limitação de sobretensões em uma subestação isolada a SF_6 (CAPÍTULO VII) e os parâmetros que influenciam as sobretensões de origem atmosférica (CAPÍTULO IX).

A Parte 1 é finalizada mostrando-se a coordenação de isolamento por meio de pára-raios (CAPÍTULO X) e um resumo das principais conclusões sobre o assunto (CAPÍTULO XI).

Vale lembrar que aqui não serão repetidos conceitos básicos tais como tipos de sobretensões (temporárias, de manobra e atmosféricas), pára-raios, centelhadores, propagação de ondas viajantes, representação de diferentes equipamentos em estudos de transitórios, etc.. Para entendimento de tais conceitos, a literatura clássica do tema "Sobretensões" deverá ser conhecida [1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10].

Na Parte 2 é feita a consolidação dos conceitos estabelecidos na Parte 1 fazendo-se a Coordenação de Isolamento de uma subestação a SF_6, na tensão de 500 kV. O programa utilizado para o estudo foi o Electromagnetic Transient Program, desenvolvido pela Bonneville Power Administration (Portland, U.S.A.) por ser este o programa de transitórios disponível ao se realizar este trabalho e, também, por ser, atualmente, um programa utilizado em escala mundial. Vale dizer, entretanto, que qualquer programa de transitórios que permitisse a representação adequada dos diferentes elementos, conforme descritos no CAPÍTULO VIII, poderia ser utilizado. Não foi objetivo, aqui, desenvolver-se um programa de transitórios. Este tema foi tratado, recentemente, como trabalho de dissertação de mestrado na própria EFEI.



1 - Barramento
2 - Chave secionadora
3 - Chave de terra
4 - Disjuntor
5 - Transformador de corrente
6 - Secionadora de linha
7 - Transformador de potência
8 - Chave de terra
9 - Bucha

FIGURA 1.1 - Vista, em Corte, de um Terminal de uma Instalação Isolada a SF_6 [5]

CAPÍTULO II

2.1. Sobretensões Impostas a uma Subestação Isolada a SF_6

As subestações isoladas a SF_6 são expostas aos mesmos tipos de sobretensões que as subestações convencionais, isto é, sobretensões temporárias, sobretensões de manobra e sobretensões atmosféricas.

Não é o objetivo deste trabalho analisar os conceitos fundamentais destes tipos de sobretensões e, desta forma, o seu entendimento é suposto conhecido, como base, para o que será apresentado a seguir.

De uma maneira genérica, as sobretensões temporárias, de manobra e atmosféricas num sistema elétrico projetado segundo padrões habituais, poderão atingir os níveis ilustrados na Figura 2.1, a seguir.

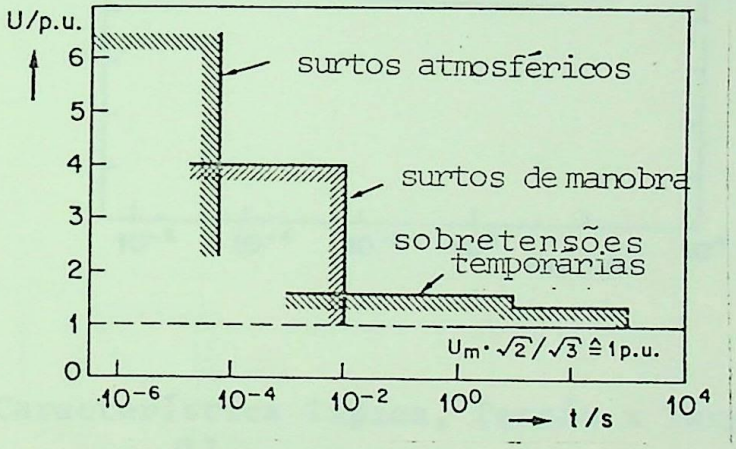


FIGURA 2.1 - Valores Típicos das Diferentes Sobretensões em um Sistema E.A.T. [5]

Nas Figuras 2.2 e 2.3, a seguir, indica-se a característica, tensão x tempo, dos isolamentos a ar e dos isolamentos a SF_6, respectivamente. Observar que a altura da curva, em relação ao eixo das tensões, dependerá do nível de isolamento para impulsos atmosféricos destes isolamentos.

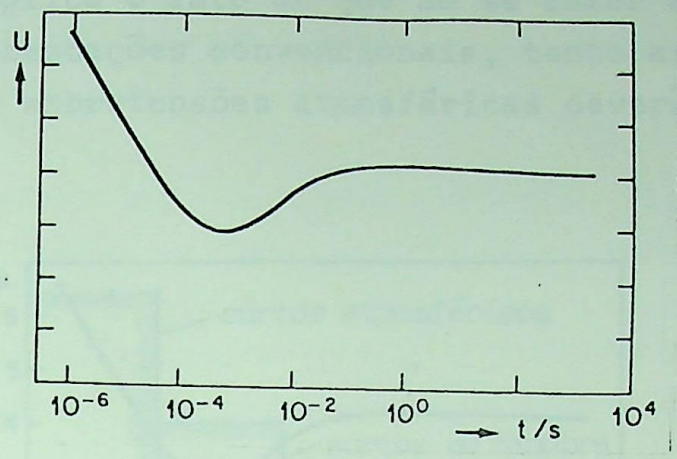


FIGURA 2.2 - Característica Típica, Tensão x Tempo, de um Isolamento a Ar [5]

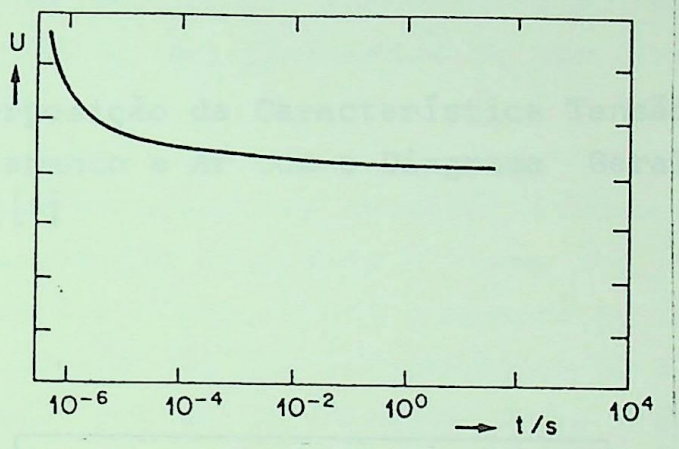


FIGURA 2.3 - Característica Típica, Tensão x Tempo, de um Isolamento a SF_6 [5]

Nas Figuras 2.4 e 2.5, a seguir, é mostrada a superposição das curvas tensão x tempo dos dois tipos de isolamento (ar e SF_6, respectivamente) com o diagrama das sobretensões que se espera obter no sistema, que deverá ter sido dimensionado seguindo padrões habituais. Nestas figuras, observa-se que no caso dos isolamentos a ar (aqui deve-se entender as subestações convencionais) a característica tensão x tempo do isolamento poderá ser superada tanto na re

gião das sobretensões atmosféricas quanto na das sobretensões de manobra. Isto explica o fato de que ao se fazer a coordenação de isolamento das subestações convencionais, tanto as sobretensões de manobra quanto as sobretensões atmosféricas deverão ser investigadas.

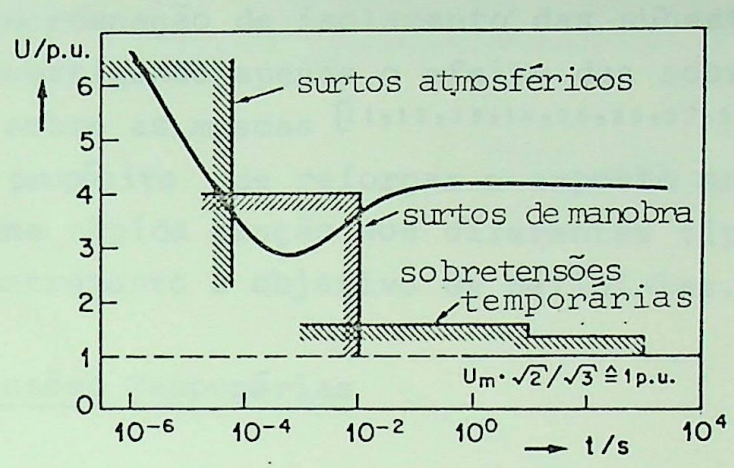


FIGURA 2.4 - Superposição da Característica Tensão x Tempo de um Isolamento a Ar com o Diagrama Geral de Sobretensões [5]

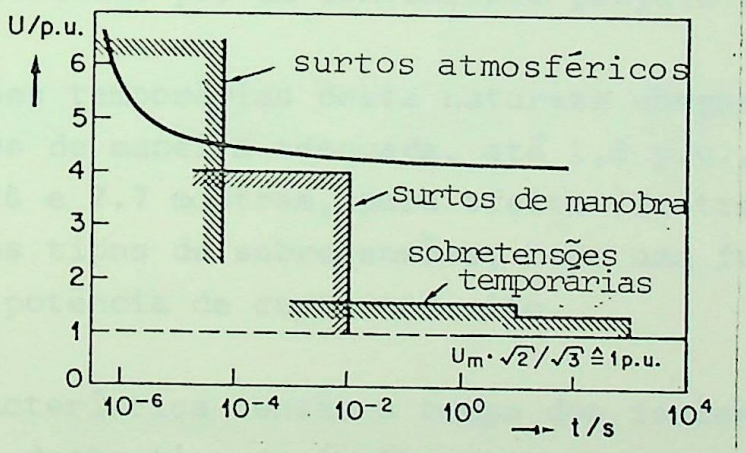


FIGURA 2.5 - Superposição da Característica Tensão x Tempo de um Isolamento a SF_6 com o Diagrama Geral de Sobretensões [5]

Para os isolamentos a SF_6, o objetivo deste trabalho de dissertação, observa-se que a característica tensão x tempo dos referidos isolamentos será ultrapassada apenas na faixa correspondente as sobretensões atmosféricas.

Desta análise deve-se entender, nesta fase inicial, as razões pelas quais a coordenação de isolamento das subestações isoladas a SF_6 se faz investigando apenas o efeito das sobretensões de origem atmosféricas sobre as mesmas [1,12,13,14,25,26,27,28,29,38,41,42,43,45,54,55,56,59]. Com o propósito de reforçar o exposto anteriormente, faz-se a seguir uma rápida menção aos diferentes tipos de sobretensão sem ter-se, entretanto o objetivo de defini-las.

2.2. Sobretensões Temporárias

As sobretensões temporárias são importantes porque determinam a escolha da tensão nominal dos pára-raios e, por conseguinte, os seus níveis de proteção.

As mais importantes sobretensões temporárias são aquelas que ocorrem devido à superposição de falhas a terra com rejeição de carga. Algumas vezes haverá o risco de que apareçam as chamadas sobretensões ressonantes, devido às não linearidades do sistema, mas estas poderão ser evitadas por um conveniente projeto do sistema.

As sobretensões temporárias desta natureza chegam, para os sistemas projetados de maneira adequada, até 1,6 p.u., aproximadamente. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram, para efeito ilustrativo, exemplos feitos para estes tipos de sobretensões, como uma função da carga rejeitada e da potência de curto-circuito.

Devido à característica tensão x tempo dos isolamentos a SF_6, o comportamento deste tipo de isolamento para estas sobretensões será sempre satisfatório [5,11,26,59].

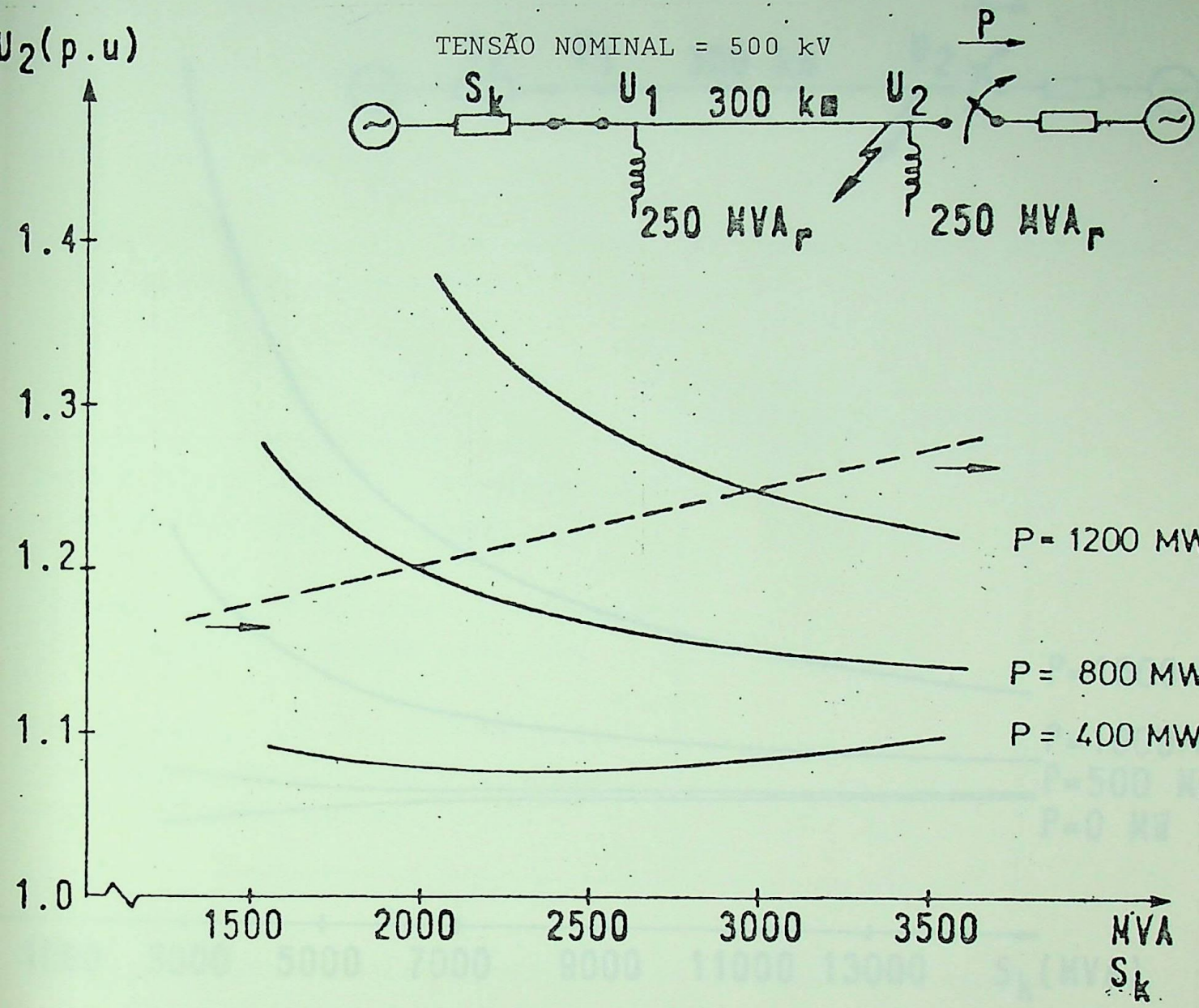


FIGURA 2.6 - Sobretensões Temporárias Provenientes de Rejeição de Carga Superposta com Curto Monofásico, para o Sistema Ilustrado acima [59]

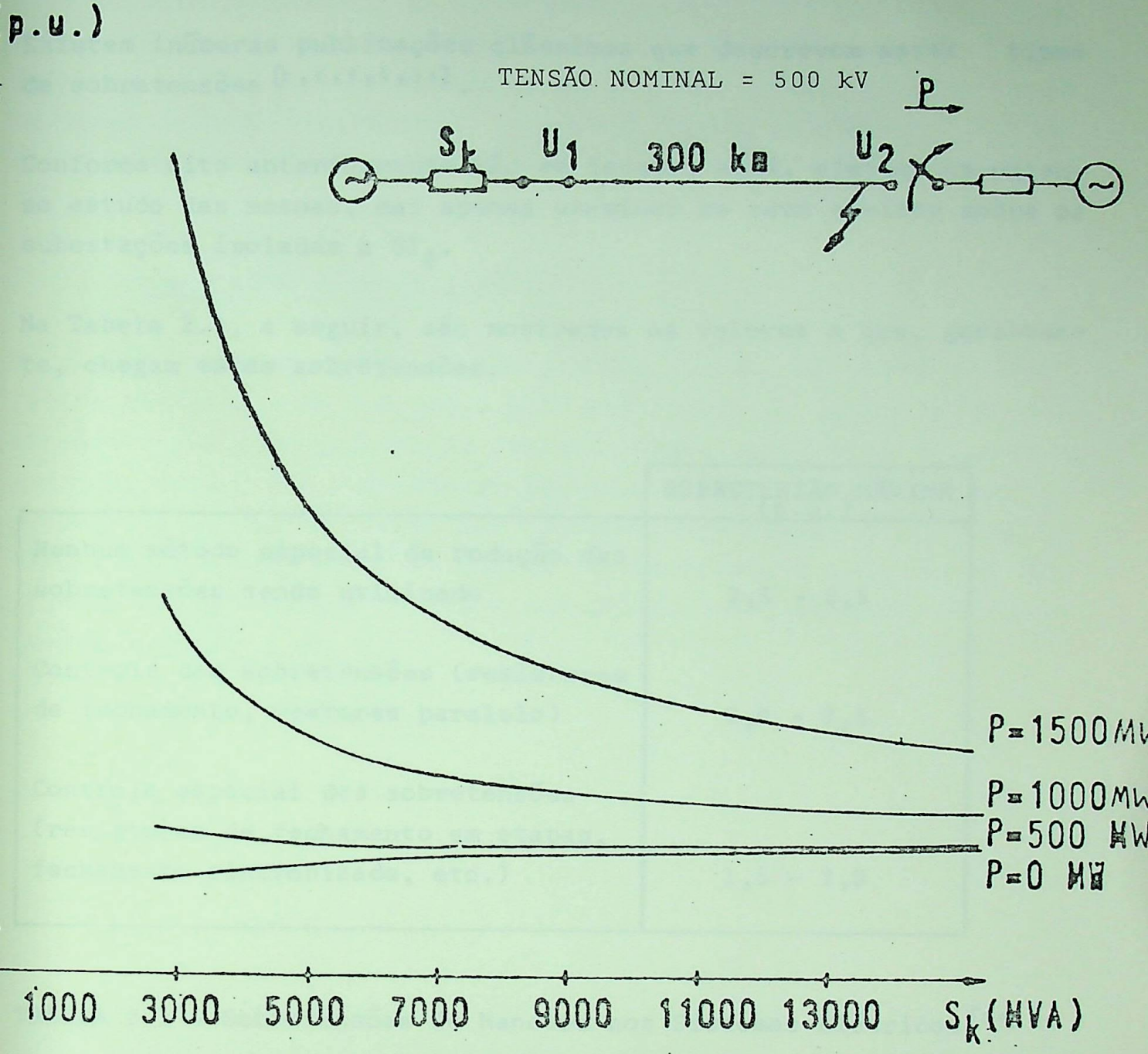


FIGURA 2.7 - Sobretensões Temporárias Provenientes de Rejeição de Carga Superposta com Curto Monofásico, para o Sistema Ilustrado acima [59]

2.3. Sobretensões de Manobra

Existem inúmeras publicações clássicas que descrevem estes tipos de sobretensões [2,5,7,9,10].

Conforme dito anteriormente não se deseja, aqui, efetuar um extenso estudo das mesmas, mas apenas examinar os seus efeitos sobre as subestações isoladas a SF_6.

Na Tabela 2.1, a seguir, são mostrados os valores a que, geralmente, chegam estas sobretensões.

	SOBRETENSÃO MÁXIMA (p.u.)
Nenhum método especial de redução das sobretensões sendo utilizado	2,5 - 3,5
Controle das sobretensões (resistores de fechamento, reatores paralelo)	2,0 - 2,5
Controle especial das sobretensões (resistores de fechamento em etapas, fechamento sincronizado, etc.)	1,5 - 2,0

TABELA 2.1 - Sobretensões de Manobra nos Sistemas Elétricos [59]

A IEC [60] e o IEEE [61] padronizaram os níveis de isolamento às sobretensões de manobra das subestações isoladas a SF_6 (CAPÍTULO VI) numa faixa situada entre 2,28 - 3,47 p.u. e é necessário proteger as mesmas contra sobretensões que cheguem a valores superiores a estas.

Normalmente esta proteção já é conseguida se a subestação estiver bem protegida contra sobretensões atmosféricas.

A formação das tensões no interior dos barramentos isolados à SF_6 é um fenômeno puramente de ondas trafegantes (CAPÍTULO III). Como a taxa de crescimento das sobretensões de manobra é bem lenta (100-200 μseg.) e as distâncias dentro do SF_6 bem curtas, não se terá ao longo de todo o barramento isolado a SF_6 sobretensões maiores que a tensão de disparo para surtos de manobra dos pára-raios [5, 11, 59].

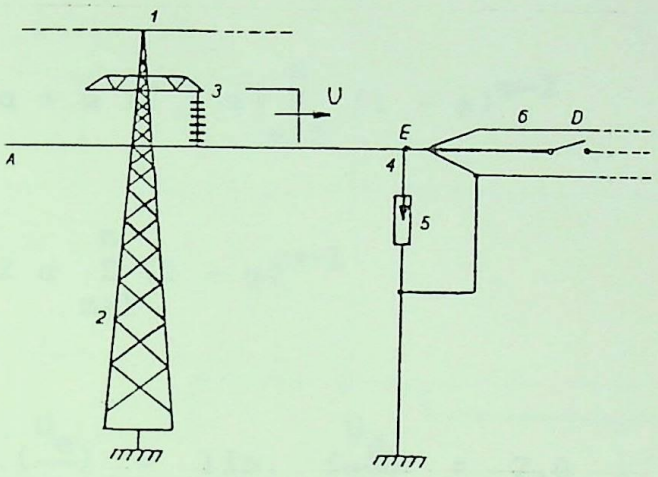
2.4. Sobretensões Atmosféricas

As sobretensões atmosféricas são geradas quando uma descarga atmosférica atinge o cabo fase ou o cabo pára-raios da linha de transmissão. Após a ocorrência as sobretensões atmosféricas se propagam para dentro dos barramentos isolados a SF_6. Devido à forma de propagação das sobretensões nos barramentos isolados a SF_6 (ver CAPÍTULO III) e pela natureza destas sobretensões, é pelo estudo detalhado das mesmas que se faz a coordenação de isolamento de subestações isoladas a SF_6 [5, 11, 12, 13, 14, 26, 27, 28, 38, 41, 43, 45, 54, 55, 56, 59].

CAPÍTULO III

3.1. Princípio de Propagação de Sobretensões Atmosféricas num Barramento Isolado a SF_6 [1,5,7,11,26,41]

Com a finalidade de explicar o desenvolvimento de uma sobretensão típica em um barramento isolado a SF_6 ligado a uma linha de transmissão aérea, considere-se o sistema mostrado na Figura 3.1, a seguir.



1 - Cabo pára-raios
2 - Torre
3 - Cadeia de Isoladores
4 - Ligação do Pára-raios à Fase
5 - Pára-raios
6 - Barramento isolado a SF_6

FIGURA 3.1 - Arranjo Mostrando Linha Aérea Ligada a um Barramento Isolado a SF_6

A tensão (U) proveniente da linha (A) chega, após um tempo de viagem T_1, até a entrada do barramento isolado a SF_6 (ponto E). Neste ponto o surto encontra uma impedância de surto consideravelmente menor (ver CAPÍTULO VIII) e é reduzido em amplitude. Uma tensão de menor valor (αU) é transmitida para dentro do barramento isolado a SF_6.

O exemplo que se pretende mostrar fica simplificado se a onda de sobretensão que chega ao barramento isolado a SF_6, pela linha for um degrau de tensão (de valor U). A impedância de surto da linha aérea (cerca de 300 ohms) é consideravelmente maior que a impedân-

cia de surto do barramento isolado a SF_6 (cerca de 60 ohms). Então ocorrerá uma reflexão de onda na entrada do barramento isolado a SF_6. Com base nestas impedâncias tem-se que o coeficiente de transmissão (α) é de 1/3 e o de reflexão (β) de -2/3.

A formação das tensões no barramento isolado a SF_6 é ilustrada nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4.

A tensão na entrada do barramento (U_e) e na chave aberta (U_d) aumenta com o número de reflexão nestes respectivos pontos (n), como descrito pelas equações mostradas a seguir:

$$\frac{U_e}{U} = \alpha + \alpha (2 - \alpha) \sum_{m=2}^{n} (1 - \alpha)^{m-2} \qquad (3.1)$$

$$\frac{U_d}{U} = 2 \alpha \sum_{m=1}^{n} (1 - \alpha)^{m-1} \qquad (3.2)$$

$$\lim_{n\to\infty} \left(\frac{U_e}{U}\right) = \lim_{n\to\infty} \left(\frac{U_d}{U}\right) = 2,0 \qquad (3.3)$$

As equações (3.1) e (3.2) são válidas apenas para o caso em que não ocorre disparo de pára-raios (o diagrama de Latice correspondente é mostrado na Figura 3.3).

Da equação (3.2) e também da Figura 3.4, pode ser visto que a tensão na chave aberta (2α) é duas vezes a tensão transmitida (αU).

Assim, o pior caso ocorre se a onda transmitida αU é suficiente para disparar o pára-raios. Neste caso a tensão na chave aberta será então duas vezes a tensão de disparo do pára-raios (isto é a tensão na chave aberta é duas vezes o nível de proteção do pára-raios).

Por outro lado, se o pára-raios dispara por causa do crescimento da tensão (no ponto E) devido à primeira onda de tensão refletida no ponto D, a máxima tensão no ponto D excederá o nível de proteção

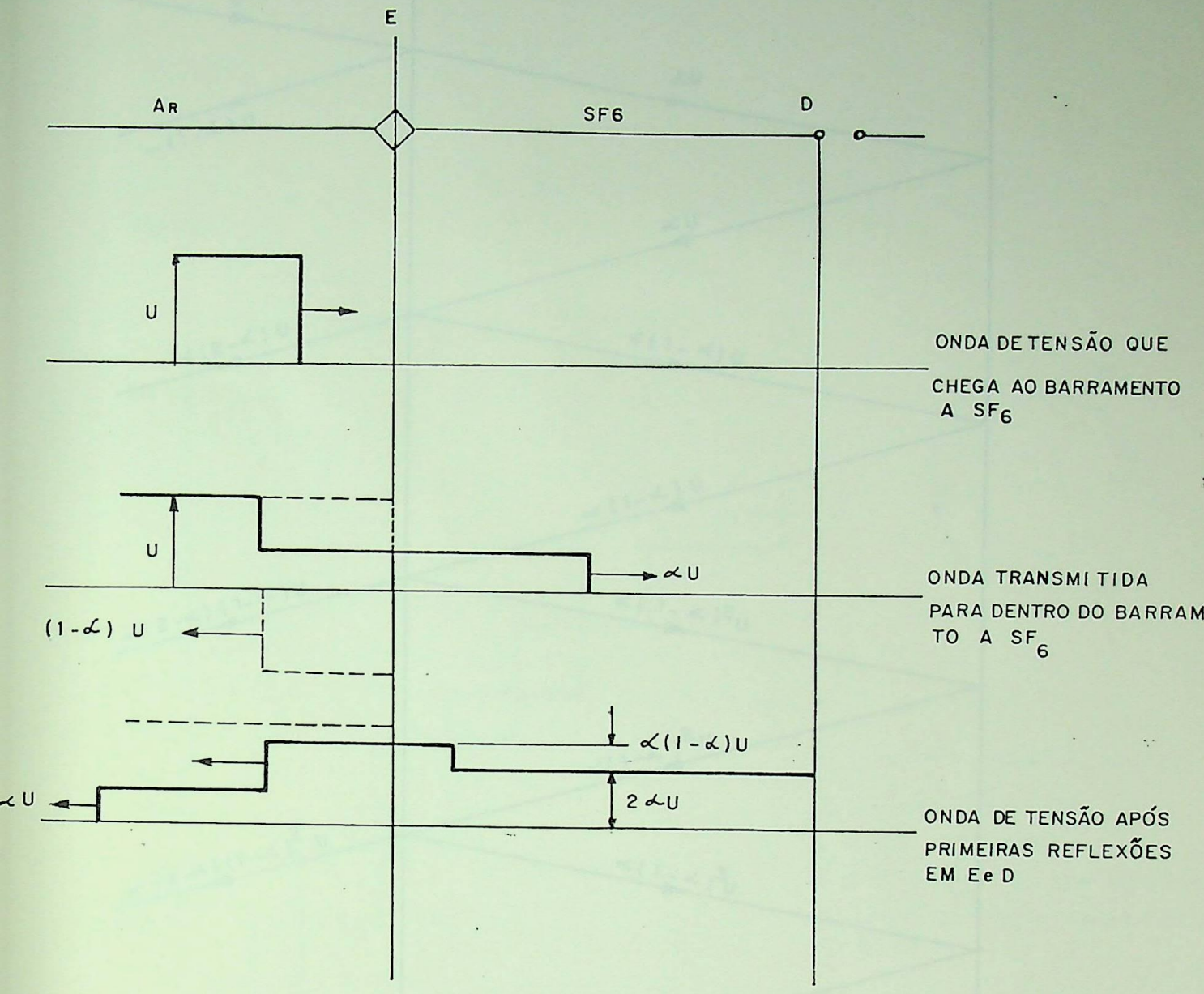


FIGURA 3.2.- DESENVOLVIMENTO DAS TENSÕES AO LONGO DO BARRAMENTO ISOLADO A SF_6

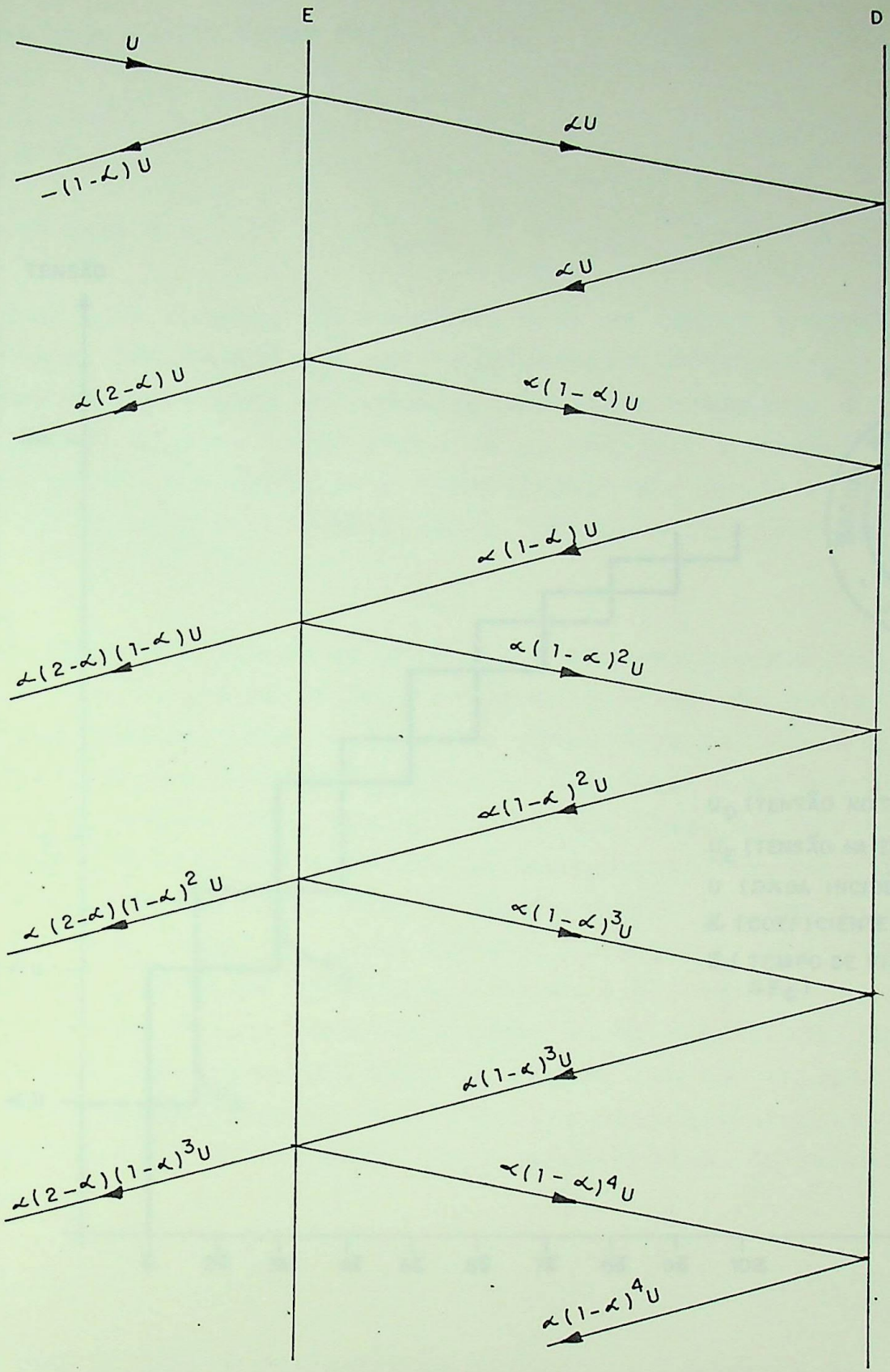
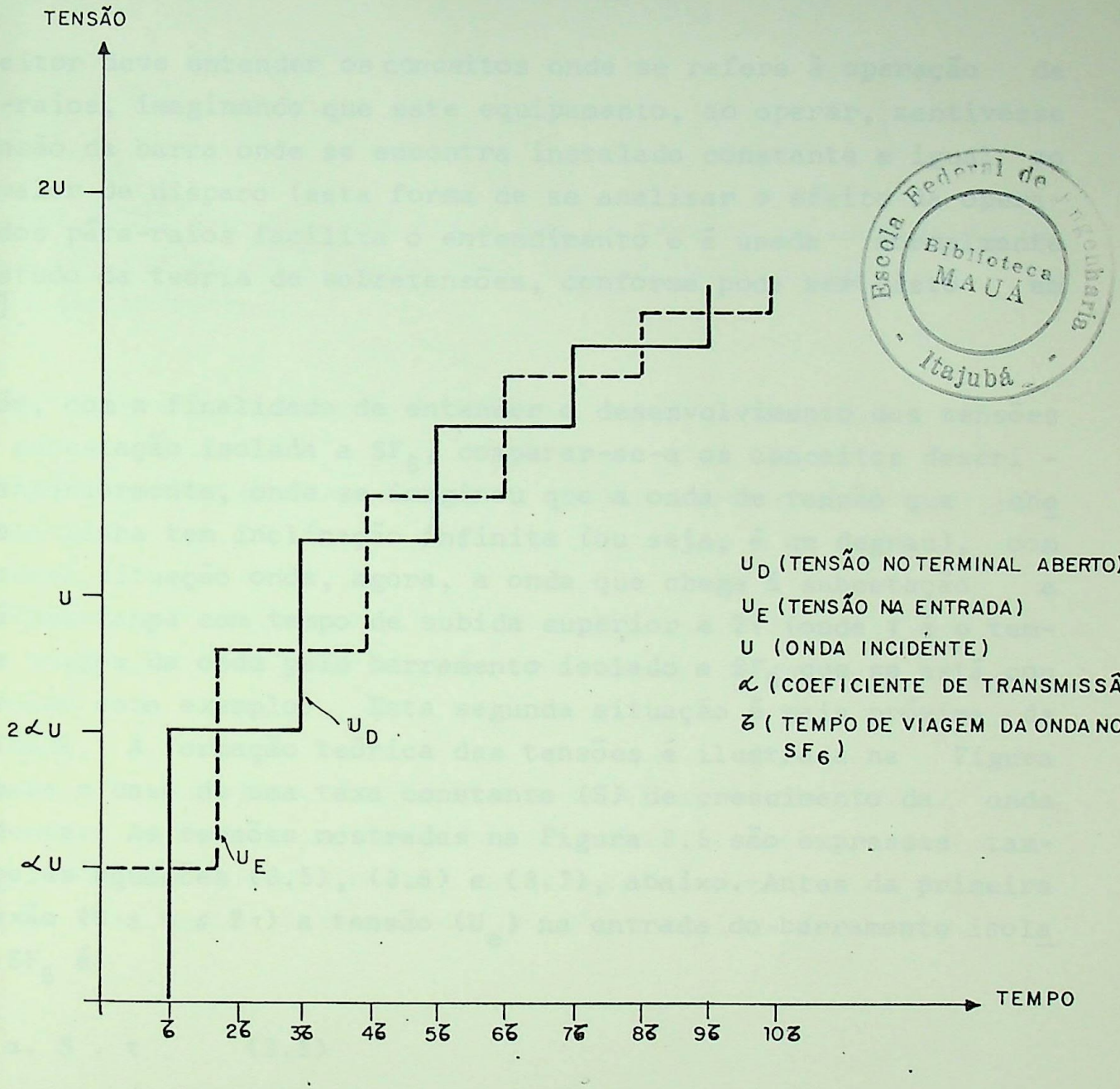


FIGURA 3.3. – DIAGRAMA DE LATICE MOSTRANDO COMO SE DESENVOLVEM AS TENSÕES AO LONGO DO BARRAMENTO ISOLADO A SF_6



Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

FIGURA 3.4.- TENSÕES NA ENTRADA (U_E) E NO FINAL (U_D) DO BARRAMENTO ISOLADO A SF_6

do pára-raios pelo fator K:

$$K = \frac{2\ (2 - \alpha)}{3-\alpha} \qquad (3.4)$$

No nosso caso K = 1.25

O leitor deve entender os conceitos onde se refere à operação de pára-raios, imaginando que este equipamento, ao operar, mantivesse a tensão da barra onde se encontra instalado constante e igual ao seu valor de disparo (esta forma de se analisar o efeito da operação dos pára-raios facilita o entendimento e é usada normalmente no estudo da teoria de sobretensões, conforme pode ser visto em [1,7].

Também, com a finalidade de entender o desenvolvimento das tensões numa subestação isolada a SF_6, comparar-se-a os conceitos descritos anteriormente, onde se imaginou que a onda de tensão que chega pela linha tem inclinação infinita (ou seja, é um degrau), com uma outra situação onde, agora, a onda que chega à subestação a SF_6 é uma rampa com tempo de subida superior a 2τ (onde τ é o tempo de viagem da onda pelo barramento isolado a SF_6 que se está considerando como exemplo). Esta segunda situação é mais próxima da realidade. A formação teórica das tensões é ilustrada na Figura 3.5 para o caso de uma taxa constante (S) de crescimento da onda incidente. As tensões mostradas na Figura 3.5 são expressas tambem pelas equações (3.5), (3.6) e (3.7), abaixo. Antes da primeira reflexão ($0 \leq t \leq 2\tau$) a tensão (U_e) na entrada do barramento isolado a SF_6 é:

$$U_e = \alpha . S . t \qquad (3.5)$$

A um tempo t, após n reflexões na entrada, a tensão U_e é:

$$2\ (n - 1) \leq \frac{t}{\tau} \leq 2\ n$$

$$U_e = \alpha S \left[t + \sum_{m=2}^{n} (1 - \alpha)^{m-2}\ (2 - \alpha)\ [t - 2\ (m - 1)\ \tau\ ] \right] \qquad (3.6)$$

A um tempo $\underline{t}$, após $\underline{n}$ reflexões no lado da chave aberta, a tensão U_d é:

$$(2n - 1) \leq \frac{t}{\tau} \leq (2n + 1)$$

$$U_d = 2 \alpha S \sum_{m=1}^{n} (1 - \alpha)^{m-1} [t - (2m - 1) \tau] \qquad (3.7)$$

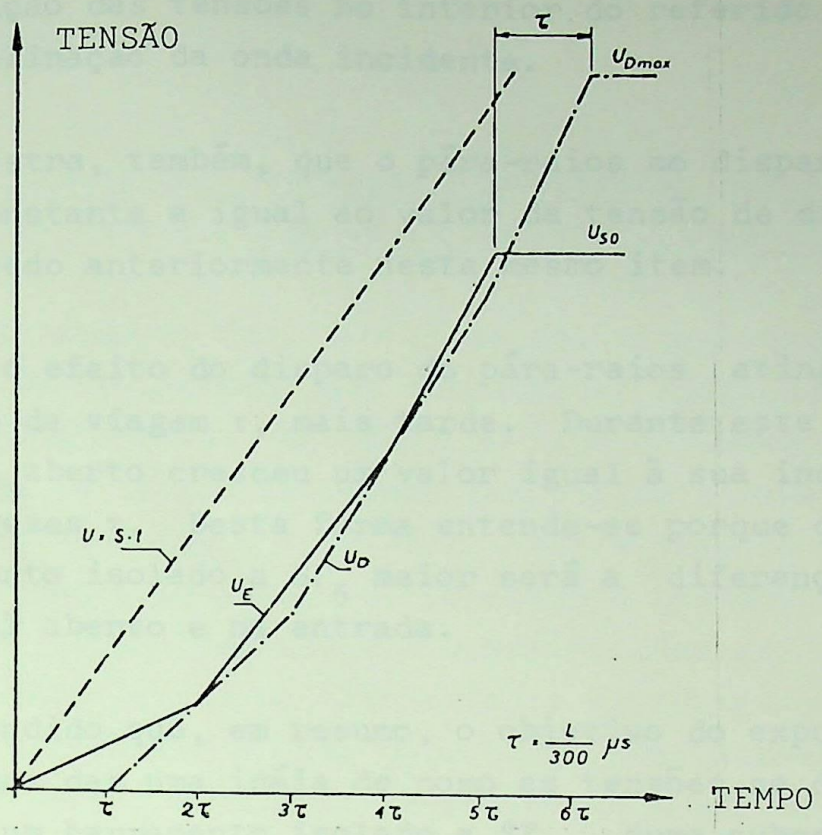
Pode ser visto das equações acima que as tensões no barramento isolado a SF_6 que se está usando como exemplo, são dependentes dos seguintes parâmetros:

- inclinação (S) da onda de tensão que chega pela linha;

- relação das impedâncias de surto, ou seja, o coeficiente de transmissão α;

- comprimento do barramento isolado a SF_6, ou do tempo correspondente τ de viagem da onda através deste mesmo barramento.

A Figura 3.5, a seguir, mostra que o crescimento da tensão é constante entre cada duas reflexões no interior do barramento isolado a SF_6. Vê-se, também, que este crescimento é aumentado após cada reflexão e atingirá um máximo de 2S após infinitas reflexões.



U_e - Tensão na entrada do SF_6

U_{so} - Tensão de disparo do pára-raios

U_d - Tensão no terminal aberto

U - Onda de tensão incidente

L - Comprimento do barramento isolado a SF_6 em metros

S - Inclinação da onda incidente

FIGURA 3.5 - Tensões na Entrada (U_e) e no Final (U_d) do Barramento Isolado a SF_6 - Onda Incidente (U) sob a forma de Rampa

Já após um certo número de reflexões dentro do barramento isolado a SF_6 a inclinação das tensões no interior do referido barramento é maior que inclinação da onda incidente.

A Figura 3.5 mostra, também, que o pára-raios ao disparar, mantem a sua tensão constante e igual ao valor da tensão de disparo, conforme já explicado anteriormente neste mesmo item.

Observa-se que o efeito do disparo do pára-raios atinge a chave aberta um tempo de viagem τ, mais tarde. Durante este tempo a tensão no terminal aberto cresceu um valor igual à sua inclinação naquele período vezes τ. Desta forma entende-se porque quanto mais longo o barramento isolado a SF_6 maior será a diferença das tensões no terminal aberto e na entrada.

Deve ficar entendido que, em resumo, o objetivo do exposto neste capítulo é apenas dar uma idéia de como as tensões se desenvolvem no interior de um barramento isolado a SF_6. Numa subestação real este cálculo se torna mais complicado e somente poderá ser feito com o auxílio de um programa de transitórios conforme mostrado na Parte 2 deste trabalho.

CAPÍTULO IV

4.1 Características das Descargas Atmosféricas que Atingem as Linhas de Transmissão Ligadas às Subestações Isoladas a SF_6

Conforme já analisado no CAPÍTULO II as solicitações que mais exigem, em termos de isolamento, das subestações isoladas a SF_6 são as de origem atmosféricas. No CAPÍTULO IX é analisado os efeitos da forma da onda de tensão incidente (amplitude e taxa de crescimento e/ou tempo de atingir a crista). Neste item, a partir de levantamentos efetuados no exterior, geralmente Estados Unidos [58] e Europa [18,19,20], serão definidas e quantificadas as sobretensões de origem atmosféricas que poderão atingir as subestações através das linhas de transmissão a elas conectadas. Infelizmente não existem disponíveis para o Brasil um levantamento deste tipo de dados. Entretanto, pode-se dizer que isto não é um grande problema, pois se observa que atualmente os estudos feitos por Popolansky [18] e Berger [19], na Europa, são os utilizados em diferentes países como os Estados Unidos [27], Canadá, Japão, além da própria Europa, e os considerados como mais atualizados do gênero. São estes dois estudos que se usará como fonte de informações para obtenção dos parâmetros de descargas atmosféricas.

Preliminarmente, para efeito de ilustração repete-se o encontrado em [1,8] onde pode-se ler que as descargas atmosféricas tem, predominantemente, uma magnitude de pico entre 10 e 200 kA. O tempo frente da onda fica numa faixa entre 1 - 10 μseg, tipicamente, com uma média em torno de 2,0 μseg, decaindo para metade do valor num tempo da ordem de 50 - 200 μseg.

Normalmente, a forma da onda de tensão que se utiliza nos estudos é a apresentada na Figura 4.1, a seguir [5,11,13,14,26,27,28].

Na Tabela 4.1, a seguir, apresenta-se as probabilidades de ocorrências de determinadas amplitudes de correntes (as mais elevadas) de

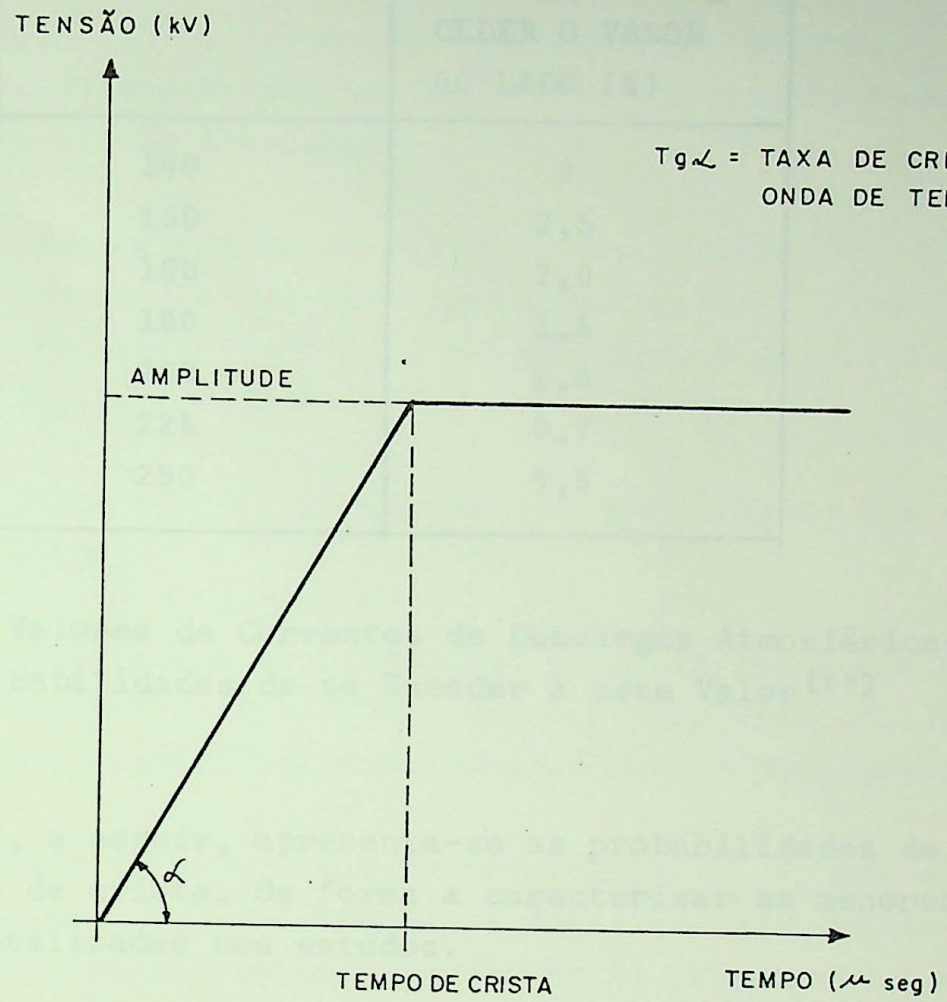


FIGURA 4.1 - FORMA DA ONDA DE TENSÃO INCIDENTE UTILIZADA NOS ESTUDOS DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO [11, 12, 13, 14, 26, 27, 28, 38]

descargas atmosféricas, de forma a caracterizar aquelas mais elevadas que poderão ser utilizadas nos estudos.

AMPLITUDE DE CORRENTE (kA)	PROBABILIDADE DA DESCARGA EXCEDER O VALOR AO LADO (%)
140	3
150	2,5
160	2,0
180	1,5
200	1,0
225	0,7
250	0,5

TABELA 4.1 - Valores de Correntes de Descargas Atmosféricas e Probabilidades de se Exceder a este Valor [27]

Na Tabela 4.2, a seguir, apresenta-se as probabilidades de ocorrência de tempos de crista, de forma a caracterizar as menores que poderão ser utilizadas nos estudos.

TEMPO DE CRISTA (μseg)	PROBABILIDADE DA DESCARGA EXCEDER O VALOR AO LADO (%)
0 - 2	7
2 - 4	23
4 - 6	20
6 - 10	50

FIGURA 4.2 - Valores de Tempo de Crista e Probabilidades de Exceder a este Valor [27]

Deve ficar bem claro que ao se citar as referências [18,19,27] para definição dos parâmetros das descargas atmosféricas não se pretendeu situá-las como únicas. Outras poderão ser utilizadas por quem faz estudos desta natureza, mas não se espera ter resultados significantemente diferentes.

Um outro exemplo são as curvas apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3, a seguir, retiradas das referências [2,62] e que também poderiam ser utilizadas como fonte de dados.

No estudo que é apresentado na Parte 2, deste trabalho, será considerado que as correntes das descargas atmosféricas serão no máximo iguais a 200 kA. Este valor é um pouco superior aos utilizados em algumas referências [5,28,45].

Quanto ao tempo de crista, será admitido que o mínimo que se poderá ter é 0,5 μseg.

Este tempo de crista é o admitido como possível de acontecer por algumas referências [27,38,41,45]. Valores mais elevados deste parâmetro deverão, também, ser considerados nos estudos práticos.

A respeito destas escolhas, faz-se referência ao exposto no CAPÍTULO IX, onde se mostra a influência da forma da onda incidente no valor das sobretensões que se desenvolvem no interior das subestações. Pode-se ver que quanto maior for a amplitude da onda incidente, e menor for o tempo de crista maiores serão as sobretensões que se desenvolvem.

Estes parâmetros (amplitude, tempo de crista ou taxa de crescimento) devem ser escolhidos sempre do lado da segurança sem, naturalmente, se incorrer num exagero. A adoção destes valores conservativos é necessária pelo fato de o isolamento a SF_6 não ser autoregenerativo, isto é, quase sempre que acontecer uma descarga no seu interior haverá algum dano [23].

Neste ponto, vale a pena lembrar que os módulos de testes padrões para impulsos representativos de descargas atmosféricas foram defi

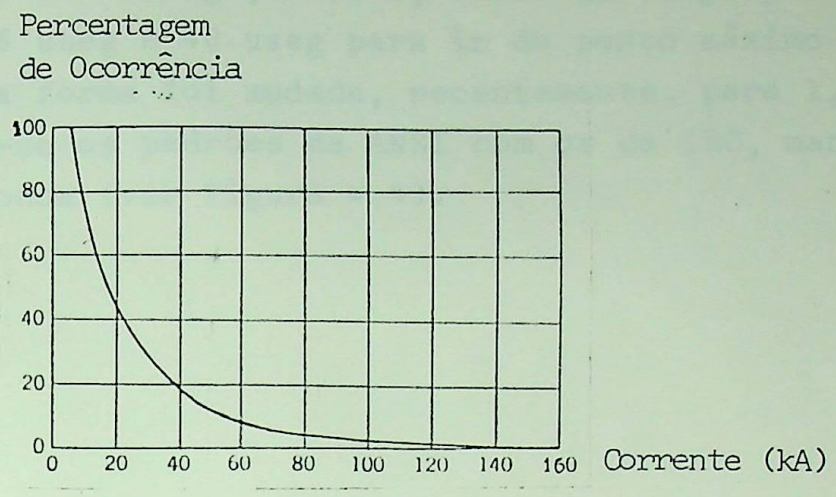


FIGURA 4.2 - Frequência de Ocorrência de Correntes de Descargas Atmosféricas de 5 kA ou maior [2]

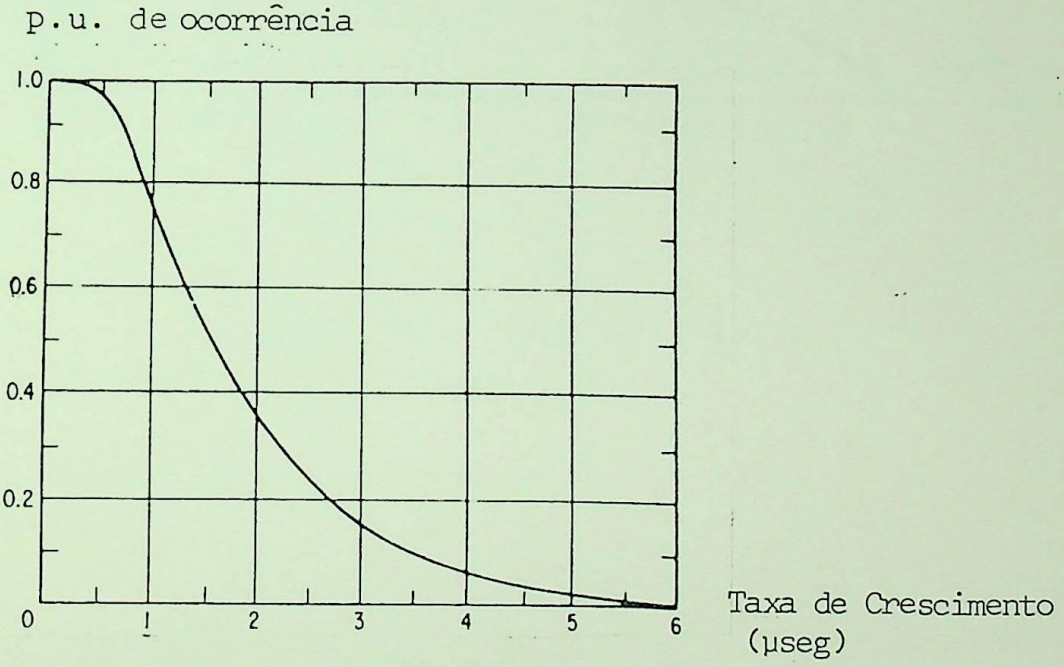


FIGURA 4.3 - Frequência de Ocorrência de Taxas de Crescimento em Descargas Atmosféricas [62]

nidos, inicialmente em 1930, como sendo uma onda dupla exponencial com a forma de 1,5 x 40 μseg., isto é, tendo um tempo para atingir o pico igual a 1,5 μseg e 40 μseg para ir do ponto máximo até o valor médio. Esta forma foi mudada, recentemente, para 1,2 x 50 μseg para ajustar-se os padrões da ANSI com os da IEC, mantendo-se a mesma forma da onda (ver Figura 4.4).

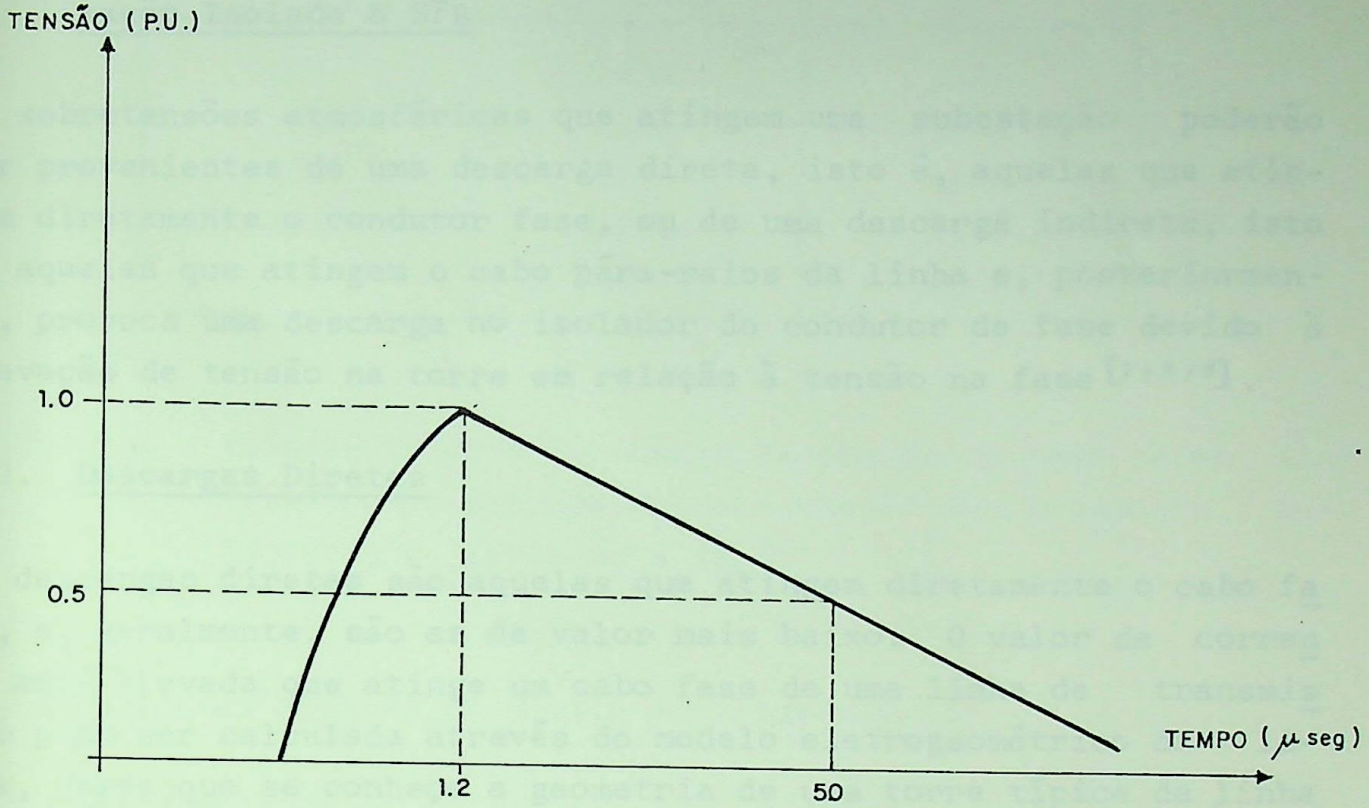


FIGURA 4.4. - FORMA DA ONDA DE TENSÃO UTILIZADA NOS TESTES DE SIMULAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (PADRONIZAÇÃO ANSI E IEC) PARA TODOS OS TIPOS DE EQUIPAMENTOS. [9]

CAPÍTULO V

5.1. Origem das Sobretensões Atmosféricas que Atingem uma Subestação Isolada a SF_6

As sobretensões atmosféricas que atingem uma subestação poderão ser provenientes de uma descarga direta, isto é, aquelas que atingem diretamente o condutor fase, ou de uma descarga indireta, isto é, aquelas que atingem o cabo pára-raios da linha e, posteriormente, provoca uma descarga no isolador do condutor de fase devido à elevação de tensão na torre em relação à tensão na fase [1,8,9].

5.2. Descargas Diretas

As descargas diretas são aquelas que atingem diretamente o cabo fase, e, geralmente, são as de valor mais baixo. O valor da corrente mais elevada que atinge um cabo fase de uma linha de transmissão pode ser calculada através do modelo eletrogeométrico da linha, desde que se conheça a geometria de uma torre típica da linha que se liga à subestação. Por outro lado, a literatura disponível sobre o assunto [5,11,41] apresenta uma tabela recomendando valores, previamente definidos, de ondas de tensão que devem ser utilizadas nos estudos de coordenação de isolamento para diferentes níveis de tensão das subestações isoladas a SF_6.

5.2.1. Valores Recomendados pela Literatura

A comunidade envolvida com os estudos de coordenaçao de isolamento de subestações a SF_6, de origem européia e, principalmente, congregados em torno da CIGRÉ [5,11,41] apresenta uma tabela (reproduzida a seguir na Tabela 5.1) com os valores de ondas incidentes que se deve utilizar nos estudos. A apresentação destes valores não é acompanhada com a descrição da maneira como foram obtidos. A outra forma de se obter as ondas incidentes que se apresenta a seguir, obtidas pelo modelo eletrogeométrico, parece ser mais adequada.

TENSÃO MAIS ALTA DO SISTEMA (kV)	ONDA INCIDENTE	
	TAXA DE CRESCIMENTO (kV/µseg)	AMPLITUDE (kV)
800	1200	3000
550	1200	2500
420	1200	1800
362	1200	1500
245	1000	1200

TABELA 5.1 - Valores de Onda Incidente Recomendados para serem Utilizados nos Estudos de Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6 [5,11,41]

5.2.2. Cálculo Através do Modelo Eletrogeométrico

Um método simplificado de se calcular as máximas correntes de descargas atmosféricas que podem atingir o condutor fase leva em conta o modelo eletrogeométrico da linha.

Inúmeros pesquisadores estudaram a falha de blindagem das linhas de transmissão [33,35,36,37].

O método que vamos descrever foi apresentado por Gordon W. Brown [35] e por E. R. Whitehead & Gordon W. Brown [36].

Este método permite o cálculo das máximas correntes de descargas atmosféricas que atingem o cabo fase com bastante precisão e já foi, inclusive, comprovado em cerca de 120.000 km x ano de linhas de transmissão, segundo pesquisa publicada pelo CIGRÉ, em 1974.

A falha de blindagem de linhas de transmissão é função da máxima distância de incidência que é governada pela configuração geométrica da linha de transmissão (veja Figuras 5.1 e 5.2).

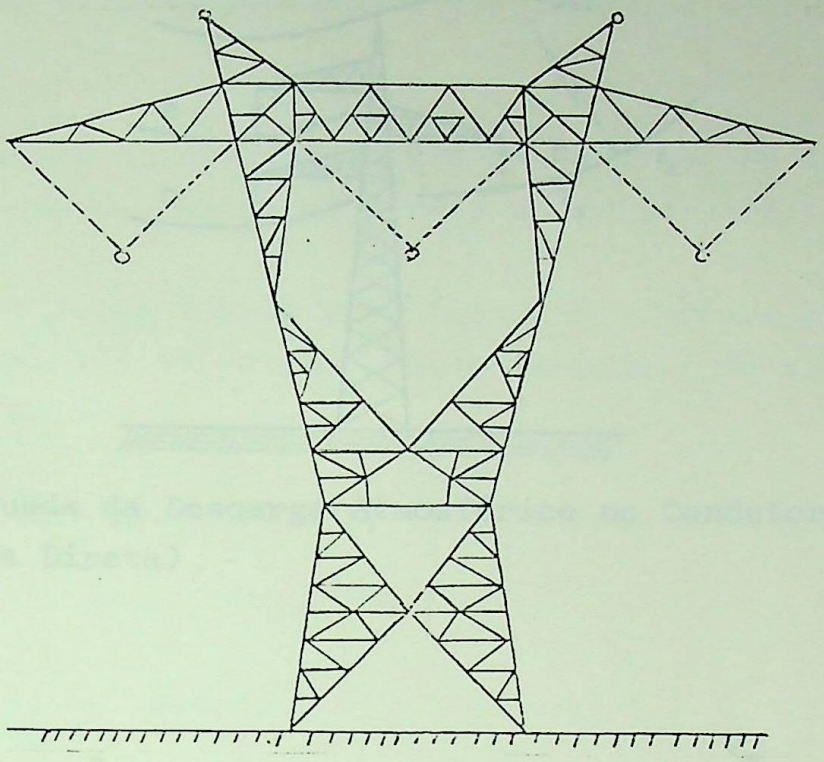


FIGURA 5.1 - Torre Típica de uma Linha de Transmissão de 500 kV, Ligada ao Barramento Isolado a SF_6, com a qual se Mostra o Cálculo da Máxima Corrente de Incidência pelo Modelo Eletrogeométrico

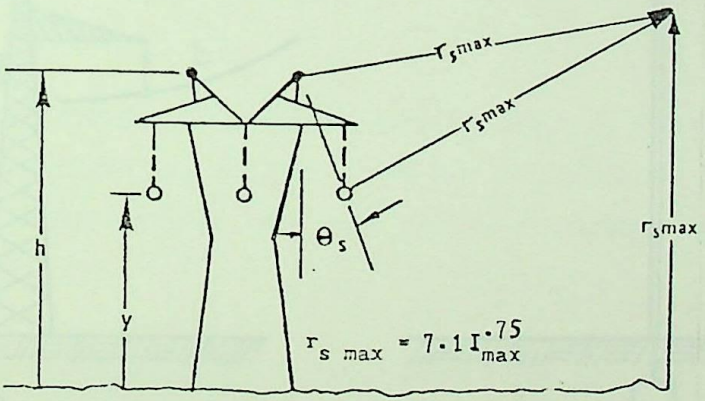


FIGURA 5.2 - Geometria da Torre, Mostrando-se os Parâmetros para Cálculo da Falha de Blindagem [35]

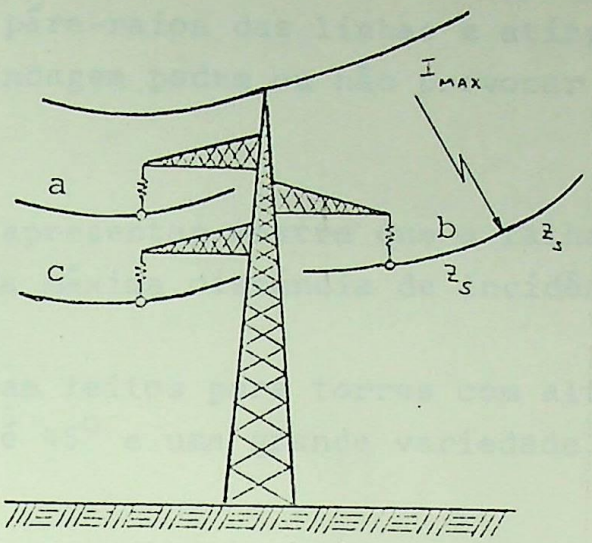


FIGURA 5.3 - Queda da Descarga Atmosférica no Condutor Fase (Descarga Direta)

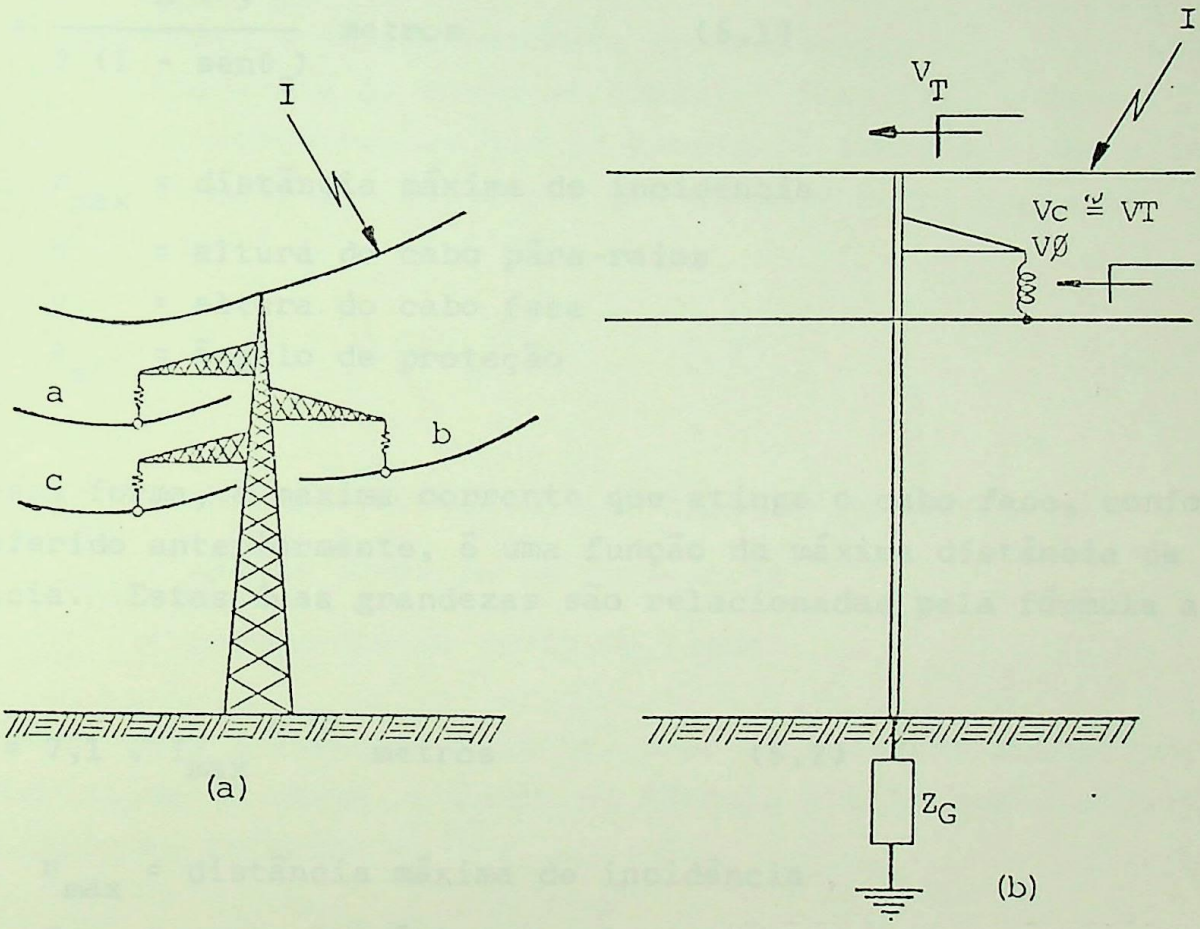


FIGURA 5.4 - Queda da Descarga Atmosférica no Cabo Guarda (Descarga Indireta)

A falha de blindagem diz respeito às descargas atmosféricas que passam pelos cabos pára-raios das linhas e atingem os cabos fase. Estas falhas de blindagem podem ou não provocar o desligamento das linhas.

O método que vamos apresentar mostra que a falha de blindagem é uma função apenas da máxima distância de incidência.

Vários cálculos foram feitos para torres com altura até 50m, ângulos de cobertura até 45° e uma grande variedade de alturas dos condutores até o solo.

A máxima distância de incidência (r_{max}) pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$r_{max} = \frac{h + y}{2\,(1 - \text{sen}\theta_s)} \text{ metros} \qquad (5.1)$$

Onde: r_{max} = distância máxima de incidência
h = altura do cabo pára-raios
y = altura do cabo fase
θ_s = ângulo de proteção

Da mesma forma, a máxima corrente que atinge o cabo fase, conforme já referido anteriormente, é uma função da máxima distância de incidência. Estas duas grandezas são relacionadas pela fórmula abaixo:

$$r_{max} = 7{,}1 \cdot I_{max}^{0{,}75} \text{ metros} \qquad (5.2)$$

Onde: r_{max} = distância máxima de incidência
I_{max} = corrente máxima que incide no condutor fase

Conhecendo-se a geometria da torre (parâmetros h, y, θ_s) calcula-se, através da fórmula (5.1), a máxima distância de incidência

(r_{max}). Posteriormente, conhecida a máxima distância de incidência calcula-se, através da fórmula (5.2), a máxima corrente que incide sobre o condutor fase (I_{max}).

Para exemplificar o que foi exposto acima seja a aplicação numérica, a seguir, onde é assumido:

$h = 40$ metros

$y = 25$ metros

$\theta_s = 21^o$

De (5.1): $r_{max} = 50,65$ metros

De (5.2): $I_{max} = 13,64$ kA

Uma vez calculada a máxima corrente de incidência (I_{max}), e conhecendo-se a impedância de surto do condutor fase (Z_s) pode-se calcular a máxima sobretensão, que se propagará sobre a linha e incidirá na subestação, provocada por uma queda direta, conforme ilustração da Figura 5.3.

$$V_{max} = I_{max} \cdot \frac{Z_s}{2} \text{ kV} \qquad (5.3)$$

Onde:

V_{max} = máxima sobretensão que incidirá na subestação

I_{max} = máxima corrente de incidência

Z_s = impedância de surto da linha

Conhecendo-se a geometria da linha, pode-se calcular a impedância característica da mesma, através da fórmula abaixo que é encontrada em inúmeras referências [1]:

$$Z_s = 60 \cdot \ell n \frac{2.H}{R} \text{ ohms} \qquad (5.4)$$

Onde:

H = altura média do condutor fase na linha

R = raio do condutor fase equivalente

A altura média do condutor fase na linha pode ser calculada pela fórmula abaixo [62]:

$$H = y - \frac{2}{3}(y - y') \qquad (5.5)$$

Onde:

y = altura do condutor fase na torre
y' = altura do condutor fase no meio do vão
H = altura média do condutor fase na linha

Novamente, para exemplificar o exposto acima, seja a aplicação numérica, a seguir, onde é assumido:

I_{max} = 13,64 kA (calculado anteriormente)
y = 25 metros
y' = 22 metros
R = 21,6 cm

De (5.5): H = 23 metros

De (5.4): Z_s = 320 ohms

De (5.3): V_{max} = 2182 kV

O valor da sobretensão máxima incidente devido a uma descarga direta terá um limite superior que é o valor do nível básico de isolamento da linha (BIL), isto é, não se terá ondas incidentes na subestação maiores que o BIL da linha.

Pode-se calcular, para efeito de comparação, a máxima corrente de descarga atmosférica (I_{BIL}) que provoca disparo dos isoladores:

$$I_{BIL} = \frac{2.BIL}{Z_s} \text{ kA} \qquad (5.6)$$

$$BIL = CFO\ (1 + 3\tau) \qquad (5.7)$$

Onde:

BIL = nível básico de isolamento da linha

I_{BIL} = corrente máxima de descarga que provoca disparo dos isoladores

CFO = tensão crítica de disparo

Z_s = impedância de surto da linha

τ = desvio padrão da suportabilidade para impulsos atmosféricos = 3%

Supondo que para a linha anteriormente mencionada, de tensão nominal 500 kV, tem-se:

CFO = 2100 kV

Z_s = 320 ohms

τ = 0,03

De (5.6) e (5.7): I_{BIL} = 14,30 kA

No exemplo que se apresentou:

$$I_{BIL} > I_{max}$$

1.5.2. Descargas Indiretas [1,2,3,8,9]

Uma vez calculada, através do modelo eletrogeométrico da linha, o valor da maior corrente que pode incidir no cabo fase, as descargas atmosféricas de maior valor que vierem atingir a linha incidirão sempre no cabo guarda, no meio de um vão ou no topo da própria torre.

Os estudos devem utilizar o maior valor de corrente possível de acontecer. Utilizando-se das estatísticas apresentadas na Tabela 4.1, do CAPÍTULO IV, será considerado na Parte 2 um valor de 200 kA. As referências [5,28] utilizaram 150 kA, para linhas de tensão nominal 500 kV. Como o isolamento das subestações a SF_6 não é au

to-regenerativo[23], será considerado nos estudos da Parte 2 um valor mais conservativo que pode, perfeitamente, ser reavaliado.

Como ilustração é mostrado, a seguir, como se processa a incidência das ondas de sobretensão, na subestação isolada a SF_6, partindo-se de descargas indiretas.

Ao acontecer uma descarga indireta, o potencial no topo da torre (V_t) é computado. De um modo geral a tensão no braço da torre V_c seria um pouco menor que V_t, mas considera-se $V_c \cong V_t$.

Devido ao campo elétrico do acoplamento entre o cabo guarda e o cabo fase haverá uma tensão (V_ϕ) induzida neste último (ver Figura 5.4).

A tensão entre a cadeia de isoladores será dada por:

$$V_i = V_c - V_\phi \cong V_t - V_\phi = V_t - c\,V_t = V_t\,(1 - c)$$

Onde c é o fator de acoplamento entre o cabo pára-raios e o condutor da fase. Um valor típico deste fator é 0,25.

Se a tensão V_i que se tem nos terminais dos isoladores for maior que a sua tensão crítica de disparo (CFO), haverá o disparo através dos mesmos.

Entre os fatores que influenciam V_i, podemos citar:

- impedância de surto da torre
- resistência de aterramento
- fator de acoplamento em cabo guarda e fase
- taxa de crescimento da corrente da descarga atmosférica
- amplitude da corrente da descarga atmosférica

Para fins ilustrativos mostra-se na Figura 5.5, a seguir, a variação da tensão nos terminais da cadeia de isoladores como função da

resistência de pé de torre, para uma corrente de descarga de 100 kA de pico e com tempo de crista variável, conforme estudo apresentado na referência [27].

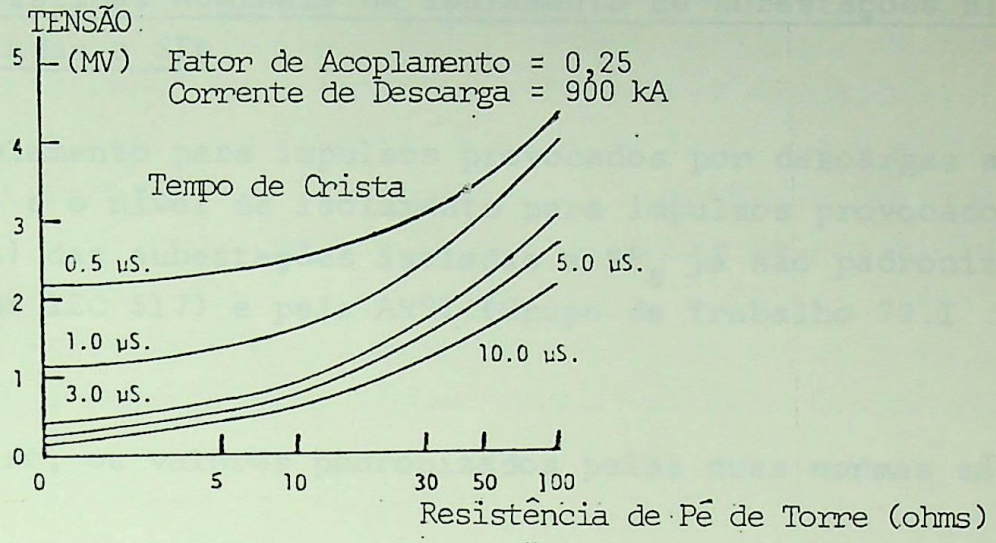


FIGURA 5.5 - Tensão Através da Cadeia de Isoladores em Função da Resistência de Pé de Torre [27]

CAPÍTULO VI

6.1. Características Nominais de Isolamento de Subestações Blindadas Isoladas a SF_6

O nível de isolamento para impulsos provocados por descargas atmosféricas (LIWL) e o nível de isolamento para impulsos provocados por manobras (SIWL) das subestações isoladas a SF_6 já são padronizados pela IEC (norma IEC 517) e pela ANSI (Grupo de Trabalho 70.1 do IEEE).

Na Tabela abaixo, os valores padronizados pelas duas normas são reproduzidos.

Na Parte 2, deste trabalho de dissertação, foram realizados estudos de Coordenação de Isolamento de uma subestação isolada a SF_6, e os valores a serem especificados deverão ser extraídos da Tabela abaixo [26,41,60,61].

TENSÃO NOMINAL DO SISTEMA kV(rms)	NÍVEL DE ISOLAMENTO À FREQUÊNCIA NOMINAL (kV)		NÍVEL DE ISOLAMENTO A IMPULSOS ATMOSFÉRICOS (kV)		NÍVEL DE ISOLAMENTO A IMPULSOS DE MANOBRAS (kV)	
	IEC	ANSI	IEC	ANSI	IEC	ANSI
245	395	425	950	900	-	-
362	450	500	1175	1050	950	825
420	520	-	1300	-	1050	-
525/550	620	615	1425	1550	1175	1240
765/800	830	860	1800	1800	1425	1425

TABELA 6.1 - Níveis de Isolamento de Subestações a SF_6

6.2. Escolha dos Níveis de Isolamento (Margens de Proteção)

Para se determinar quais os níveis de isolamento que deverão ser especificados, deve-se efetuar os cálculos de todas as sobretensões que poderão aparecer no interior do barramento isolado a SF_6, de forma a se determinar as máximas sobretensões possíveis de acontecer. Para isto deverão ser simuladas diferentes situações (veja Parte 2 deste trabalho) adotando-se a onda de tensão que atinge a subestação, seguindo os critérios definidos nos CAPÍTULOS IV e V. Da mesma forma, diferentes configurações deverão ser admitidas para a subestação (linha aberta, saída de linha, saída de linha e transformador, saída de transformadores, etc.) de forma a se pesquisar as máximas sobretensões que ocorrerão no interior da subestação.

Segundo a literatura sobre o assunto [5,11], os seguintes critérios, atualmente, devem ser usados para se especificar os níveis de isolamento, após efetuados os estudos que fornecerão as máximas sobretensões.

- Para surtos de manobra

  Nível de Isolamento = Máxima Sobretensão Encontrada x 1,15

- Para surtos atmosféricos

  Nível de Isolamento = Máxima Sobretensão Encontrada x 1,20

Conforme já foi dito anteriormente, a taxa de crescimento dos surtos de manobra é bastante lenta, de forma que se terá a mesma tensão ao longo de toda a subestação. Esta tensão será igual ao valor do nível de proteção dos pára-raios para surtos de manobras. Quanto aos valores máximos devidos aos surtos atmosféricos os mesmos deverão ser obtidos através das simulações digitais conforme será visto oportunamente. Estes últimos são funções da configuração de subestação, forma da onda de tensão incidente, característica e localização dos pára-raios, etc.

As margens de segurança colocadas sobre as máximas sobretensões encontradas são propostas com a finalidade de cobrir possíveis imprecisões de cálculo (sobretensões atmosféricas impostas à subestação, não consideração da tensão à frequência industrial, etc.) e, também, devido ao envelhecimento de isolamentos.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca MAUÁ
Itajubá

CAPÍTULO VII

7.1. Métodos de Limitação de Sobretensões em uma Subestação Isolada a SF_6 [1,5,7,11,13,14,26,27,41,43,45,47]

Os dispositivos de proteção para subestações isoladas a SF_6 são pára-raios convencionais (aéreos ou encapsulados), pára-raios de óxido de zinco (aéreos ou encapsulados) e, finalmente, os centelhadores.

Os níveis de isolamento (para impulsos de manobra, ou impulsos atmosféricos) que já são padronizados (pelas normas ANSI e IEC) não deverão ser atingidos pelas máximas sobretensões que poderão acontecer no interior das subestações isoladas a SF_6. Mais do que não atingir aos níveis de isolamento especificados, deverá existir uma faixa de segurança entre as máximas sobretensões encontradas no interior da subestação e os níveis de isolamento da mesma, conforme mostrado no CAPÍTULO VI. Este fator de segurança cobrirá situações tais como: envelhecimento de isolamentos, possíveis imprecisões nas condições de sobretensões impostas à subestação, efeito da não consideração da tensão à frequência industrial ao se calcular as sobretensões, etc.

7.2. Limitação das Sobretensões por Pára-raios Convencionais

Os pára-raios convencionais "Cortam" as sobretensões que penetram na subestação, de acordo com a sua tensão de disparo (para surtos atmosféricos, surtos de manobra, frente de onda) e as controlam de acordo com a sua curva de descarga (tensão x corrente). Na Parte 2 deste trabalho de dissertação é feito um estudo completo de procura das sobretensões de origem atmosférica onde pode ser vista a participação dos pára-raios no controle das sobretensões.

Neste item, apenas com efeito ilustrativo, como é feito em inúmeras referências que tratam do assunto, mostrar-se-á o efeito da atuação dos pára-raios num sistema conforme mostrado abaixo. O

sistema usado tem tensão nominal 500 kV e os parâmetros utilizados obedecem ao mostrado no CAPÍTULO VIII.

7.3. Limitação das Sobretensões por Pára-raios de Óxido de Zinco

Da mesma forma que os pára-raios convencionais, os pára-raios de óxido de zinco "cortam" as sobretensões que penetram nas subestações. Os pára-raios de óxido de zinco tem uma vantagem sobre os pára-raios convencionais. Esta vantagem advém do fato de que os primeiros (óxido de zinco) estão conduzindo corrente para qualquer valor de tensão no sistema, pois operam como estivessem sempre disparados. Este fato faz com que, de uma maneira geral, as tensões que se desenvolvem no interior de uma subestação isolada a SF_6 sejam sempre menores quando protegidas por pára-raios de óxido de zinco. A escolha entre os dois tipos de pára-raios (convencional ou óxido de zinco) deverá ser econômica, levando-se em conta que, até hoje, os pára-raios do tipo convencional ainda são mais baratos do que os de óxido de zinco.

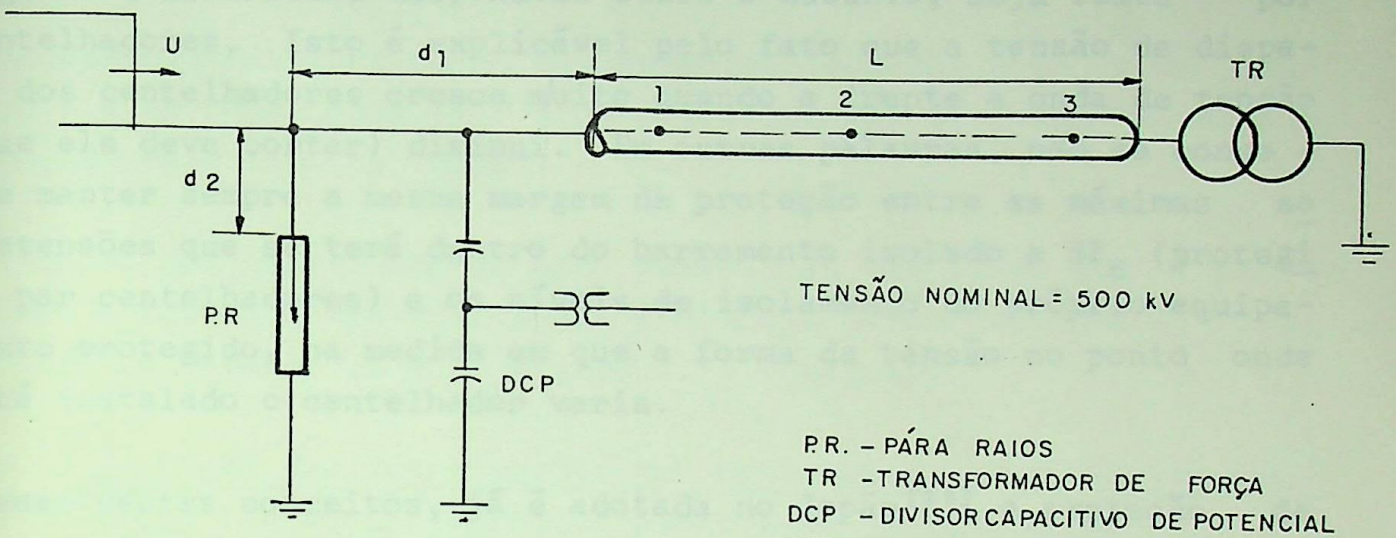
Neste item, foram efetuadas simulações para o pequeno sistema mostrado na Figura 7.1, considerando os pára-raios como sendo de óxido de zinco ou, então, convencionais (suas características são mostradas no CAPÍTULO VIII). Os ZnO estudados são do tipo sem "gap".

O resultado de ambas simulações está mostrado na Tabela 7.1 e nas Figuras 7.3 e 7.4, a seguir.

7.4. Limitação das Sobretensões por Centelhadores

Não é prática comum, no Brasil, utilizar-se de centelhadores para proteção de subestações, mesmo convencionais, em sistema E. H. V.

O centelhador é, de certa forma, o estágio inicial (precursor) dos pára-raios e se constitui de um "gap" que possui tensões disparo, isto é, tensões acima das quais passará haver uma condução de corrente através do mesmo. Assim como nos pára-raios, os centelhadores possuem tensão de disparo para surtos de manobra e surtos atmosféricos.



P.R. – PÁRA RAIOS
TR – TRANSFORMADOR DE FORÇA
DCP – DIVISOR CAPACITIVO DE POTENCIAL
L – COMPRIMENTO DE SF_6 PROTEGIDO
d_1 – DISTÂNCIA DOS PÁRA-RAIOS AO SF_6
d2 – DISTÂNCIA DOS PÁRA-RAIOS À FASE
1,2,3 – PONTOS INTERNOS AO SF_6
U – ONDA INCIDENTE NA SUBESTAÇÃO ATRAVES DA LINHA

FIGURA 7.1 - SISTEMA REDUZIDO (UTILIZADO PARA MOSTRAR ATUAÇÃO DOS PÁRA - RAIOS)

A diferença para os pára-raios vem do fato de que o centelhador é constituído apenas do "gap", isto é, não possui em série com o mesmo nenhuma resistência não linear que após o disparo defina uma curva de descarga (tensão x corrente). Para melhor entendimento ver forma de representação dos pára-raios e dos centelhadores, apresentada no CAPÍTULO VIII deste trabalho.

Não é recomendável que a proteção de subestações isoladas a SF_6, segundo a literatura disponível sobre o assunto, seja feita por centelhadores. Isto é explicável pelo fato que a tensão de disparo dos centelhadores cresce muito quando a frente a onda de tensão (que ele deve cortar) diminui. Em outras palavras, não se consegue manter sempre a mesma margem de proteção entre as máximas sobretensões que se terá dentro do barramento isolado a SF_6 (protegido por centelhadores) e os níveis de isolamento do próprio equipamento protegido, na medida em que a forma da tensão no ponto onde está instalado o centelhador varia.

Apesar destes conceitos, já é adotada no Japão [28] a proteção de subestações isoladas a SF_6 com centelhadores, sob a alegação de que os mesmos são mais econômicos que os pára-raios.

Estes centelhadores aplicados pelos japoneses (colocados na entrada da linha) são de tipo especial colocados dentro do próprio barramento a SF_6.

Entretanto, outra corrente de entendidos do assunto considera que a adoção de centelhadores, ao invés de pára-raios, para proteção das subestações isoladas a SF_6, é questionável.

Pode ser visto na referência [28] que o nível de isolamento das subestações japonesas protegidas por centelhadores é de 1800 kV (superior aos padronizados para sistema de 500 kV, ver CAPÍTULO VI, e, desta forma, superior também a níveis de isolamento especificado habitualmente para as subestações à tensão de 500 kV. Naturalmente, a adoção de um maior nível de isolamento para surtos atmosféricos (no caso japones 1800 kV, ao invés dos 1425 kV, da IEC, e dos 1550

kV, da ANSI) representa um custo adicional que não se acredita compensar a utilização de centelhadores ao invés de pára-raios. Esta posição sobre o assunto pode ser vista na referência[5].

Um outro importante problema que aparece na utilização de centelhadores para proteção de subestações isoladas a SF_6 são as sobretensões oscilatórias de alta frequência que aparecem na subestação quando os centelhadores disparam.

É necessário examinar se os equipamentos isolados a SF_6 e os demais a eles conectados (DCP's, transformadores de potência, etc.) suportam este tipo de tensão.

A atuação dos centelhadores como protetores (em lugar dos pára-raios) é mostrada nas simulações efetuadas para o sistema da Figura 7.1, na Tabela 7.1 e na Figura 7.5, a seguir.

7.5. Limitação das Sobretensões por Cabos Pára-raios e Aterramento das Linhas Conectadas à Subestação Isolada a SF_6

Uma proteção mais efetiva, por meio de cabos pára-raios, das linhas ligadas à subestação isolada a SF_6, até uma distância de 1 a 2 km da subestação, e uma melhoria proposital do aterramento das torres colocadas dentro desta distância é um método eficaz para se reduzir as sobretensões atmosféricas que atingem a subestação.

A proteção mais efetiva a que se refere é conseguida colocando-se torres especiais (ou pelo menos diferentes das que se utilizou na maior parte da linha) de forma a se dar uma maior proteção aos cabos fase da linha de transmissão (veja o modelo eletrogeométrico da linha, através do qual se calcula a maior descarga atmosférica possível de atingir o cabo fase, no CAPÍTULO V).

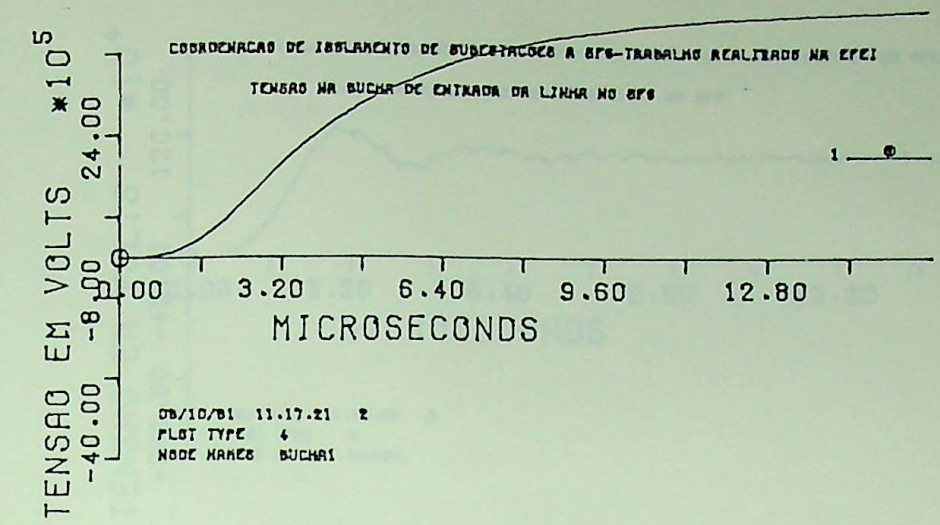
Estas "torres especiais" poderiam ter, por exemplo, um número maior de cabos pára-raios ou, então, fornecer um ângulo de proteção maior dos cabos pára-raios em relação aos cabos fase.

Já a melhoria do aterramento das torres fará com que se tenha menos probabilidade de que as descargas que atingem os cabos pára-raios sejam causadoras de descargas dos isoladores das linhas (ver [1], página 179). Com isso não haverá a condução de ondas de sobretensão através dos cabos fase, por descargas indiretas.

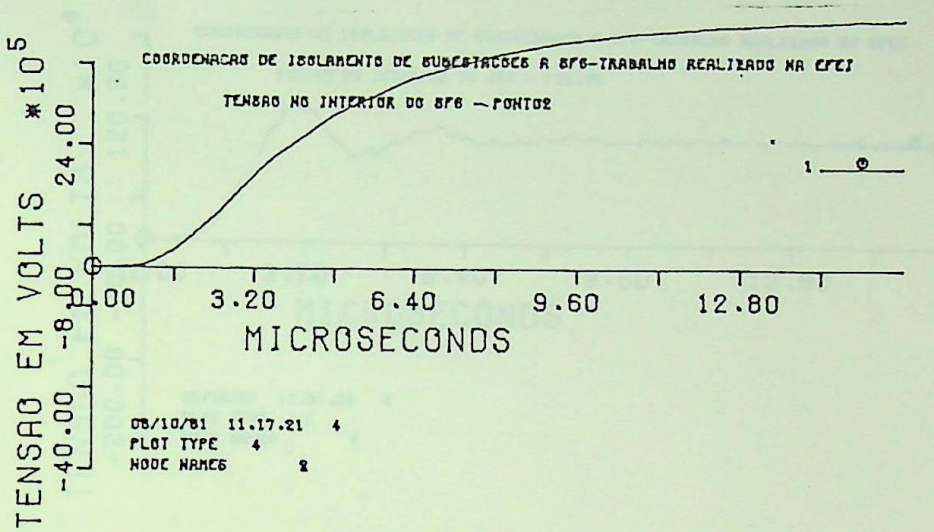
Este tipo de limitação das sobretensões que incidem na subestação diminui o valor das máximas sobretensões que se desenvolvem no interior do SF_6. A utilização deste método de limitação deve ser avaliada para cada projeto, em particular.

Caso	Item	Limitador das Sobretensões	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO BARRAMENTO A SF_6 (kV)					Figura
			Entrada da Linha no SF_6	Interna ao SF_6 Ponto 1	Interna ao SF_6 Ponto 2	Interna ao SF_6 Ponto 3	Terminais do Trafo	
1	-	Sem limitador	4923	4921	4918	4915	4920	7.2
2	7.2	Pára-raios Convencional	1315	1343	1379	1421	1438	7.3
3	7.3	Pára-raios Óxido de Zinco	1213	1257	1302	1340	1376	7.4
4	7.4	Centelhador	1320	1517	1620	1622	1688	7.5

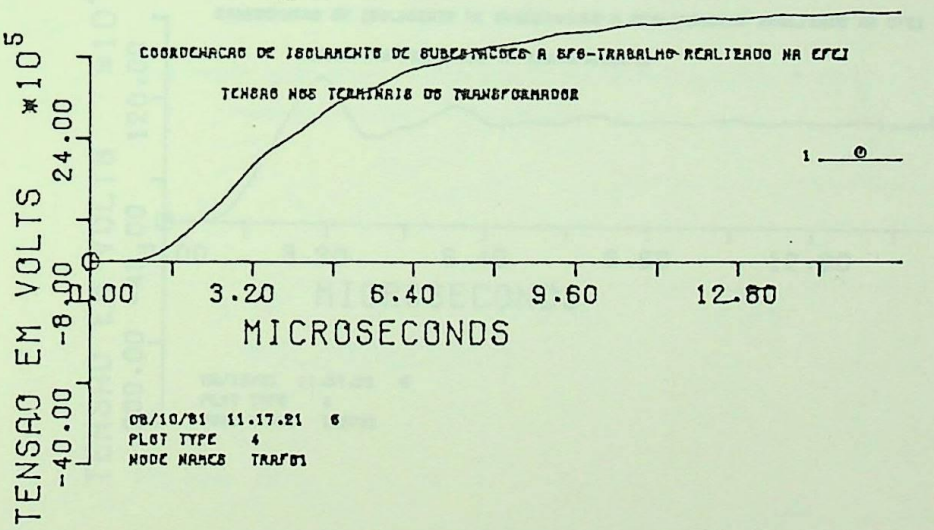
TABELA 7.1 - Valores de Sobretensões Máximas Encontradas ao Longo do Barramento Isolado a SF_6 com a Aplicação de Diferentes Tipos de Limitadores à Entrada da Subestação (Onda Incidente Definida no Capítulo V -
Amplitude = 2500 kV; Taxa de Crescimento = 1200 kV/μseg.)



a)



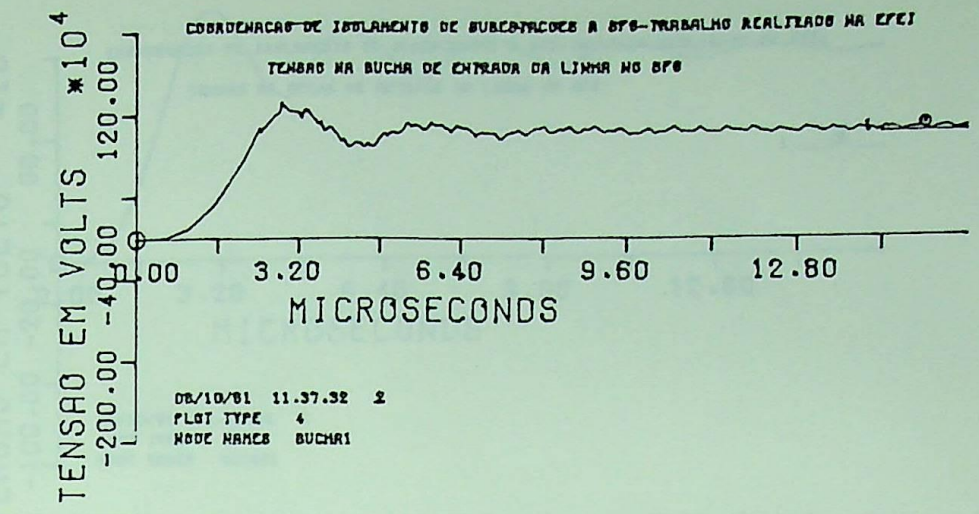
b)



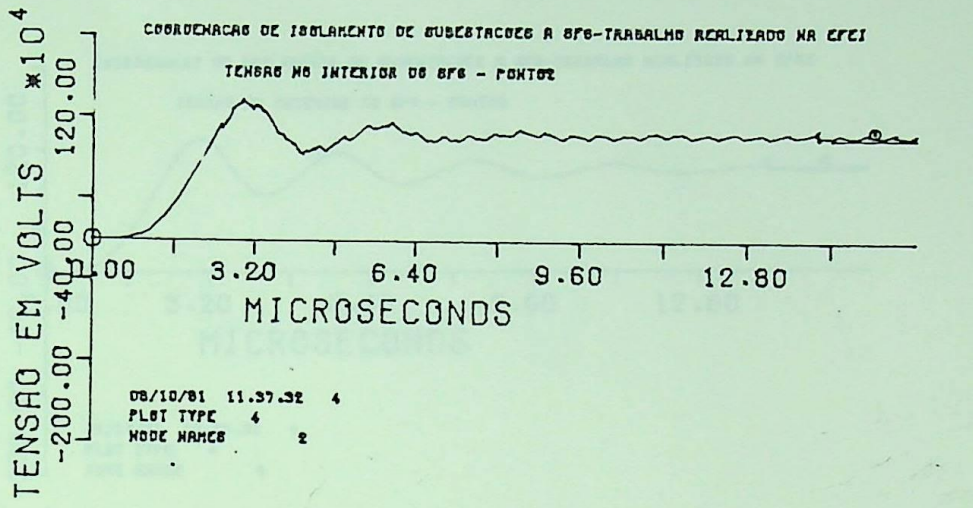
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

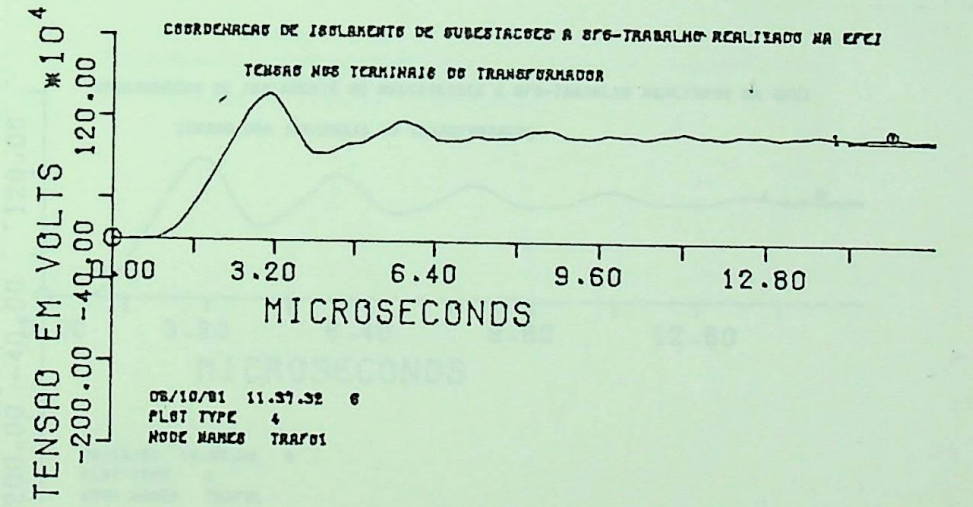
FIGURA 7.2 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6, sem Limitador de Sobretensões na Entrada de Linha



a)



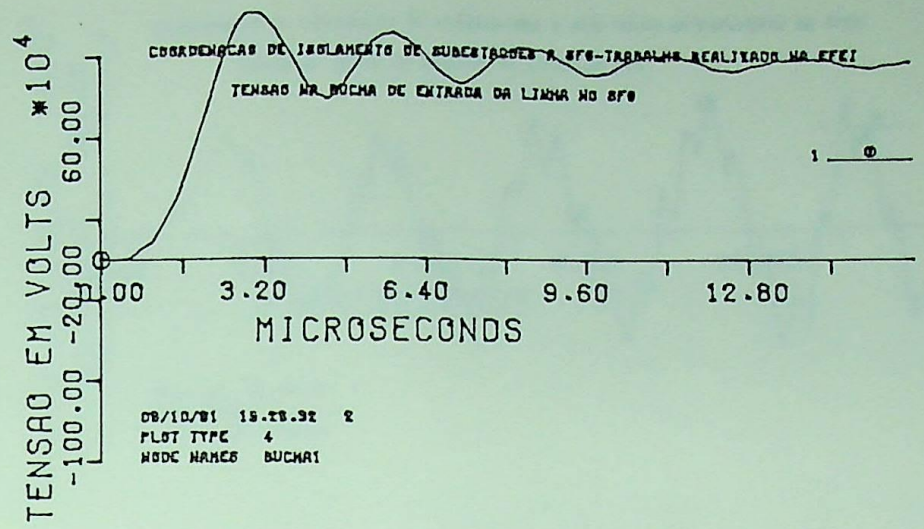
b)



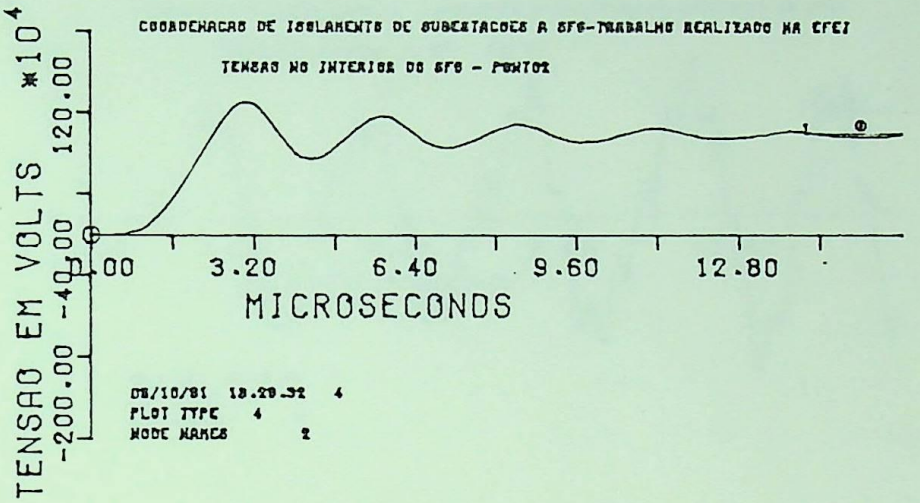
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

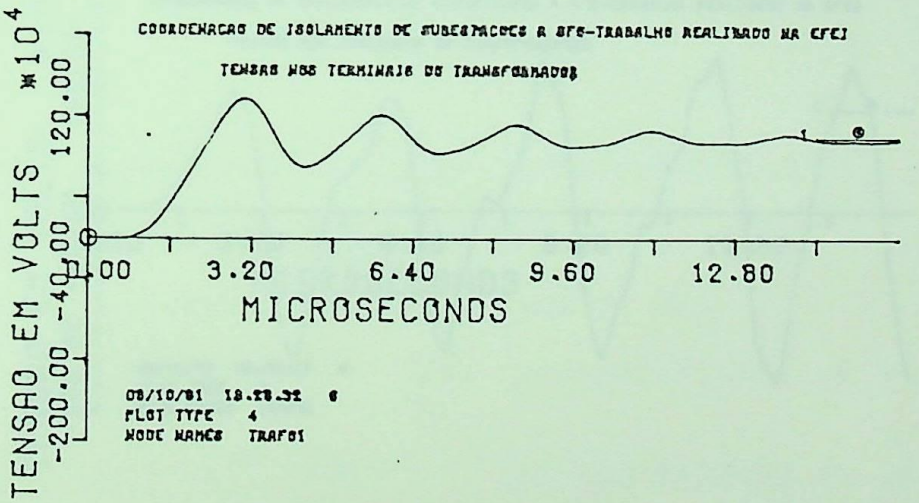
FIGURA 7.3 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6, com Pára-raios Convencionais na Entrada de Linha



a)



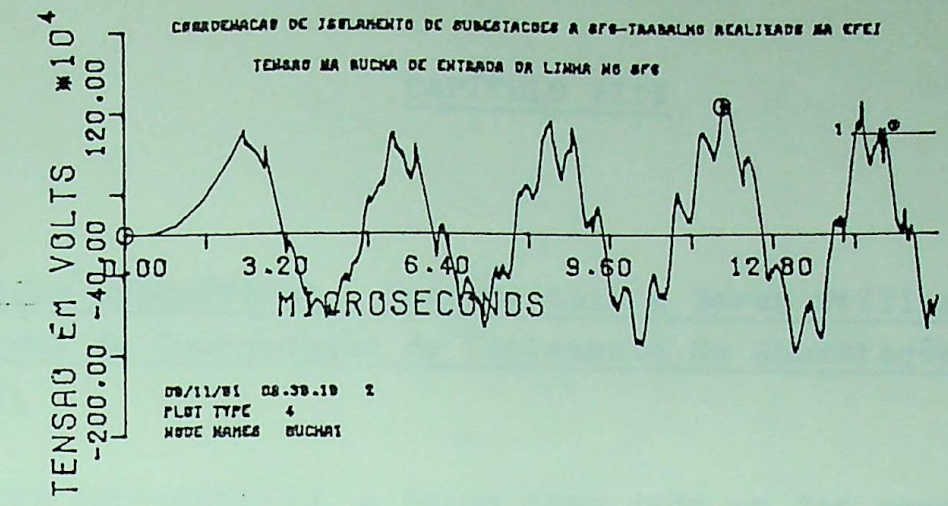
b)



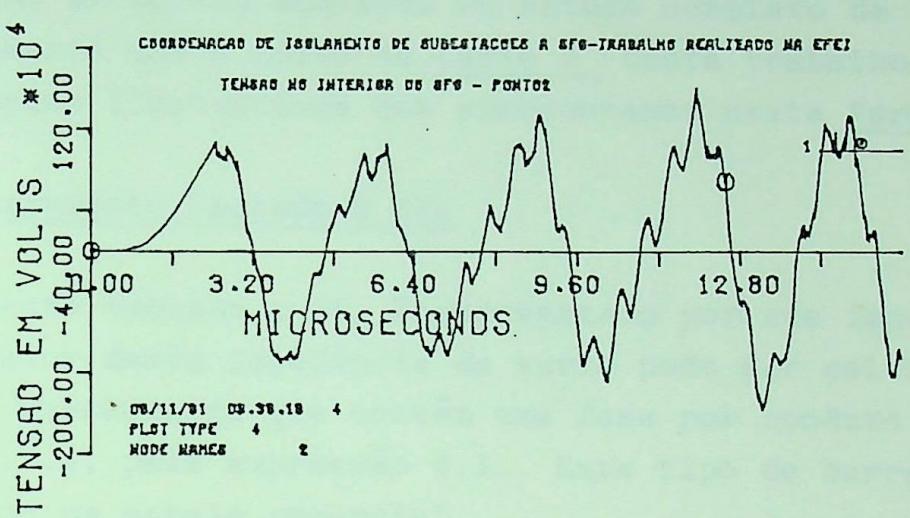
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

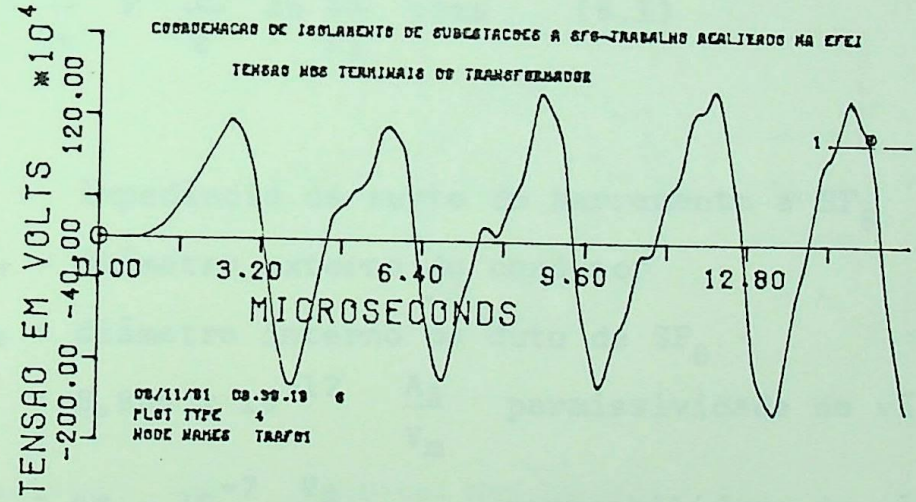
FIGURA 7.4 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6, com Pára-raios de Óxido de Zinco na Entrada de Linha



a)



b)



c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

FIGURA 7.5 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6, com Centelhadores na Entrada de Linha

CAPÍTULO VIII

8.1. Dados Específicos e Fundamentais a Serem Utilizados nos Estudos de Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6

Neste item apresenta-se a forma como cada um dos componentes existentes no sistema deve ser representado no estudo. Estas, naturalmente, são as formas adotadas no estudo completo de Coordenação de Isolamento que é feito na Parte 2 deste trabalho, assim como nos exemplos ilustrativos que apresentamos nesta Parte 1.

8.2. Barramento Isolado a SF_6

O barramento isolado a SF_6 é representado por sua impedância de surto. O valor desta impedância de surto pode ser calculado, para o caso dos barramentos que contém uma fase por conduto isolado a SF_6, Figura 8.1.a, pela expressão 8.1. Este tipo de barramento é o que se utiliza em escala comercial.

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{r_1}{r_2} \text{ ohms} \qquad (8.1)$$

Onde:

Z = impedância de surto do barramento a SF_6

$2r_1$ = diâmetro externo do condutor

$2r_2$ = diâmetro interno do duto de SF_6

$\varepsilon = 8{,}855 \times 10^{-12} \frac{A_s}{V_m}$ permissividade do vácuo e do SF_6

$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V_s}{A_m}$ permeabilidade do vácuo e do SF_6

Substituindo-se valores de ε e μ em (8.1), tem-se:

$$Z = 60 \ln \Omega_2/\Omega_1 \text{ ohms} \qquad (8.2)$$

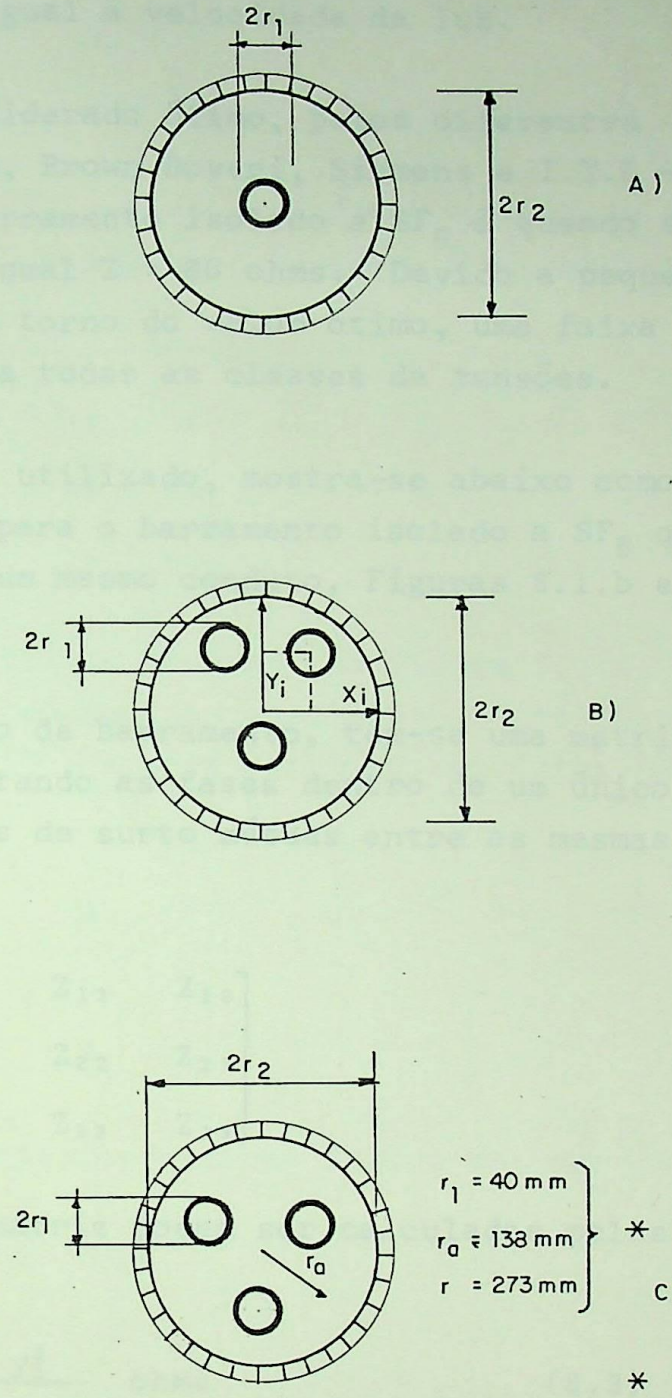


FIGURA 8.1 - TIPOS DE BARRAMENTOS ISOLADOS A SF_6

A) UMA FASE POR ENVÓLUCRO (MAIS UTILIZADO COMERCIALMENTE)
B) TRÊS FASES POR ENVÓLUCRO (ARRANJO ASSIMÉTRICO)
C) TRÊS FASES POR ENVÓLUCRO (ARRANJO SIMÉTRICO)

A velocidade de propagação da onda no SF_6 é $v = \sqrt{1/LC} = \sqrt{1/\mu\varepsilon} =$ = 300 m/μseg, que é igual à velocidade da luz.

O valor de r_2/r_1 considerado ótimo, pelos diferentes fabricantes (ASEA, Delle-Allsthom, Brown Boveri, Siemens e I.T.E - Gould), para o projeto de um barramento isolado a SF_6 é quando se tem $r_2/r_1 \cong$ e $\cong 2{,}72$, e para o qual Z = 60 ohms. Devido a pequenas variações de dimensões, em torno do valor ótimo, uma faixa de 55 a 100 ohms é encontrada para todas as classes de tensões.

Embora não seja muito utilizado, mostra-se abaixo como calcular as impedâncias de surto para o barramento isolado a SF_6 que possui as três fases dentro de um mesmo conduto, Figuras 8.1.b e 8.1.c, ilustram estes casos.

Para este segundo tipo de barramento, tem-se uma matriz de impedâncias, pois, agora, estando as fases dentro de um único invólucro aparecerão impedâncias de surto mútuas entre as mesmas. Esta matriz tem a forma:

$$(Z_2) = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix}$$

Escola Federal de Engenharia Biblioteca MAUÁ Itajubá

Onde os elementos da matriz podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$Z_{ii} = 60 \ln \frac{r_2^2 - x_i^2 - y_i^2}{r_2 \cdot r_1} \quad \text{ohms} \qquad (8.3)$$

$$Z_{ik} = 60 \cdot \ln \sqrt{\frac{(r_2^2 - x_i x_k - y_i y_k)^2 + (x_i y_k - y_i x_k)^2}{r_2^2 [(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2]}} \quad \text{ohms} \qquad (8.4)$$

Se a disposição dos condutores dentro do invólucro for simétrica, ter-se-á apenas uma única impedância de surto próprio e uma única impedância de surto mútua.

$$(Z_2) = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \qquad (8.5)$$

Para o arranjo simétrico, mostrado na Figura 8.1.c a matriz (Z_2) foi calculada, e apresentada na referência [14], com os seguintes resultados exatos:

$$(Z_2) = \begin{bmatrix} 95 & 15 & 15 \\ 15 & 95 & 15 \\ 15 & 15 & 95 \end{bmatrix}$$

Para o arranjo assimétrico, mostrado na Figura 8.1.b, a matriz (Z_2) foi calculada de acordo com as dimensões utilizadas por um fabricante da Alemanha [14], e apresentou os seguintes resultados exatos:

$$(Z_2) = \begin{bmatrix} 94 & 19 & 11 \\ 19 & 94 & 19 \\ 11 & 19 & 94 \end{bmatrix}$$

Normalmente, são encontrados valores dentro das seguintes faixas:

Z_m = 10 - 30 ohms

Z_s = 90 - 130 ohms

8.3. Elementos dentro do Barramento Isolado a SF_6

8.3.1. Disjuntores

Os disjuntores podem ser representados, a princípio, por sua impedância de surto Z_c e seu comprimento ℓ_c. Os disjuntores incluem muitos dispositivos de chaveamento e de extinção de arco e então possuem um diâmetro um pouco maior que o barramento. Consequente-

mente, a impedância de surto Z_c é um pouco menor que a do próprio barramento isolado a SF_6. A impedância de surto do disjuntor pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$Z_c = \frac{\ell_c}{C_c . v} \text{ ohms} \qquad (8.6)$$

Onde:

ℓ_c = comprimento (em mm)

C_c = capacitância interna do disjuntor

v = velocidade de propagação da onda (v = 300 m/μseg)

Tensão Nominal (kV)	Comprimento ℓ_c (mm)	Capacitância Interna C_c (pF)	Impedância de Surto Z_c (ohms)
66 - 72,5	1200 - 2000	200	20 - 33
123 - 170	1300 - 3300	150 - 300	26 - 79
245 - 300	1600 - 4000	160 - 400	33 - 79
362 - 550	2400 - 8000	210 - 800	33 - 86
800	4800	300	53

TABELA 8.1 - Dados de Disjuntores de Barramentos Isolados a SF_6

Normalmente, entretanto, em estudos práticos considera-se que a impedância de surto do disjuntor é a mesma que a do restante do barramento[5,14].

8.3.2. Buchas

A conecção entre o barramento isolado a SF_6 e as linhas aéreas (ou cabos, se for o caso) é feita através de buchas especialmente construídas para este fim.

Normalmente, estas buchas são isoladas a SF_6, SF_6 - óleo, óleo - papel ou resina-papel impregnado.

Nos estudos realizados para a Coordenação de Isolamento, estes equipamentos são representados por capacitâncias concentradas com os seguintes valores:

- buchas isoladas a SF_6 : C = 25 - 150 pF

- buchas isoladas a óleo-papel: C = 100 - 1000 pF

- buchas isoladas a resina-papel: C = 100 - 1000 pF

- buchas isoladas a SF_6-óleo: C = 190 - 550 pF

Os valores mais altos são representativos para tensões mais elevadas.

8.3.3. Transformadores de Potencial

a) Transformadores de Potencial Indutivo

O circuito equivalente para representação destes equipamentos é mostrado na Figura 8.2. Algumas vezes uma mera capacitância de 100 pF é utilizada [5,14]

b) Divisor Capacitivo de Potencial

São representados por uma capacitância concentrada, de acordo com a Tabela 8.2, abaixo:

Tensão Nominal (kV)	Capacitância C_{DCP} (nF)
145	16
245	8 - 11
362	8
420	4 - 7
550	5
800	2 - 3,5

TABELA 8.2 - Capacitância de Surto dos Transformadores de Potencial Capacitivos

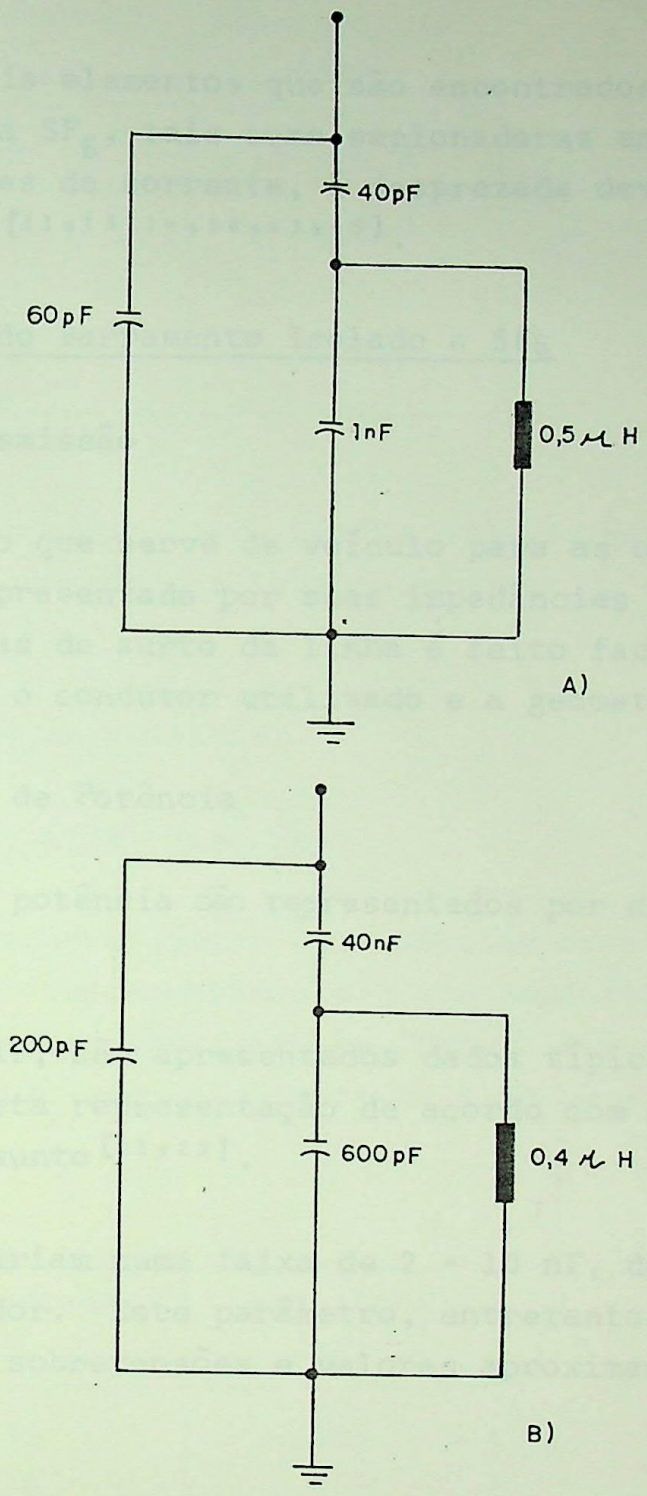


FIGURA 8.2 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA REPRESENTAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO

A)- ISOLAMENTO A SF_6 - TENSÃO NOMINAL > 145 kV

B)- ISOLAMENTO DE RESINA EPOXY – TENSÃO NOMINAL < 145 kV

8.3.4. Demais elementos

A influência dos demais elementos que são encontrados dentro dos barramentos isolados a SF_6, tais como secionadoras em posição fechada e transformadores de corrente, é desprezada devido aos seus pequenos comprimentos [11,13,14,38,43,45].

8.4. Elementos Fora do Barramento Isolado a SF_6

8.4.1. Linha de Transmissão

A linha de transmissão que serve de veículo para as ondas que atingem a subestação é representada por suas impedâncias de surto. O cálculo das impedâncias de surto da linha é feito facilmente na medida em que se conheça o condutor utilizado e a geometria da mesma.

8.4.2. Transformador de Potência

Os transformadores de potência são representados por capacitâncias de surtos.

Na Tabela 8.3, a seguir, são apresentados dados típicos que poderão ser utilizados nesta representação de acordo com a literatura disponível sobre o assunto [21,22].

Estas capacitâncias variam numa faixa de 2 - 10 nF, dependendo do projeto do transformador. Este parâmetro, entretanto, não é crítico para o cálculo das sobretensões e valores aproximados poderão ser utilizados.

Tensão Nominal (kV)	Capacitância C_T (nF)
362	1,5 - 4,0
420	1,5 - 4,0
425	1,5 - 4,0
765	1,5 - 4,0

TABELA 8.3 - Capacitâncias de Surto Típica para Serem Utilizadas na Representação dos Transformadores de Potência

8.4.3. Transformadores de Potencial

a) Transformador de Potencial Indutivo

Estes equipamentos quando colocados externamente ao barramento isolado a SF_6, poderão ser representados por uma capacitância de surto concentrada. Novamente, apresenta-se, Tabela 8.4, a seguir, valores típicos que poderão ser utilizados no tipo de estudo que se está considerando:

Tensão Nominal (kV)	Capacitância C_{TP} (nF)
138	0,595
230	0,705
345	0,920
500	1,105
765	1,325

TABELA 8.4 - Capacitância de Surto para Serem Utilizadas para Representação dos Transformadores de Potencial Indutivos [51,52]

b) Divisor Capacitivc de Potencial

Da mesma forma que quando colocados dentro do barramento isolado a SF_6, estes equipamentos poderão ser representados nos estudos sob a forma de capacitores de surto. Na Tabela 8.5, abaixo são apre - sentados valores que poderão ser adotados para este fim, segundo informações divulgadas por fabricantes familiares a este tipo de estudo:

Tensão Nominal (kV)	Capacitância C_{DCP}(nF)
138	2,0 - 5,0
230	2,0 - 5,0
345	2,0 - 5,0
500	2,0 - 5,0
765	4,0

TABELA 8.5 - Capacitância de Surto Típicas que Poderão ser Utilizadas na Representação de Divisores Capacitivos de Potencial [38,45,51,52]

8.4.4. Pára-raios

Tendo em vista a versatilidade do programa de transitórios disponível para se efetuar o estudo das sobretensões, os pára-raios são representados de forma bastante próxima a sua real operação.

a) Pára-raios Convencionais

Chamamos pára-raios convencionais aos pára-raios com "gap" em série com resistências não lineares, isto é, aqueles que normalmente não estão conduzindo corrente e possam a fazê-lo quando a tensão do sistema, onde estão instalados, ultrapassam o seu valor de disparo. Estes pára-raios são representados por um "gap" que opera quando a tensão atinge um determinado valor e por sua curva de des

carga (tensão x corrente). Estes valores são obtidos junto aos fabricantes e estão disponíveis em catálogos, como é o caso dos valores listados abaixo (referentes aos pára-raios Allugard II, da General Electric [39], utilizados nos estudos efetuamos na Parte 2 deste trabalho). Para outros pára-raios os dados correspondente seriam obtidos facilmente.

- Dados dos pára-raios (convencionais) que serão utilizados neste trabalho (para um sistema de 500 kV) :

. tensão nominal - 444 kV (rms)
. tensão de disparo
  para surtos de manobra - 940 kV (pico)
. tensão de disparo
  para surtos atmosféricos - 1055 kV (pico)

Tensão de Descarga (kV)	Corrente de Descarga (kA)
670	1,5
866	5,0
965	10,0
1043	15,0
1112	20,0
1354	40,0

TABELA 8.6 - Característica de Descarga dos Pára-raios Convencionais, Tipo Allugard II

b) Pára-raios de Óxido de Zinco (sem "Gap")

Estes pára-raios são bem mais recentes que os anteriores. Não possuem "gap" e estão constantemente conduzindo corrente do sistema cujo valor depende da sua curva de descarga, advinda do fato de que eles são apenas uma resistência não linear. Nestes pára-raios,

tudo se passa como se a tensão de disparo fosse igual a zero. A sua curva de descarga (tensão x corrente) pode ser obtida junto aos fabricantes, ou mesmo em catálogos, como é o caso dos valores listados abaixo (referentes aos pára-raios de óxido de zinco Tranquell, da General Electric, utilizados nos estudos efetuados na Parte 2 deste trabalho). Novamente, salienta-se que se os pára-raios fossem de outro fabricante os dados correspondentes seriam facilmente obtidos.

- Dados dos pára-raios (óxido de zinco) que serão utilizados neste trabalho (para um sistema de tensão nominal 500 kV):

  - Tensão nominal - 420 kV (rms)
  - Tensão de disparo para surtos - 0 kV

Tensão de Descarga (kV)	Corrente de Descarga (kA)
670	0,001
740	0,100
780	0,500
804	1,000
829	1,500
867	3,000
899	5,000
950	10,000
985	15,000
1012	20,000
1118	40,000

TABELA 8.7 - Característica de Descarga dos Pára-raios de Óxido de Zinco, Tipo TRANQUELL

Obs.: Os pára-raios de óxido de zinco referidos neste trabalho são do tipo sem "gap".

c) Pára-raios Blindados ou Encapsulados [5,11,13,14,41]

Os dois tipos de pára-raios referidos anteriormente (convencional ou óxido de zinco) são do tipo usado também nas subestações convencionais (aéreas). Para as subestações isoladas a SF_6 pode ter, também, além destes, um outro tipo de pára-raios denominados de pára-raios encapsulados ou blindados que na verdade são pára-raios do mesmo tipo dos anteriores. A diferença é que estes são blindados e integrados ao próprio barramento isolado a SF_6.

Para a representação deste tipo de pára-raios nos estudos de Coordenação de Isolamento necessita-se das mesmas informações que para os pára-raios convencionais e/ou óxido de zinco, isto é: tensão de disparo e curva de descarga (tensão x corrente).

Da mesma forma que os anteriores, estes dados são disponíveis com os fabricantes que, neste caso, deverão ser os mesmos da própria subestação isolada a SF_6 (mais detalhes sobre estes pára-raios poderão ser vistos no CAPÍTULO X).

8.4.5. Centelhadores

Os centelhadores são representados por um "gap" que possui uma tensão de disparo (conseguida junto aos fabricantes). Não possuem curva de descarga (tensão x corrente), isto é, após o disparo transforma-se num curto-circuito.

8.4.6. Torre de Transmissão

Nos estudos de sobretensão efetuados para se fazer a Coordenação de Isolamento, as torres das linhas de transmissão deverão ser representadas por uma impedância de surto equivalente, geralmente típica [1,5,11,14,38,43,45].

A Tabela 8.8, a seguir, mostra os valores de impedância de surto e alturas, geralmente, utilizados nos estudos de Coordenação de Isolamento, para representação das torres.

Classe de Tensão (kV)	Altura da Torre (m)	Impedância de Surto (ohms)
66	21	100
154	42	100
275	63	100
500	63	100

TABELA 8.8 - Valores Típicos de Alturas e Impedâncias de Surtos Utilizados para Representação de Torres de Transmis - são nos Estudos de Coordenação de Isolamento [5]

8.4.7. Resistência de Aterramento das Torres

A resistência de pé de torre (resistência de aterramento) deve ser medida no campo. Caso a linha não esteja ainda construída, situação em que não se poderia fazer a medida, sugere-se que sejam utilizados valores esperados a nível de projeto ou, então, valores de resistência de aterramento conseguidos pela companhia, para a qual se efetua o estudo de Coordenação de Isolamento, em linhas da mesma classe de tensão. De preferência, estas linhas usadas como referência deverão estar numa região próxima ao local onde se situa a subestação isolada a SF_6.

CAPÍTULO IX

9.1. Parâmetros que Influenciam as Sobretensões de Origem Atmosféricas numa Subestação a SF_6

As sobretensões que se desenvolvem no interior das subestações isoladas a SF_6 são, naturalmente, dependentes das ondas de tensão e/ou de corrente que incidem na subestação através das linhas a elas ligadas (são definidas nos CAPÍTULOS IV e V) e, também, dependente dos tipos de protetores que se emprega para redução das mesmas (CAPÍTULO VII).

Além destes elementos, outros parâmetros do sistema e da subestação protegida influenciam as sobretensões que se desenvolvem. Neste item são apresentados de forma detalhada a influência de todos eles, de forma que ao se fazer o estudo completo da Parte 2 os conceitos estarão bem fixados. Neste item mostra-se, também, o resultado de simulações efetuadas com um sistema simplificado, conforme é feito na literatura[11,12,13,14,16,21,22,26] sobre Coordenação de Isolamento de um modo geral, de tensão nominal igual a 500 kV.

O objetivo destas simulações é mostrar, e consolidar, em números, e de maneira simplificada, os conceitos emitidos sobre cada "parâmetro".

9.2. Localização dos Pára-raios

A localização dos pára-raios é um dos mais importantes parâmetros. A distância que o pára-raios é colocado do barramento que está se protegendo influencia diretamente no valor das sobretensões que se encontra (mais próximos do barramento menores serão as sobretensões). Os barramentos isolados a SF_6 apresentam a vantagem de poderem receber os pára-raios chamados de blindados (ou encapsulados) que são colocados dentro do próprio SF_6. Com estes equipamentos, a redução das sobretensões a níveis compatíveis com as classes de isolamento normalizadas será quase sempre conseguida. A aplica-

ção de pára-raios blindados (ou encapsulados) é mais custosa que a aplicação de pára-raios convencionais que serão os primeiros a serem empregados na Coordenação de Isolamento (os blindados só devem ser empregados se os convencionais não surtirem efeito).

Na Tabela 9.1, apresentamos os níveis de sobretensões desenvolvidos no interior do barramento isolado a SF_6 (para o sistema reduzido da Figura 9.1) para diferentes localizações dos pára-raios.

Esta influência é mostrada tanto para os pára-raios convencionais como os de óxido de zinco. Pelos resultados obtidos, observa-se que a aproximação dos pára-raios ao SF_6 diminue as sobretensões desenvolvidas.

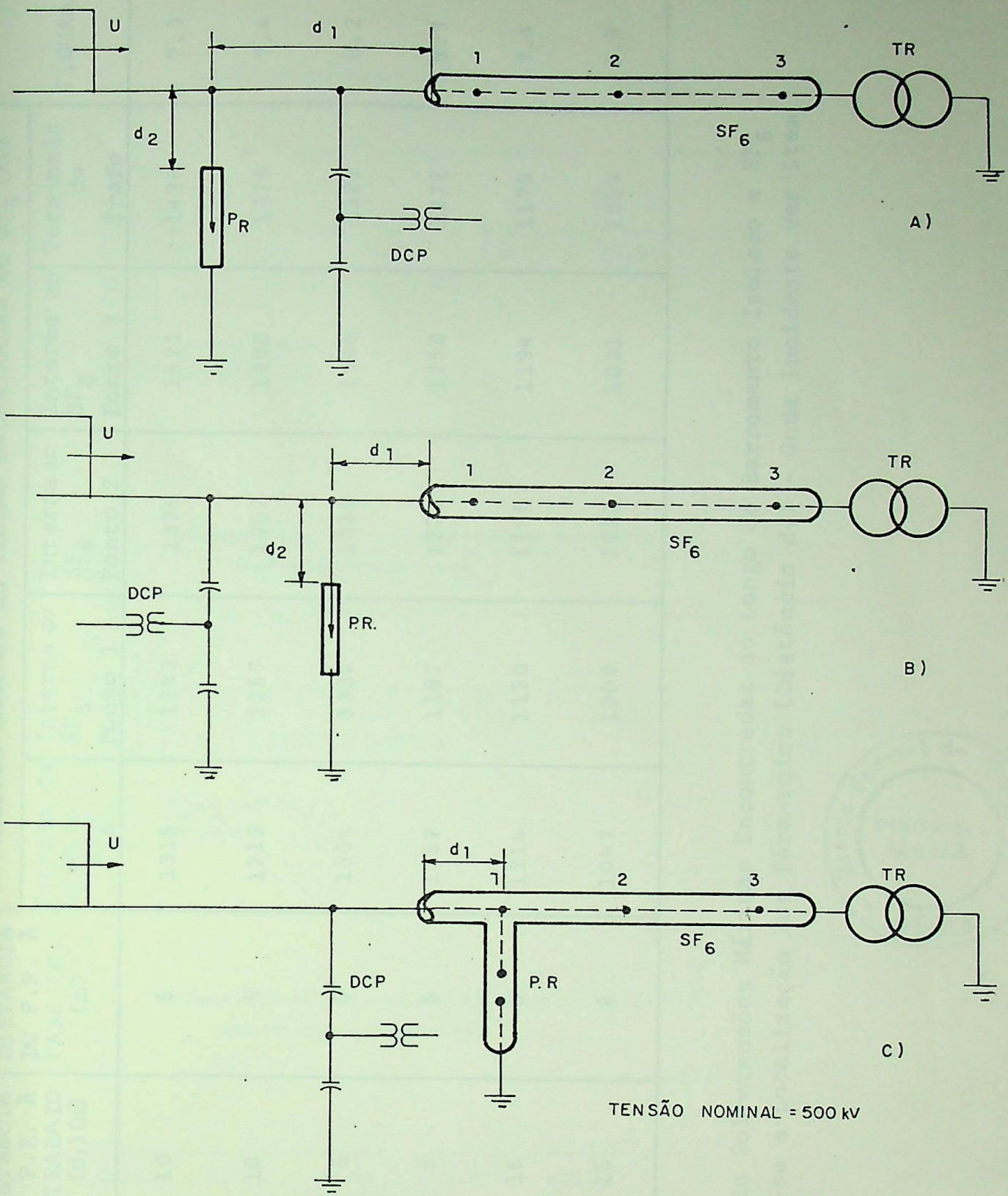


FIGURA 9.1 - DIFERENTES LOCALIZAÇÕES DOS PÁRA-RAIOS EM RELAÇÃO AO BARRAMENTO PROTEGIDO.

A) NA CHEGADA DA LINHA (1º EQUIPAMENTO.)

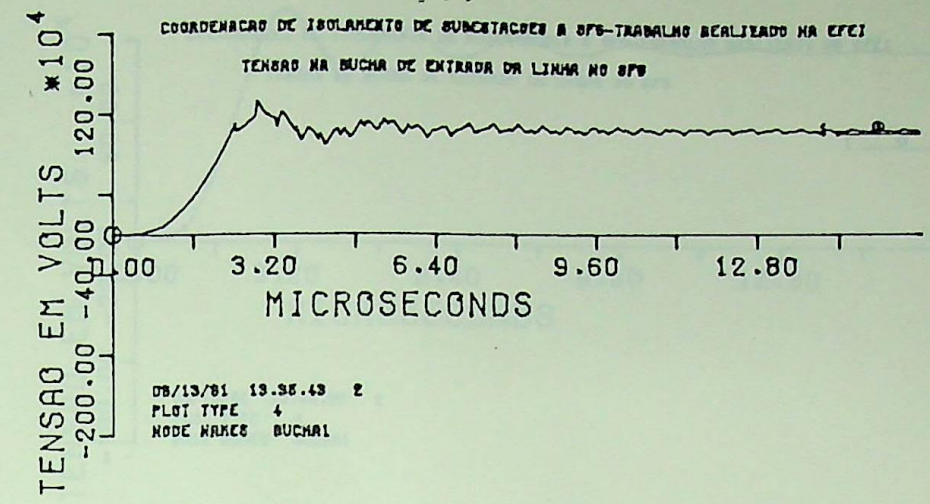
B) NA CHEGADA DA LINHA (POSIÇÃO TROCADA COM O DCP)

C) DENTRO DO BARRAMENTO (BLINDADO OU ENCAPSULADO)

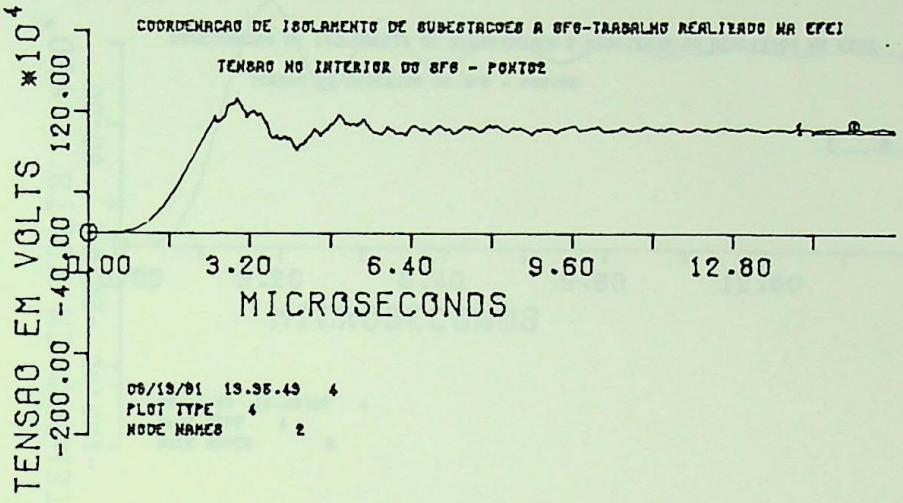
CASO	PÁRA-RAIOS UTILIZADOS	DISTÂNCIA DO P.R. À ENTRADA DO SF_6 (d_1)(m)	DISTÂNCIA DO P.R. À FASE (d_2) (m)	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADAS NO SF_6 (kV)					FIGURAS
				Entrada da Linha no SF_6	Interna ao SF_6 Ponto 1	Interna ao SF_6 Ponto 2	Interna ao SF_6 Ponto 3	Terminais do Trafo	
1	Convencional Externo	10	5	1315	1343	1379	1421	1438	7.3
2	Óxido de Zinco Externo	10	5	1213	1257	1302	1340	1376	7.4
3	Convencional Externo	5	5	1304	1332	1339	1346	1322	9.2
4	Óxido de Zinco Externo	5	5	1152	1187	1221	1250	1272	9.3
5	Convencional Blindado	15	0	1214	1120	1185	1194	1175	9.4
6	Óxido de Zinco Blindado	15	0	1047	1008	1011	1031	1054	9.5

TABELA 9.1 - Valores de Sobretensões Máximas Encontradas ao Longo do Barramento Isolado a SF_6 Variando-se a Localização dos Pára-raios (Distância d_1) - Onda Incidente ver Item 5.2.1.

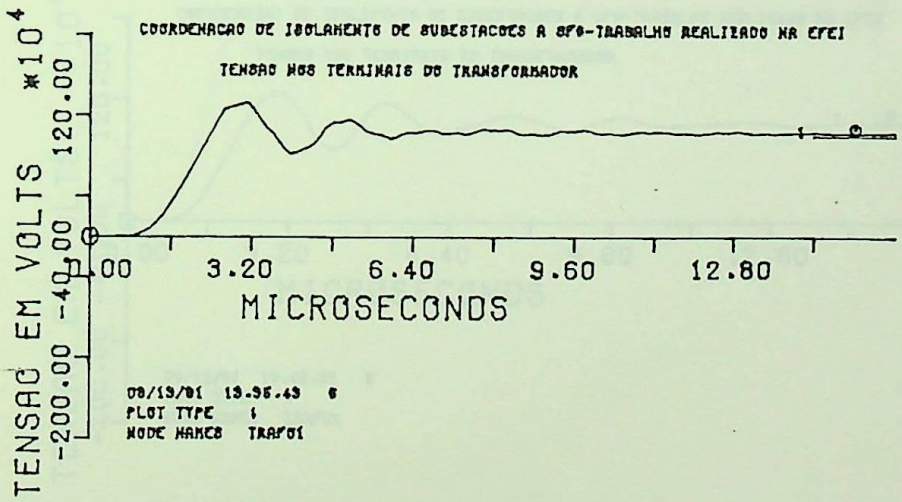
Escola Federal de Itajubá - Biblioteca MAUA



a)



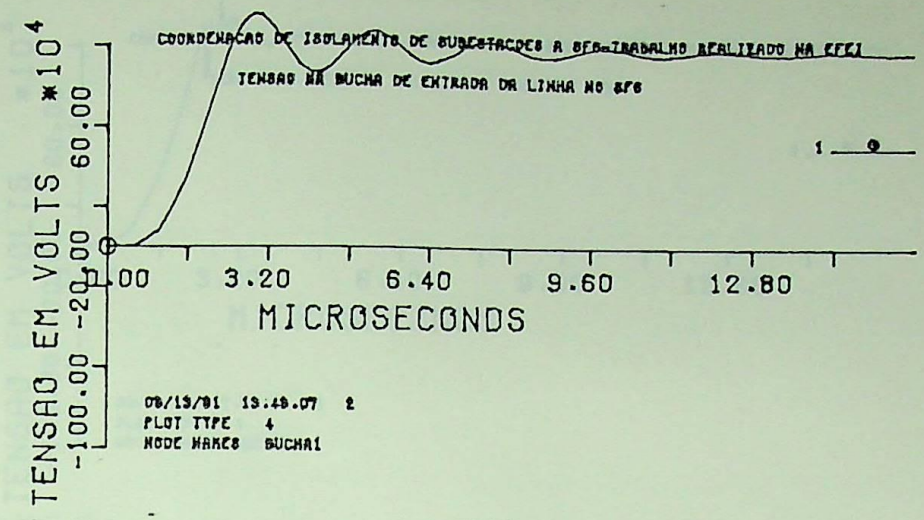
b)



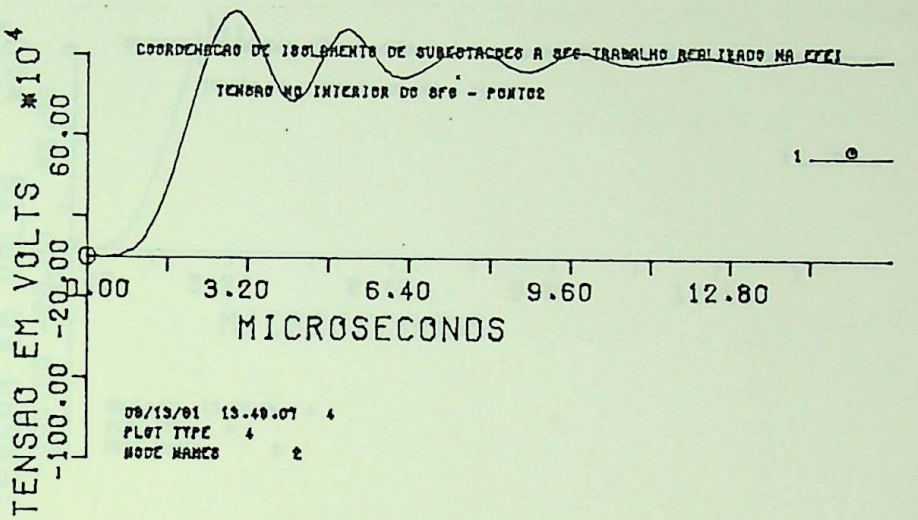
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

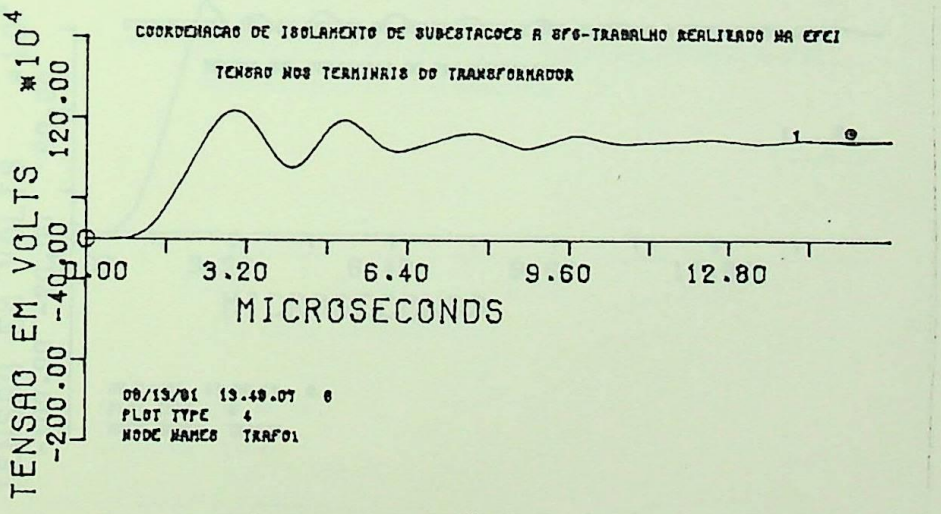
FIGURA 9.2 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 3 da Tabela 9.1 (Distância do P.R ao SF_6 = 5m)



a)



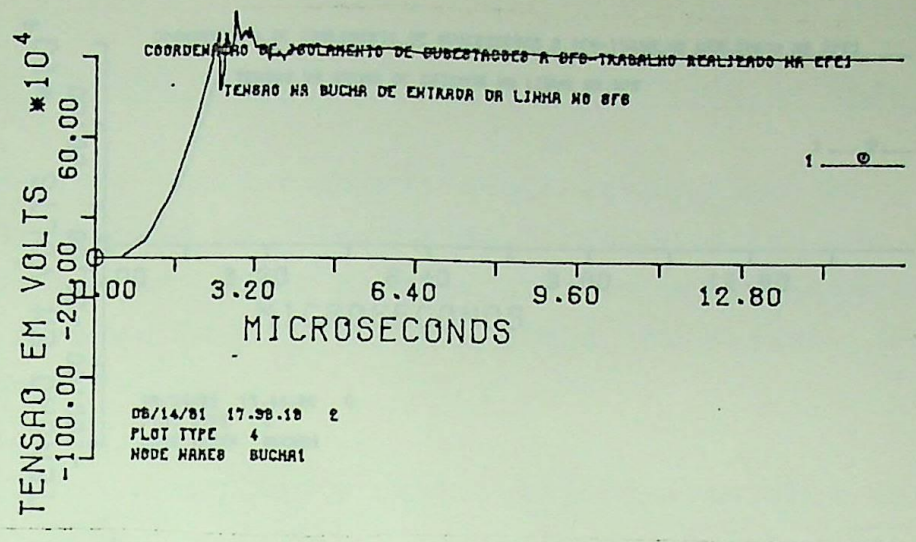
b)



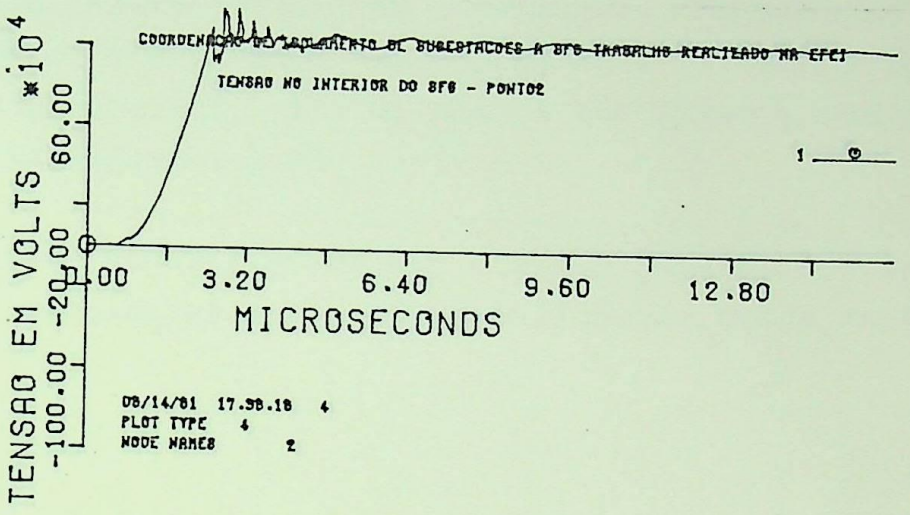
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

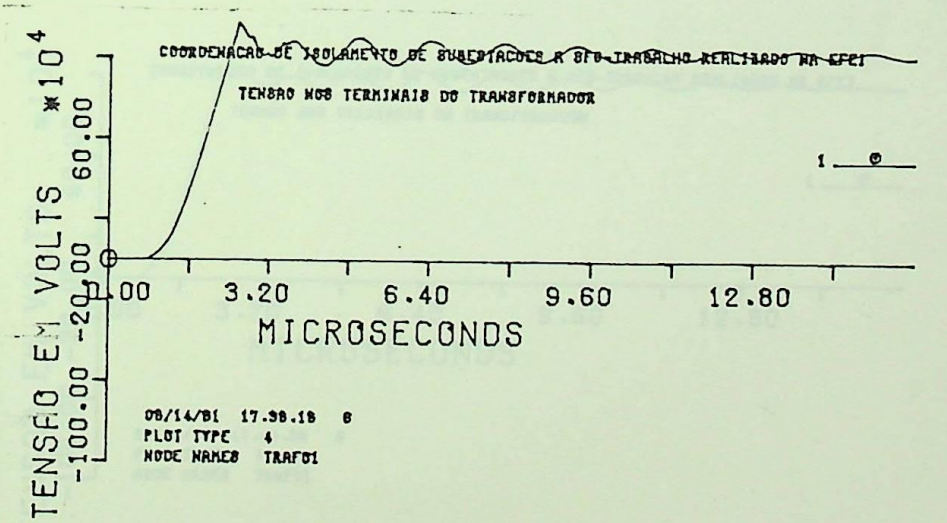
FIGURA 9.3 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 4 da Tabela 9.1 (Distância do P.R. ao SF_6 = 5m)



a)



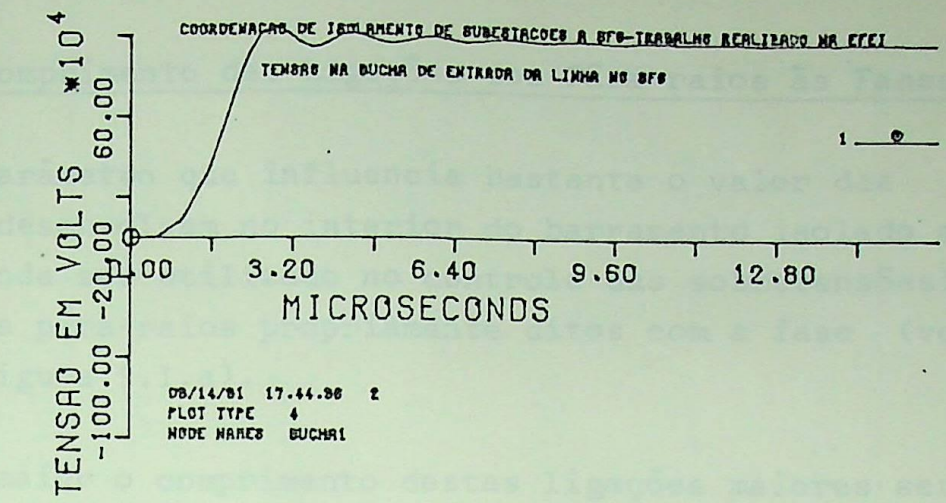
b)



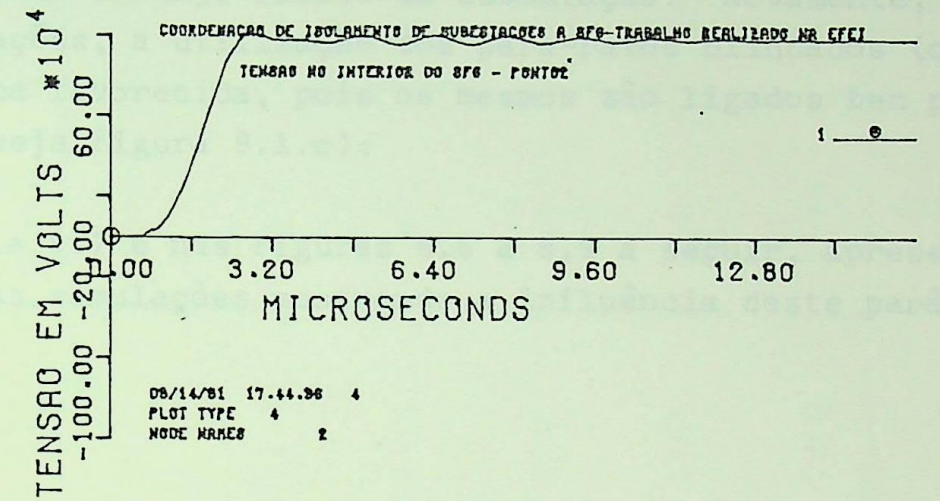
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

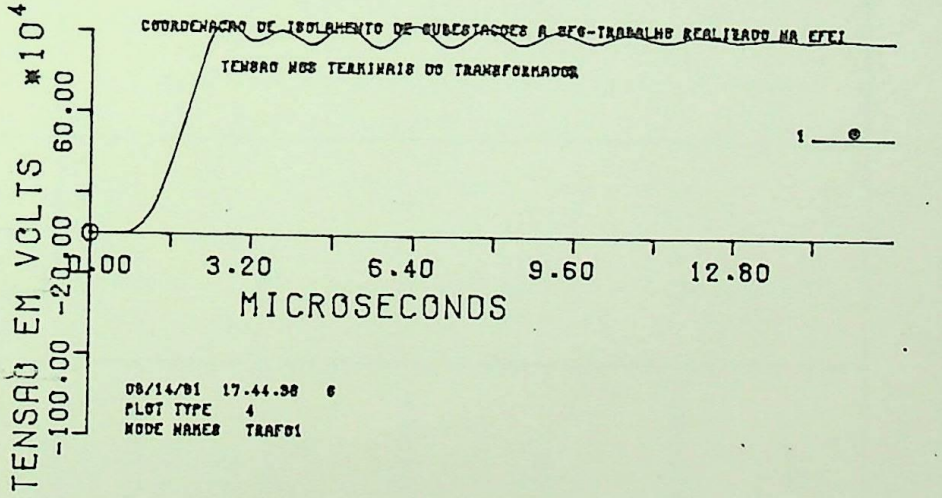
FIGURA 9.4 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 5 da Tabela 9.1 (Distância do P.R. ao SF_6 = 15m)



a)



b)



c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

FIGURA 9.5 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 6 da Tabela 9.1 (Distância do P.R. ao SF_6 = 15m)

9.3. Comprimento das Ligações dos Pára-raios às Fases

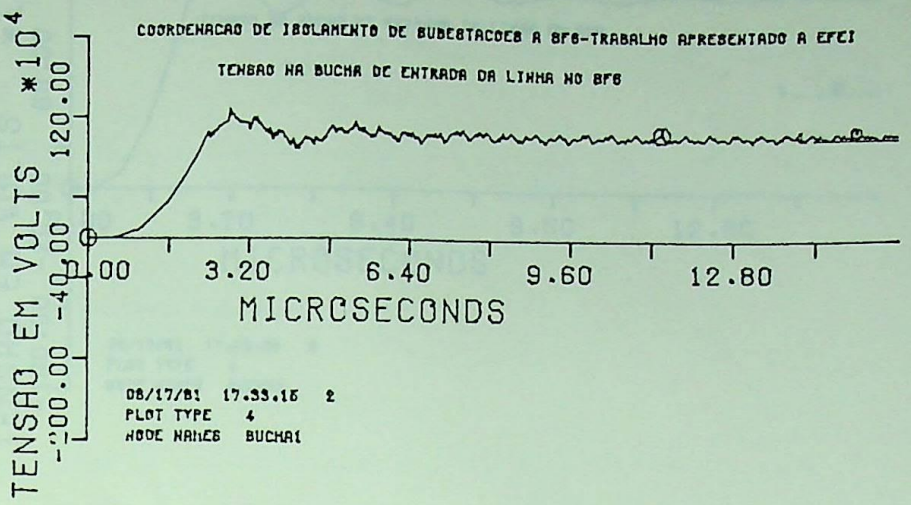
Outro parâmetro que influencia bastante o valor das sobretensões que se desenvolvem no interior do barramento isolado a SF_6 (e, por isso, pode ser utilizado no controle das sobretensões) são as ligações dos pára-raios propriamente ditos com a fase (ver distância d_2 na Figura 9.1.a).

Quanto maior o comprimento destas ligações maiores serão as sobretensões no interior do SF_6. Desta forma, é importante que se tenha as mesmas com os menores comprimentos possíveis dentro do permitido pelo arranjo físico da subestação. Novamente, quanto a estas ligações, a utilização dos pára-raios blindados (ou encapsulados) fica favorecida, pois os mesmos são ligados bem próximos às fases (veja Figura 9.1.c):

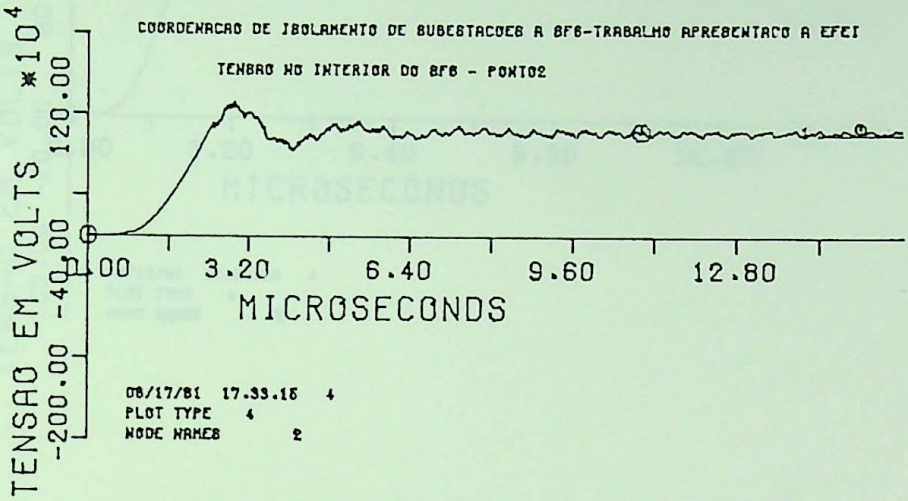
Na Tabela 9.2 e nas Figuras 9.6 a 9.9 a seguir, apresenta-se resultados das simulações mostrando a influência deste parâmetro.

CASO	PÁRA-RAIOS UTILIZADOS	DISTÂNCIA DO P.R. À ENTRADA DO SF_6 (d_1) (m)	DISTÂNCIA DO P.R. À FASE (d_2) (m)	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO SF_6 (kV)					FIGURA
				Entrada da linha no SF_6	Interna ao SF_6 Ponto 1	Interna ao SF_6 Ponto 2	Interna ao SF_6 Ponto 3	Terminais do Trafo	
1	Convencional	10	0	1272	1288	1325	1354	1355	9.6
2	Óxido de Zinco	10	0	1133	1176	1212	1252	1284	9.7
3	Convencional	10	5	1315	1343	1379	1421	1438	7.3
4	Óxido de Zinco	10	5	1215	1257	1302	1340	1376	7.4
5	Convencional	10	15	1405	1418	1464	1514	1548	9.8
6	Óxido de Zinco	10	15	1350	1396	1440	1479	1506	9.9

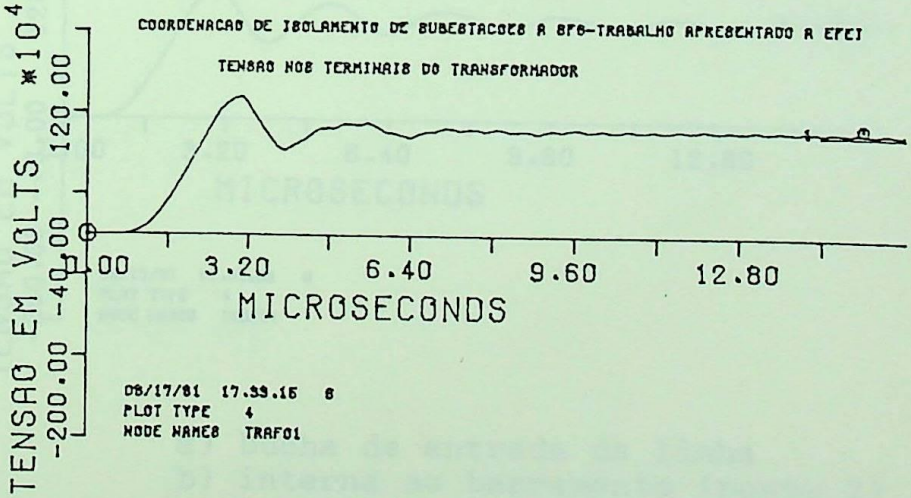
TABELA 9.2 - Valores de Sobretensões Máximas Encontradas ao Longo do Barramento Isolado a SF_6 Variando-se as Ligações dos Pára-raios às Fases (Distância d_2) - Onda Incidente Ver Item 5.2.1



a)



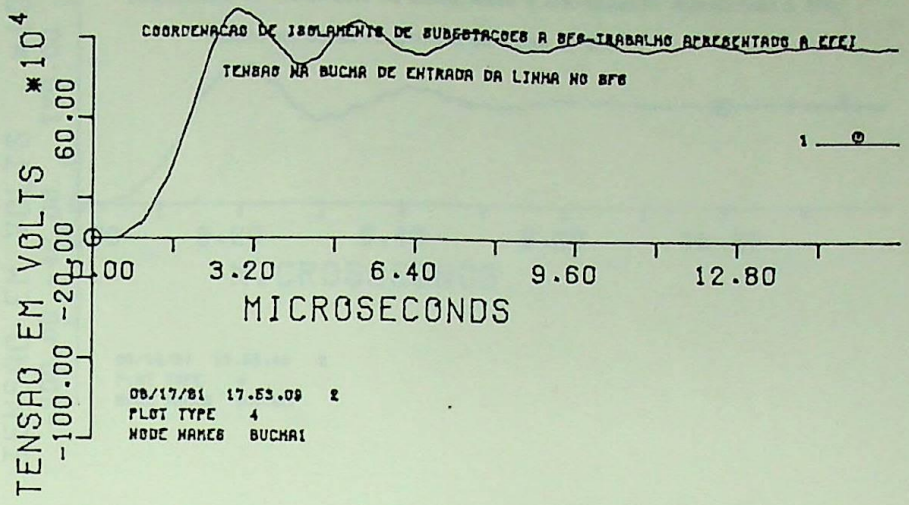
b)



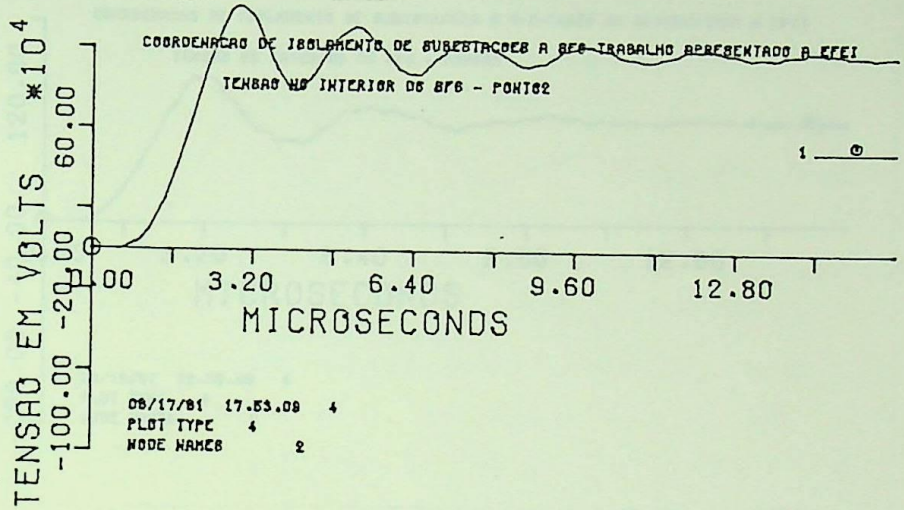
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

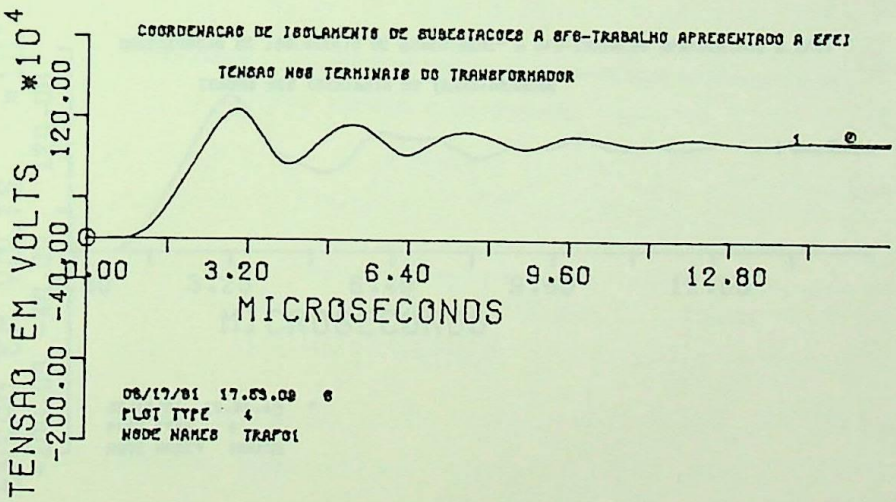
FIGURA 9.6 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 1 da Tabela 9.2 (Distância do P.R. à Fase = 0m)



a)



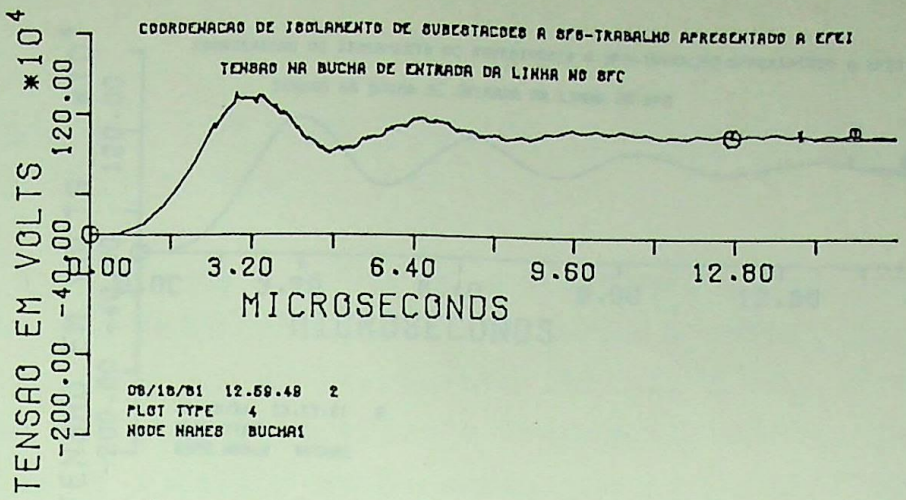
b)



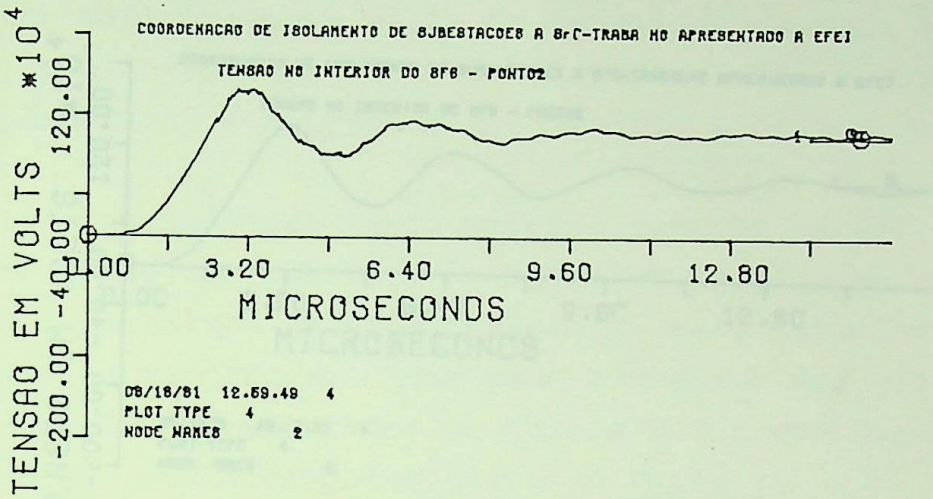
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

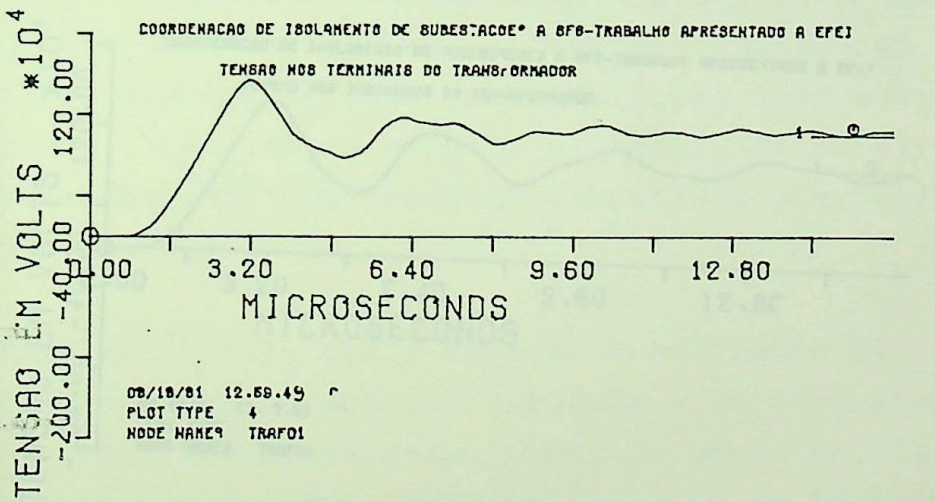
FITURA 9.7 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 2 da Tabela 9.2 (Distância do P.R. à Fase = 0m)



a)



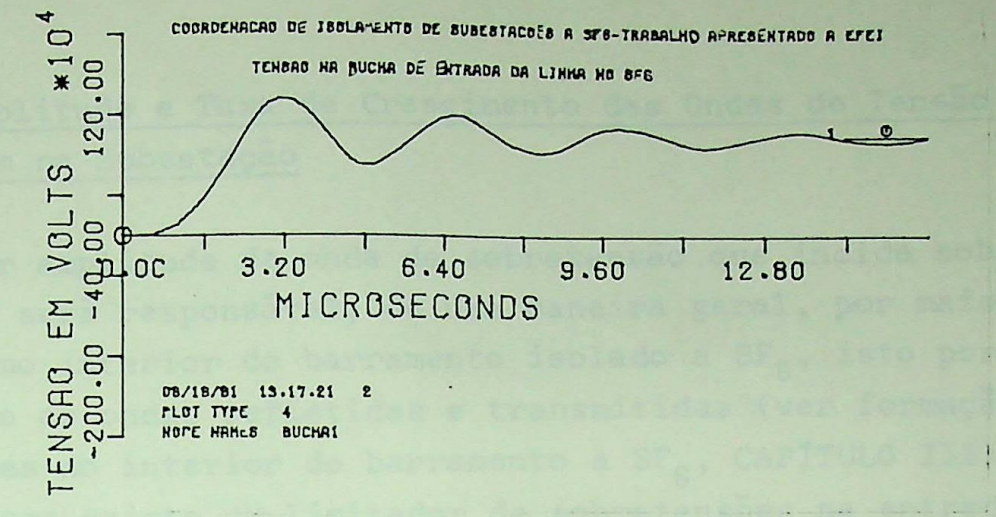
b)



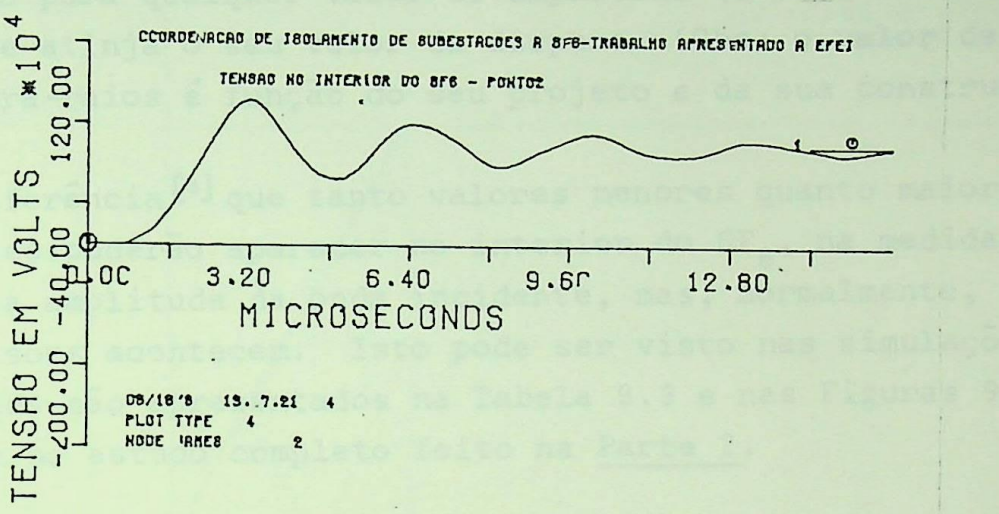
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

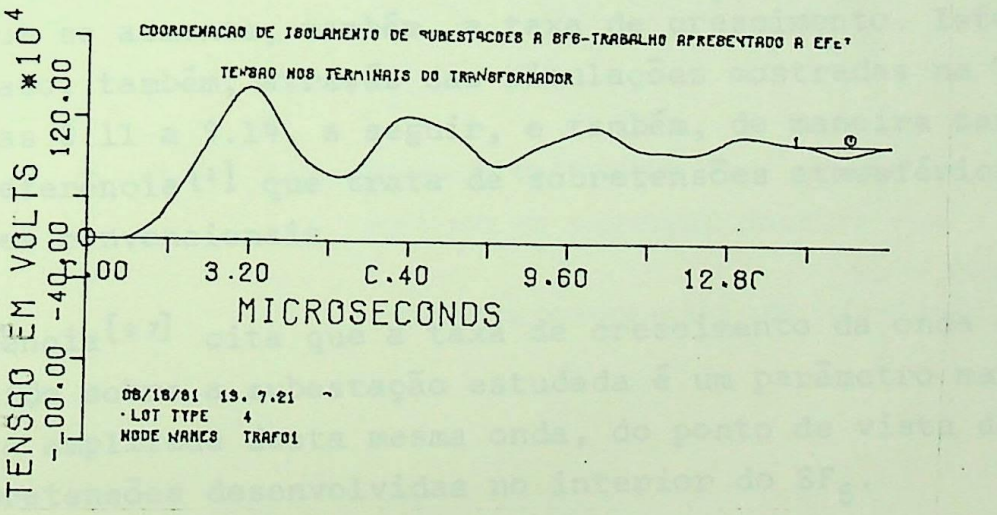
FIGURA 9.8 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 5 da Tabela 9.2 (Distância do P.R. à Fase = 15m)



a)



b)



c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

FIGURA 9.9 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 6 da Tabela 9.2 (Distância do P.R. à Fase = 15m)

9.4. Amplitude e Taxa de Crescimento das Ondas de Tensão que Incidem na Subestação

Uma maior amplitude da onda de sobretensão que incide sobre a subestação será responsável, de uma maneira geral, por maiores sobretensões no interior do barramento isolado a SF_6, isto porque maiores serão as ondas refletidas e transmitidas (ver formação das sobretensões no interior do barramento a SF_6, CAPÍTULO III). Entretanto, como existe um limitador de sobretensões na entrada da subestação, este elemento protetor estará disparando no mesmo valor de tensão para qualquer valor de amplitude da onda incidente, desde que se atinja o seu valor de disparo. (Obs: o valor de disparo de um pára-raios é função do seu projeto e da sua construção).

Diz a referência [5] que tanto valores menores quanto maiores de sobretensões poderão aparecer no interior do SF_6, na medida que se aumenta a amplitude da onda incidente, mas, normalmente, maiores sobretensões acontecem. Isto pode ser visto nas simulações cujos resultados são apresentados na Tabela 9.3 e nas Figuras 9.11 a 9.14 e também no estudo completo feito na Parte 2.

Quanto à taxa de crescimento da onda incidente, as sobretensões desenvolvidas no interior do barramento a SF_6 serão maiores na medida em que se aumente, também, a taxa de crescimento. Isto pode ser confirmado, também, através das simulações mostradas na Tabela 9.3 e Figuras 9.11 a 9.14, a seguir, e também, de maneira bastante clara na referência [1] que trata de sobretensões atmosféricas em subestações convencionais.

A referência [27] cita que a taxa de crescimento da onda de tensão que incide sobre a subestação estudada é um parâmetro mais influente que a amplitude desta mesma onda, do ponto de vista de variação das sobretensões desenvolvidas no interior do SF_6.

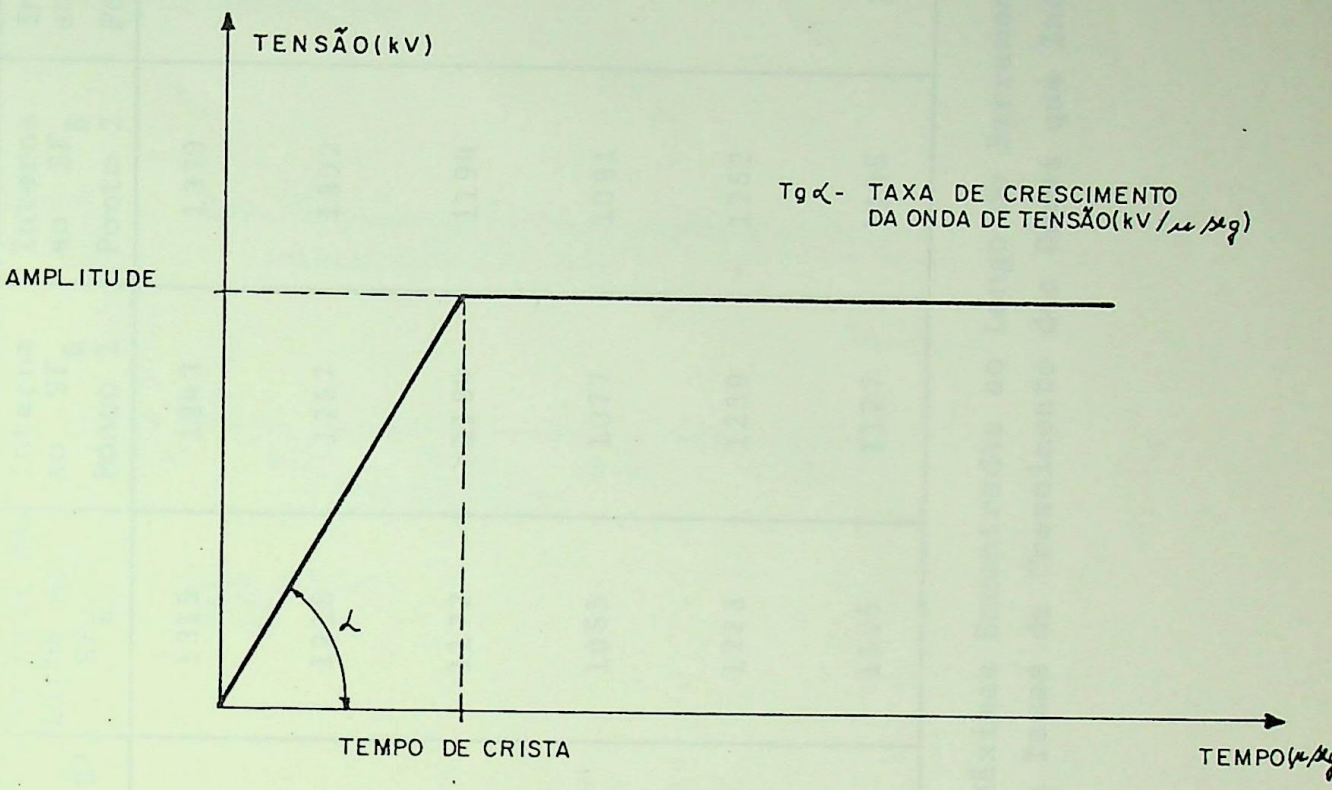
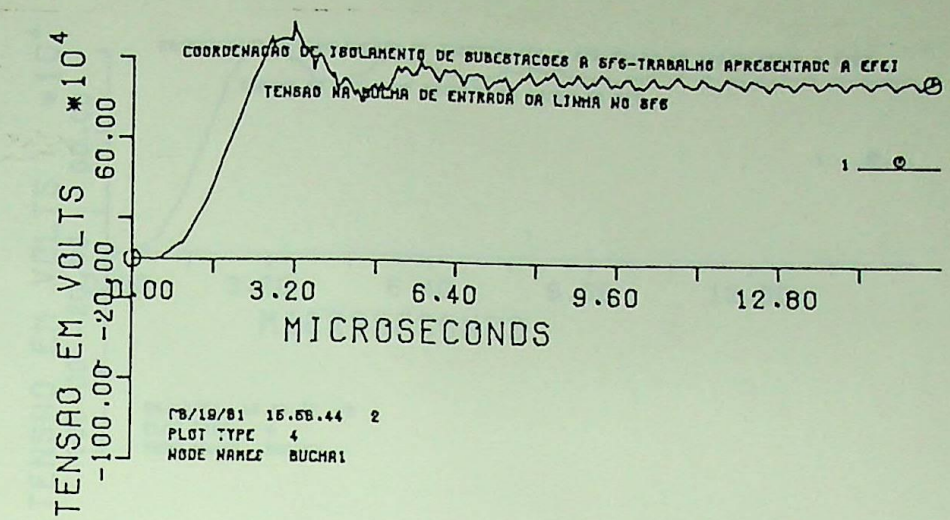


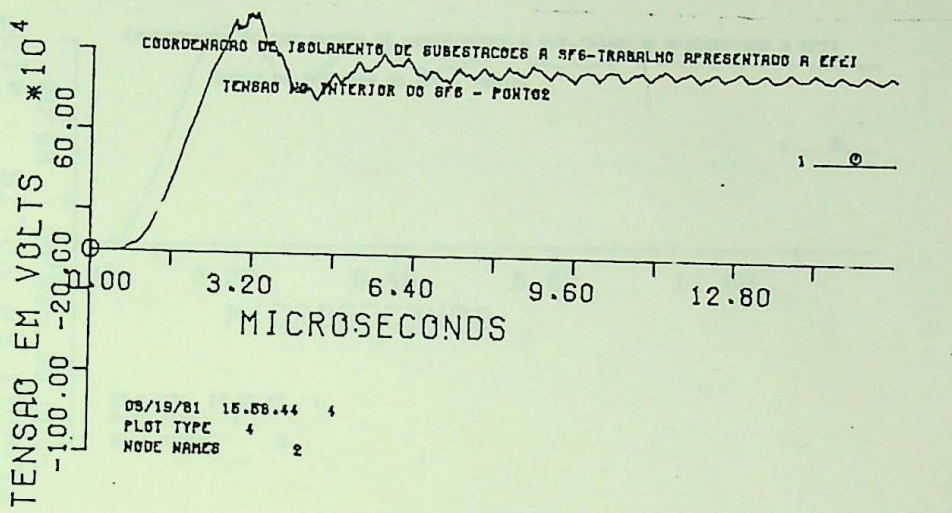
FIGURA · 9. 10 - FORMA DA ONDA DE TENSÃO
INCIDENTE NA SUBESTAÇÃO UTILIZADA NOS
ESTUDOS DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO.
[11, 12, 13, 24, 27, 38, 41, 45]

CASO	PÁRA-RAIOS UTILIZADOS	AMPLITUDE (kV)	TAXA DE CRESCI-MENTO (kV/μseg)	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO SF_6 (kV)					FIGURA
				Entrada da Linha no SF_6	Interna ao SF_6 Ponto 1	Interna ao SF_6 Ponto 2	Interna ao SF_6 Ponto 3	Terminais do Trafo	
1	Convencional	2500	1200	1315	1343	1379	1421	1438	7.3
2	Óxido de Zinco	2500	1200	1215	1257	1302	1340	1376	7.4
3	Convencional	1500	1200	1172	1184	1194	1201	1206	9.11
4	Óxido de Zinco	1500	1200	1055	1077	1091	1109	1132	9.12
5	Convencional	2500	600	1223	1239	1252	1269	1259	9.13
6	Óxido de Zinco	2500	600	1105	1127	1145	1161	1174	9.14

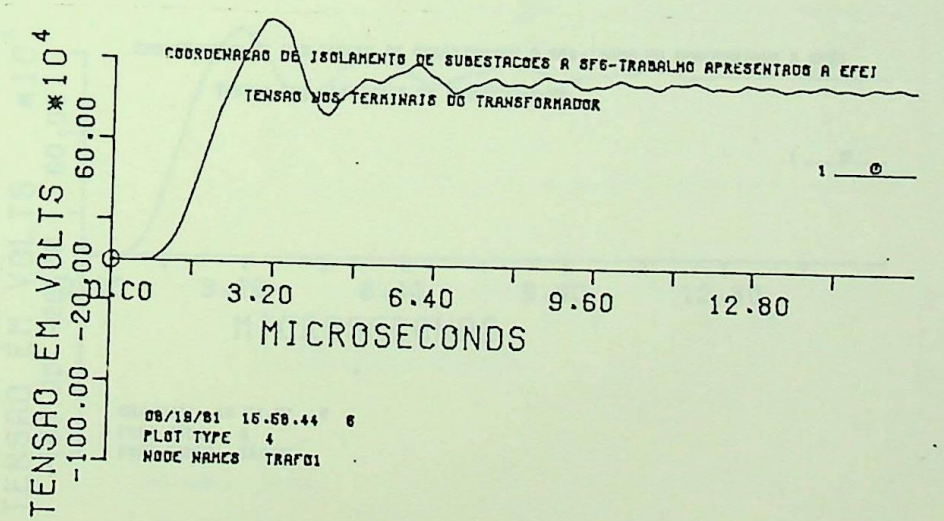
TABELA 9.3 - Valores de Sobretensões Máximas Encontradas ao Longo do Barramento Isolado a SF_6 Variando-se a Amplitude e Taxas de Crescimento das Ondas que Incidem na Subestação



a)



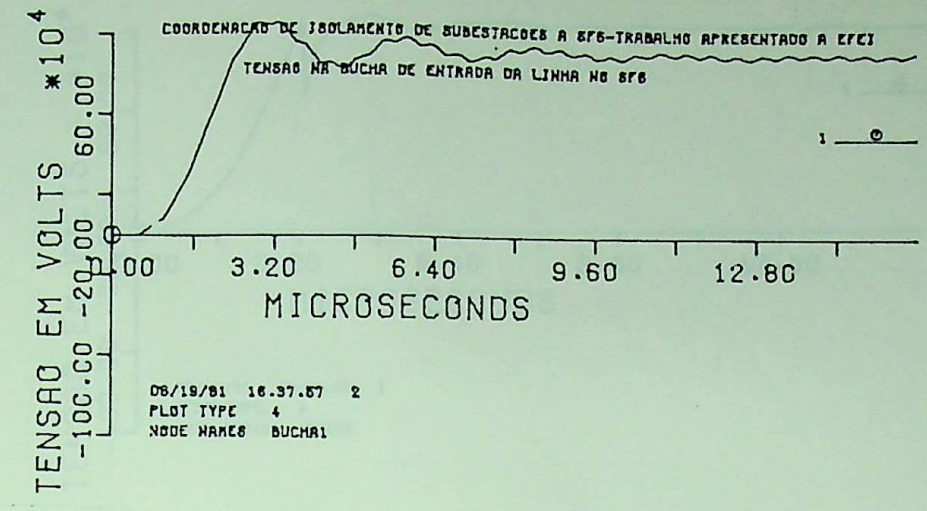
b)



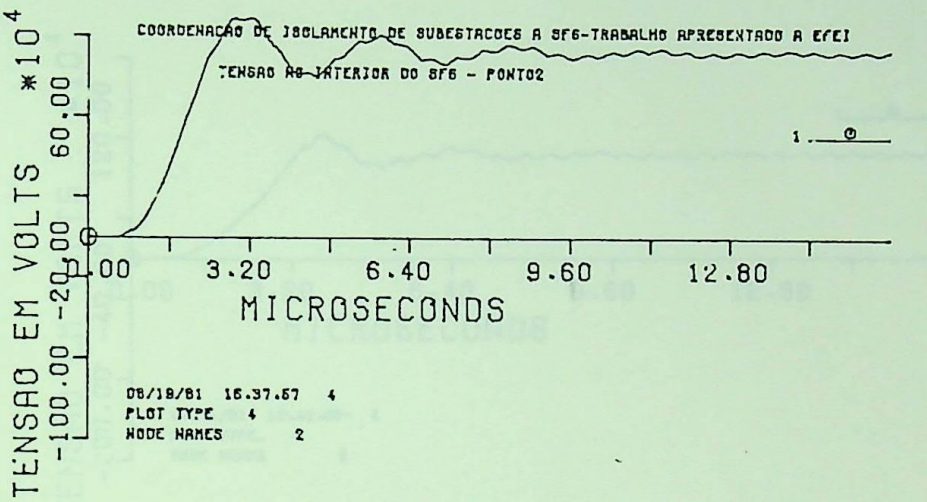
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

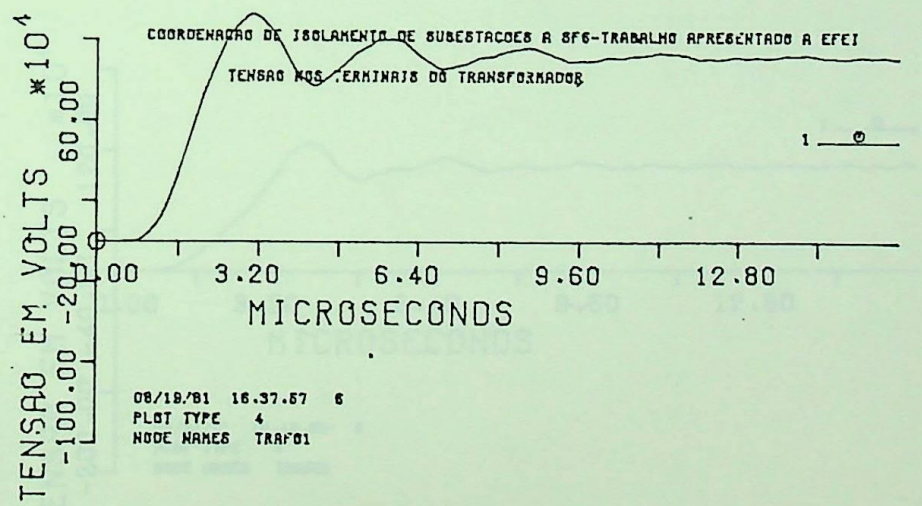
FIGURA 9.11 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 3 da Tabela 9.3 (Onda Incidente: 1500kV; 1200 kV/µseg



a)



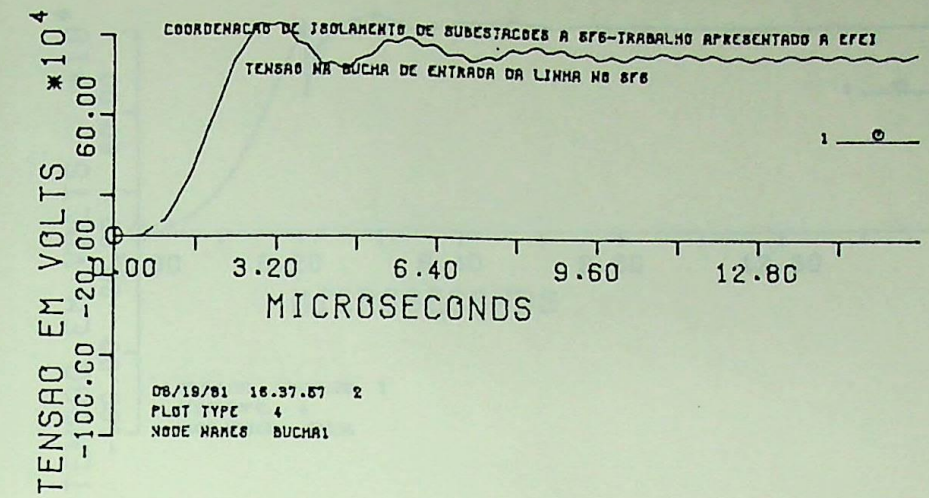
b)



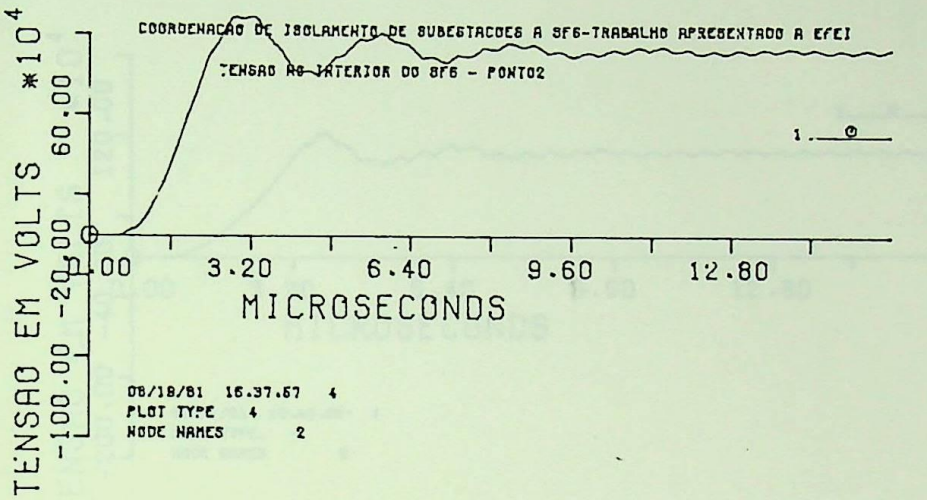
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

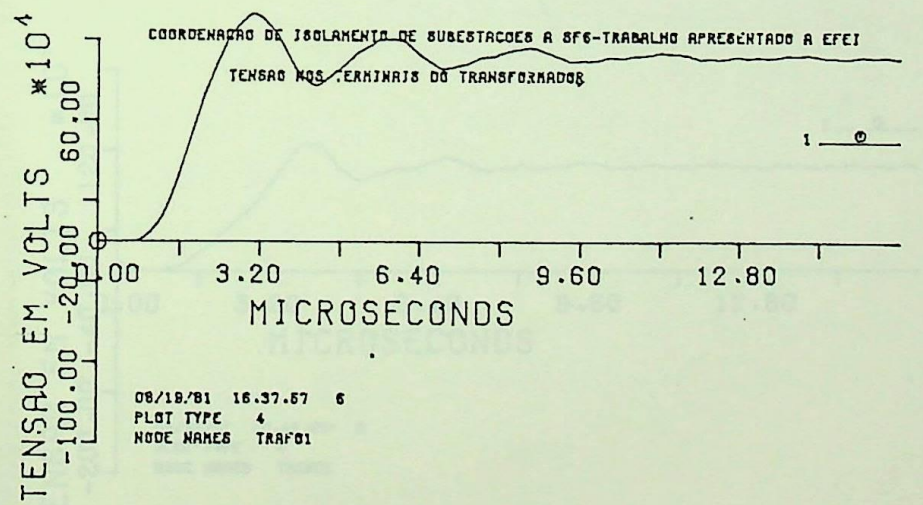
FIGURA 9.12 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 4 da Tabela 9.3 (Onda Incidente: 1500kV; 1200kV/µseg)



a)



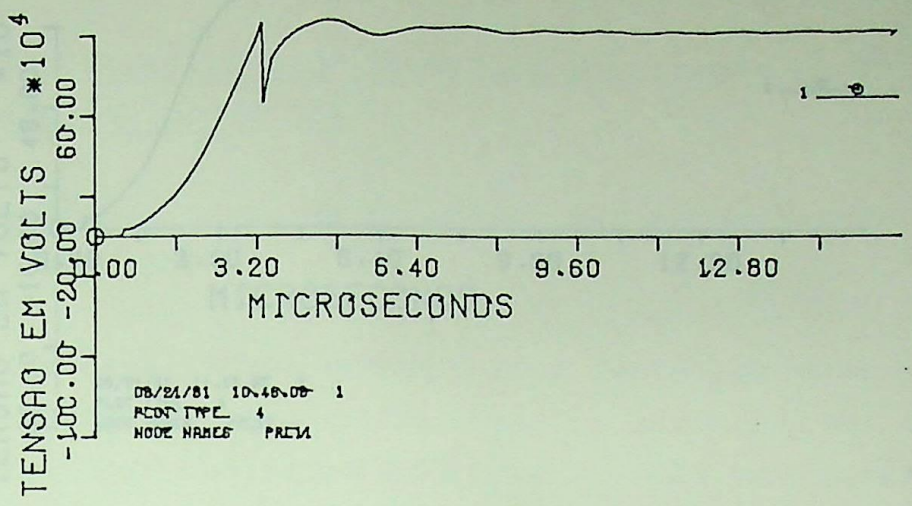
b)



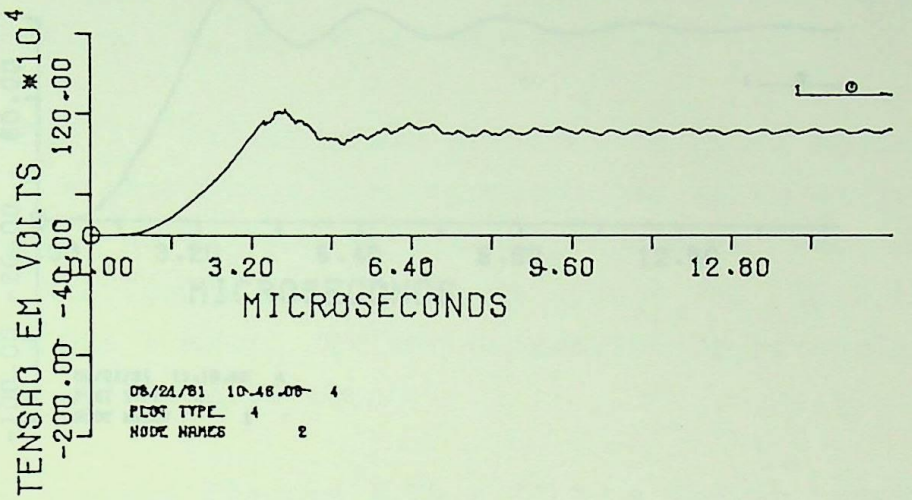
c)

a) bucha de entrada da linha
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

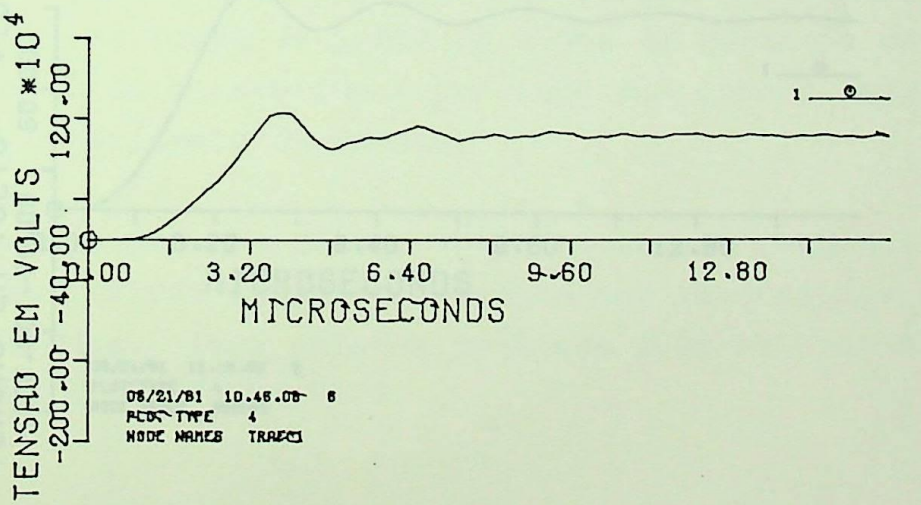
FIGURA 9.12 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 4 da Tabela 9.3 (Onda Incidente: 1500kV; 1200kV/µseg)



a)



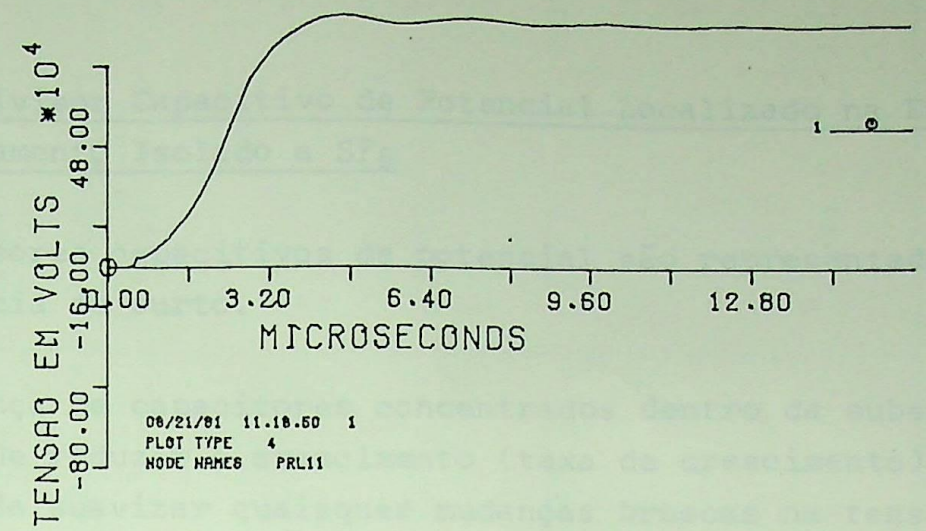
b)



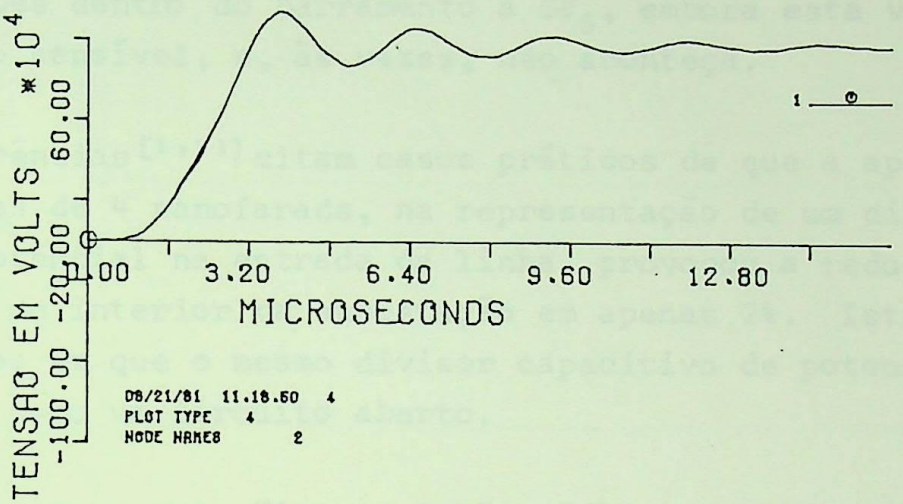
c)

a) terminais do pára-raios
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

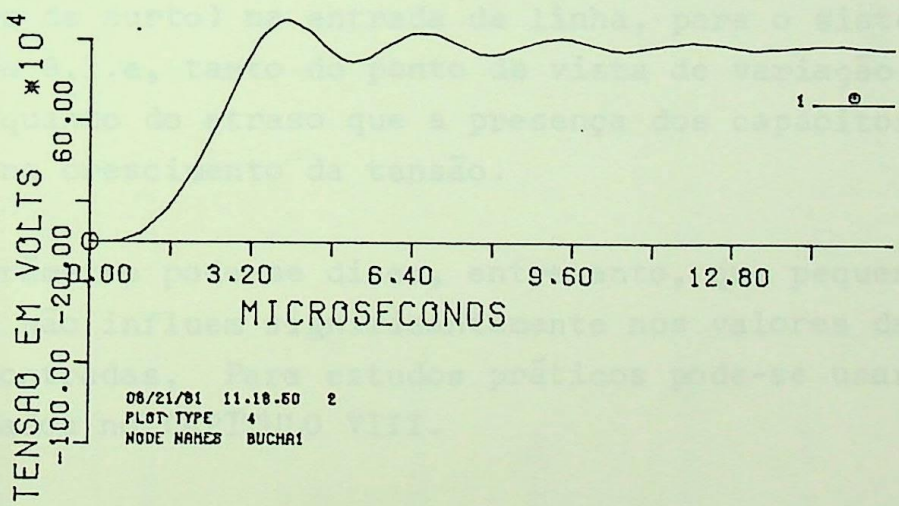
FIGURA 9.13 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 5 da Tabela 9.3 (Onda Incidente: 2500kV; 600kV/μseg)



a)



b)



c)

a) terminais do pára-raios
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) bucha de entrada da linha no SF_6

FIGURA 9.14 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 6 da Tabela 9.3 (Onda Incidente: 2500kV; 600kV/µseg)

9.5. Divisor Capacitivo de Potencial Localizado na Entrada do Barramento Isolado a SF_6

Os divisores capacitivos de potencial são representados por uma capacitância de surto.

A presença de capacitores concentrados dentro da subestação tem o efeito de reduzir o crescimento (taxa de crescimento) das sobretensões e de suavizar quaisquer mudanças bruscas na tensão [1,2].

Poderá haver tanto uma redução quanto um aumento do valor das sobretensões dentro do barramento a SF_6, embora esta variação não seja muito sensível, e, às vezes, não aconteça.

As referências [5,11] citam casos práticos de que a aplicação de capacitores de 4 nanofarads, na representação de um divisor capacitivo de potencial na entrada da linha, provocou a redução das sobretensões no interior da subestação em apenas 2%. Isto em relação aos casos em que o mesmo divisor capacitivo de potencial foi representado como um circuito aberto.

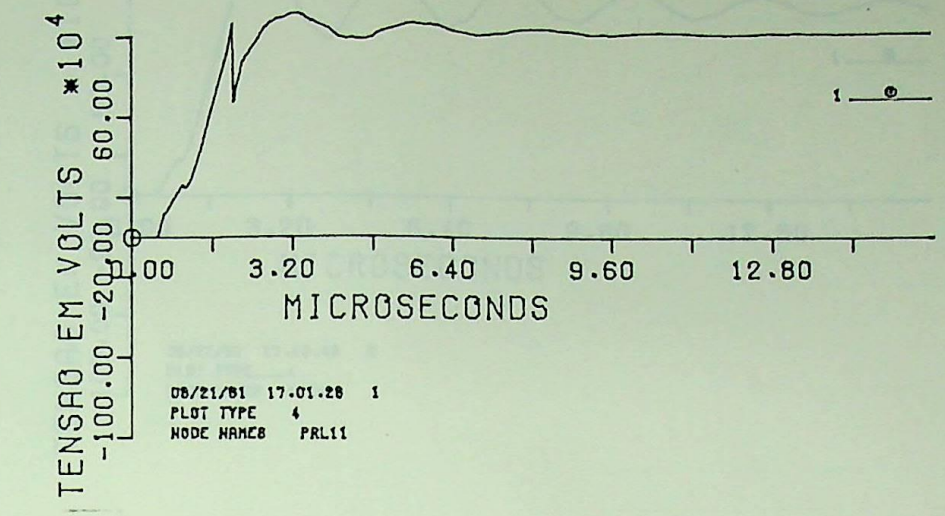
Na Tabela 9.4 e nas Figuras 9.15 a 9.18, a seguir, mostra-se o efeito da representação do divisor capacitivo de potencial (como um capacitor de surto) na entrada de linha, para o sistema mostrado na Figura 9.1.a, tanto do ponto de vista de variação das tensões máximas quanto do atraso que a presença dos capacitores de surto provoca no crescimento da tensão.

Deste parâmetro pode-se dizer, entretanto, que pequenas variações do mesmo não influem significantemente nos valores das sobretensões encontradas. Para estudos práticos pode-se usar os valores apresentados no CAPÍTULO VIII.

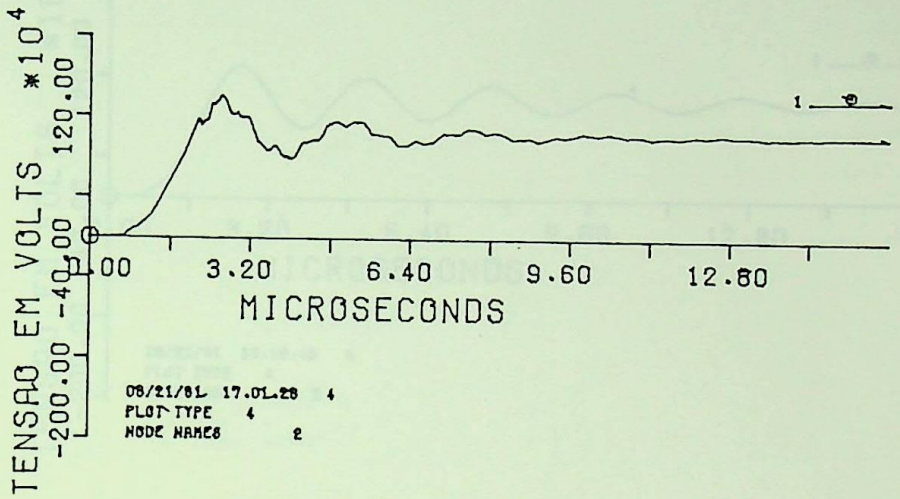
Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

CASO	PÁRA-RAIOS UTILIZADOS	CAPACITÂNCIA DO DCP (nF)	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO SF_6 (kV)					FIGURAS
			Entrada da Linha no SF_6	Interna ao SF_6 Ponto 1	Interna ao SF_6 Ponto 2	Interna ao SF_6 Ponto 3	Terminais do Transformador	
1	Convencional	5,0	1315	1343	1379	1421	1438	7.3
2	Óxido de Zinco	5,0	1213	1257	1302	1340	1376	7.4
3	Convencional	2,0	1294	1296	1361	1418	1424	9.15
4	Óxido de Zinco	2,0	1225	1267	1307	1350	1378	9.16
5	Convencional	0,0	1368	1401	1420	1431	1396	9.17
6	Óxido de Zinco	0,0	1235	1281	1321	1355	1383	9.18

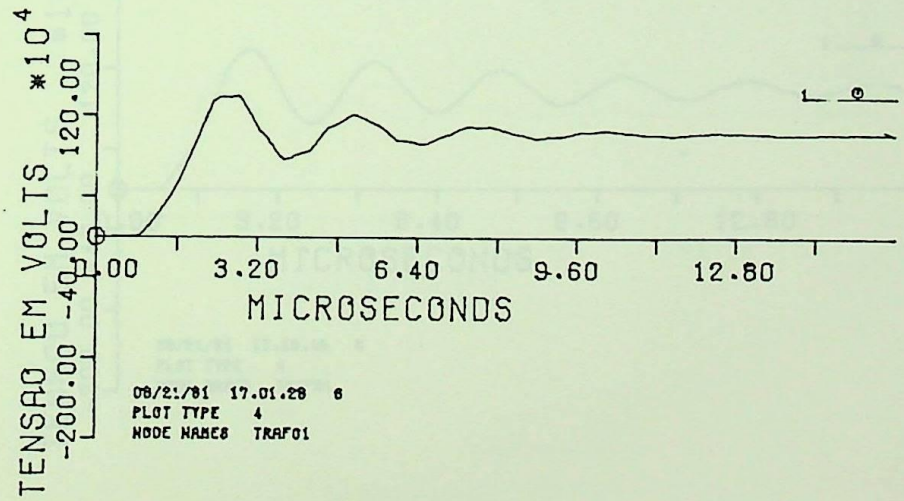
TABELA 9.4 - Valores de Sobretensões Máximas Encontradas ao Longo do Barramento Isolado a SF_6 Variando-se a Capacitância de Representação do DCP - Onda Incidente - Ver Item 5.2.1



a)



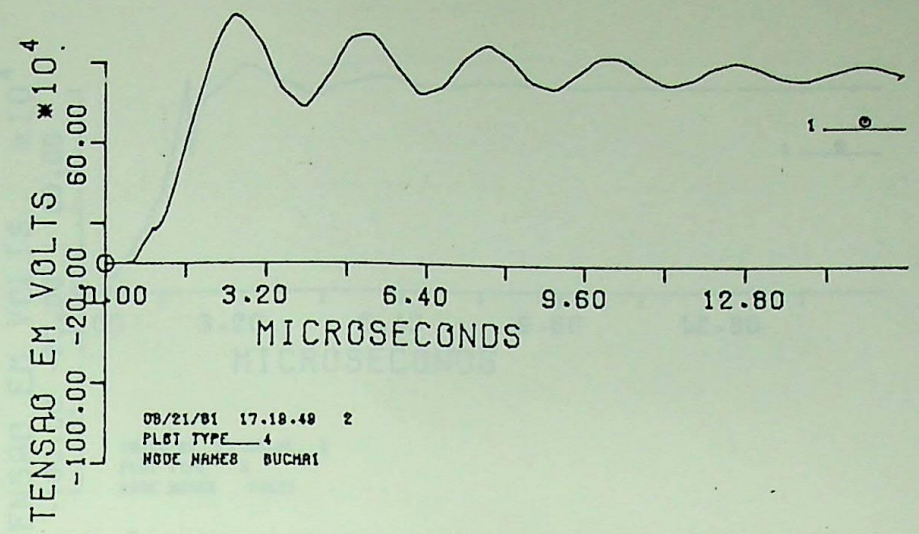
b)



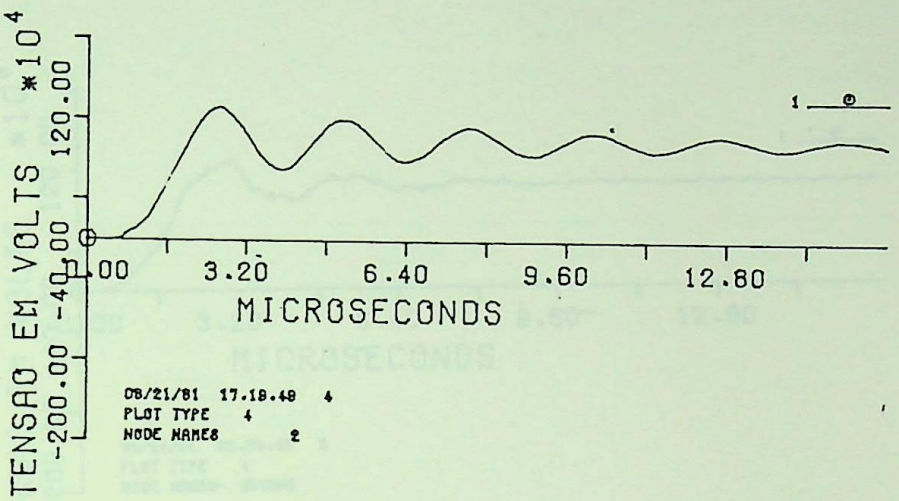
c)

a) terminais do pára-raios
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

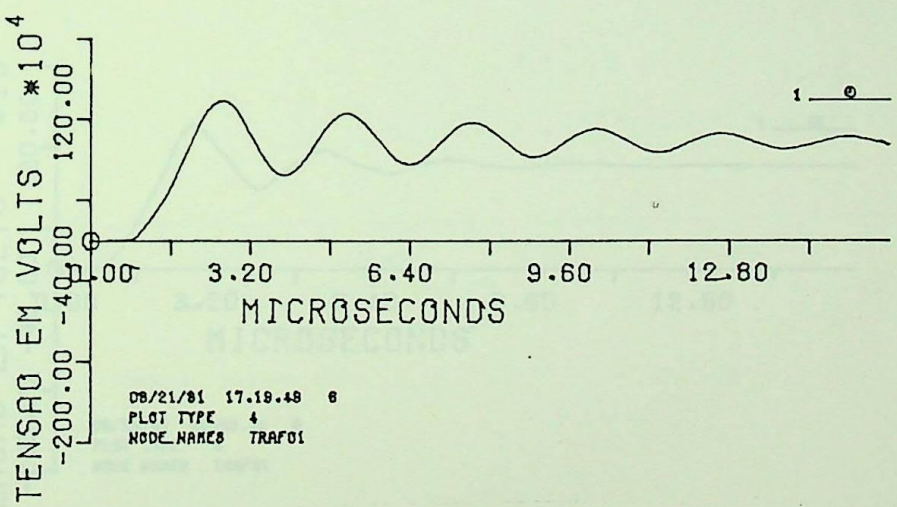
FIGURA 9.15 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 3 da Tabela 9.4 (Capacitância do DCP = 2,0 nF)



a)



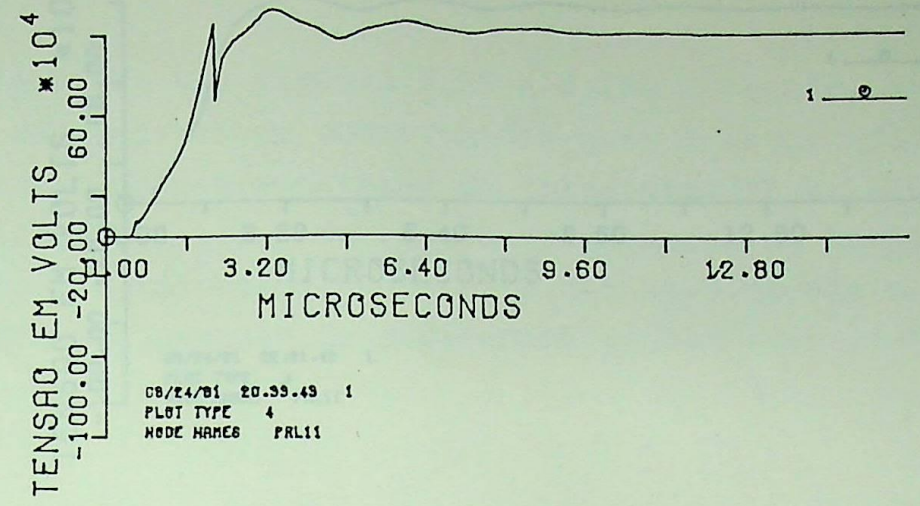
b)



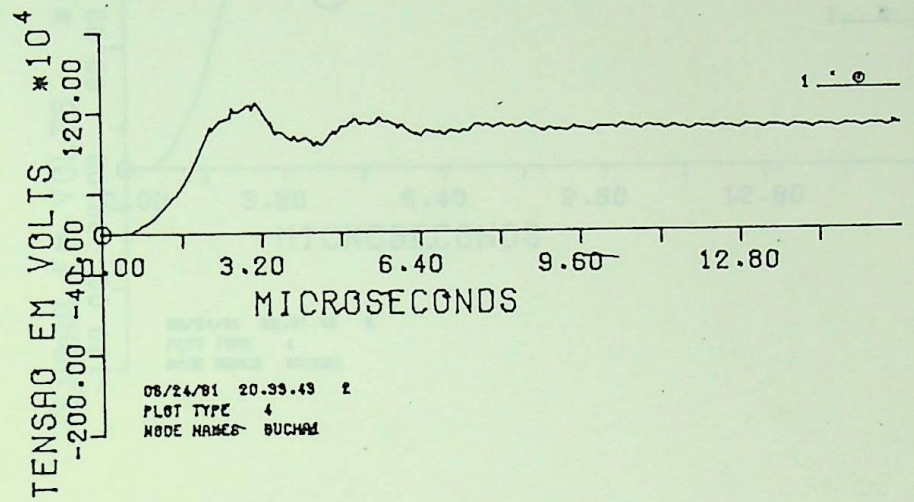
c)

a) bucha de entrada da linha no SF_6
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

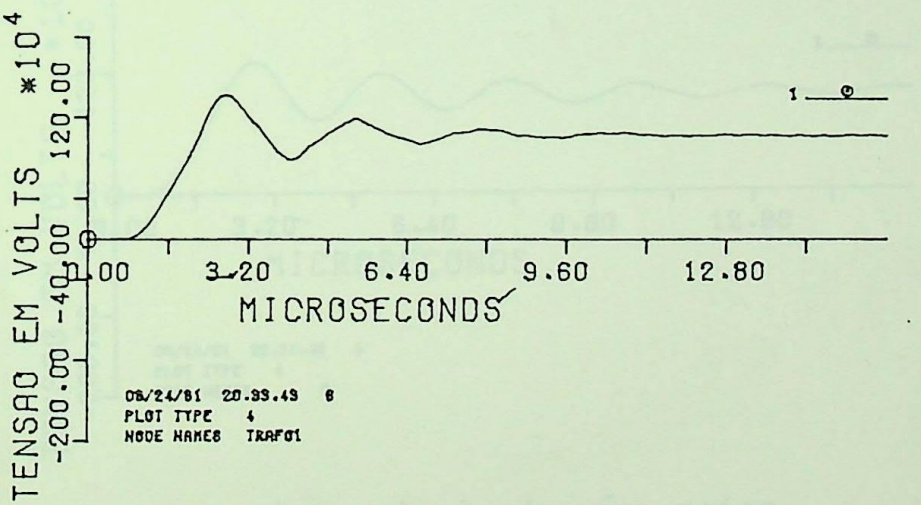
FIGURA 9.16 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 4 da Tabela 9.4 (Capacitância do DCP = 2,0 nF)



a)



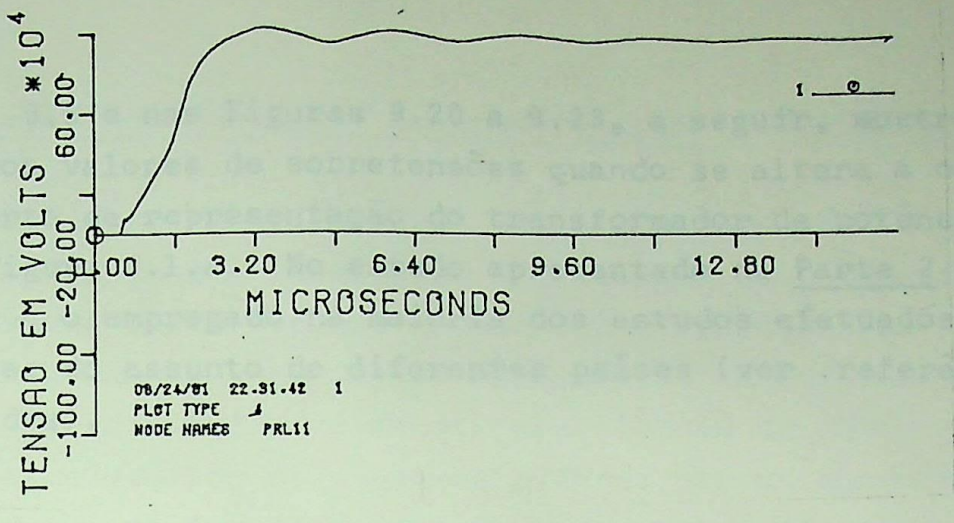
b)



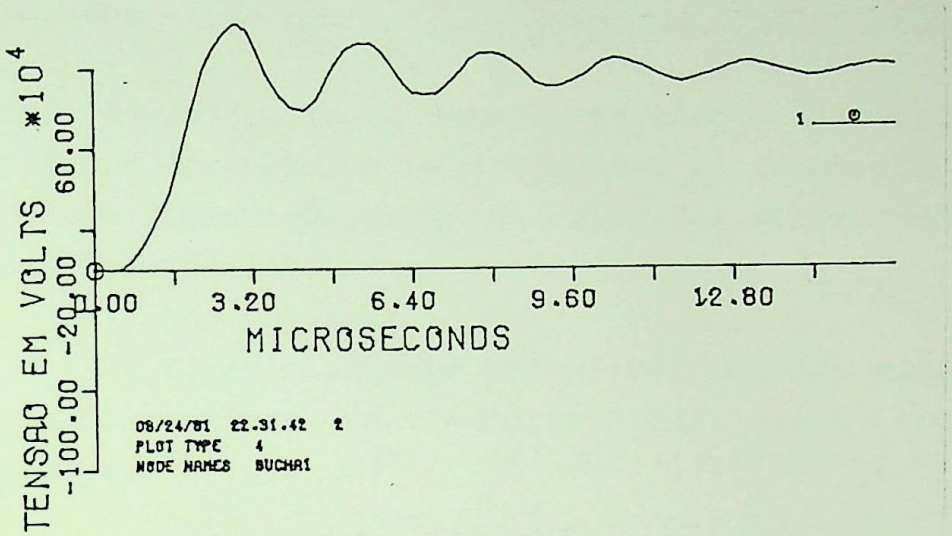
c)

a) terminais do pára-raios
b) bucha de entrada da linha no SF_6
c) terminais do transformador

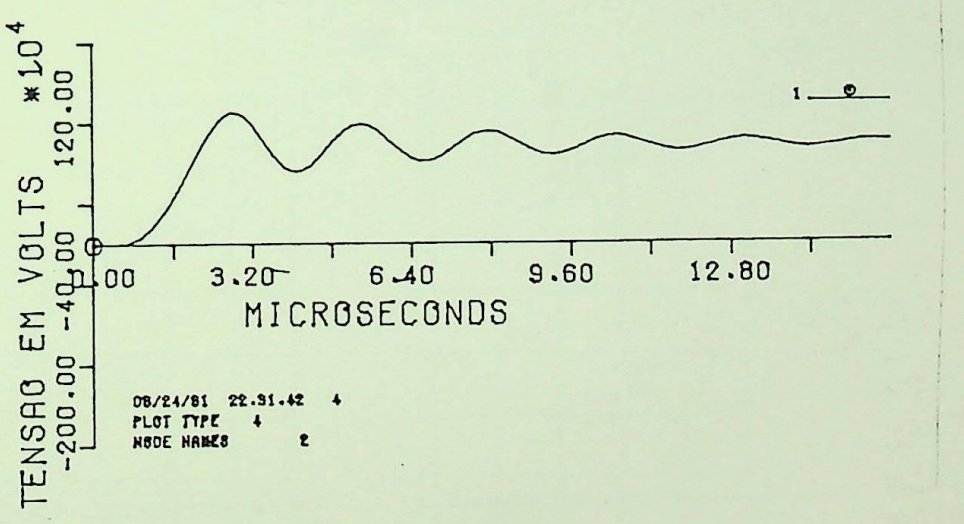
FIGURA 9.17 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 5 da Tabela 9.4 (Capacitância do DCP = 0,0 nF)



a)



b)



c)

a) terminais do pára-raios
b) bucha de entrada da linha no SF_6
c) interna ao barramento (ponto 2)

FIGURA 9.18 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6
Caso 6 da Tabela 9.4 (Capacitância do DCP = 0,0 nF)

Na Tabela 9.5 e nas Figuras 9.20 a 9.23, a seguir, mostra-se as variações dos valores de sobretensões quando se altera a capacitância de surto de representação do transformador de potência, no sistema da Figura 9.1.a. No estudo apresentado na Parte 2 o valor utilizado é o empregado na maioria dos estudos efetuados pelos especialistas do assunto de diferentes países (ver referências acima indicadas).

9.6. Capacitância de Surto do Transformador de Potência

A capacitância de surto, através da qual se representa o transformador de potência nos estudos de Coordenação de Isolamento, tem uma influência muito pequena no valor das sobretensões máximas que se encontram no interior do barramento. A referência [5] cita que quando se diminui o valor da capacitância de surto que representa o transformador de potência pode-se ter um aumento ou uma diminuição do valor das sobretensões máximas que se desenvolvem no interior da subestação.

Também a referência [5] cita um exemplo prático onde o emprego de uma capacitância de surto no valor de 4000 pF comparada com uma de 0 pF causou uma diminuição de 4% no valor das sobretensões máximas encontradas (Figura 9.19).

No CAPÍTULO VIII foram mostrados os valores padrões para este parâmetro, mas pode-se dizer, em termos práticos, que o valor mais comumente empregado é 4000 pF [5,11,12,13,14,16,27,38,42,43,45].

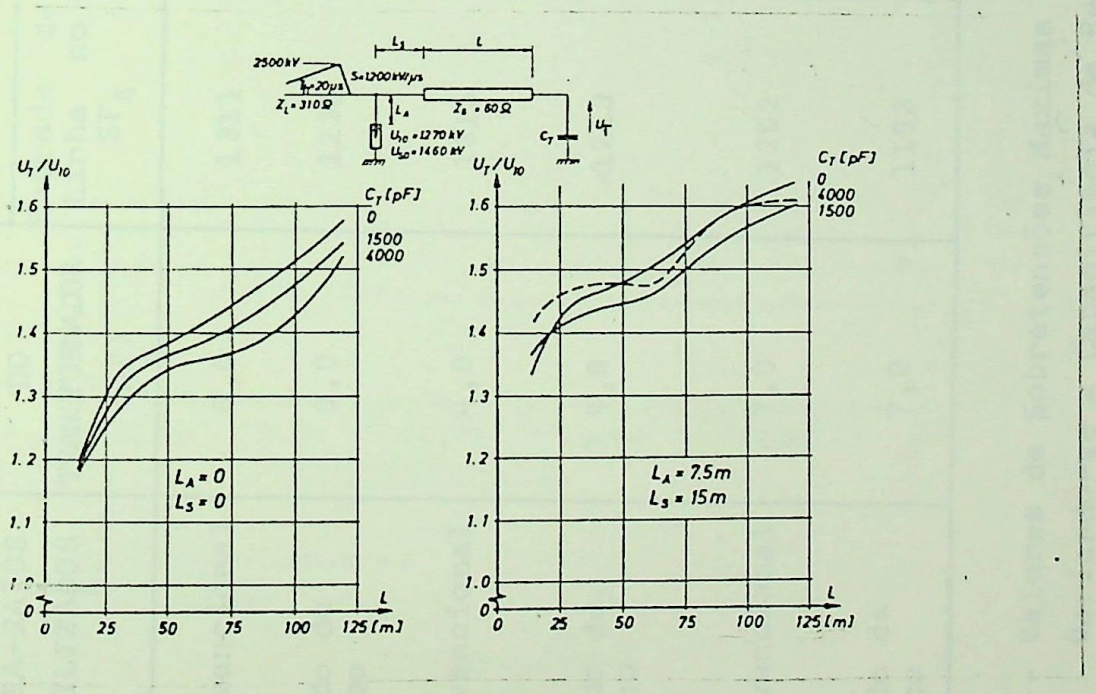
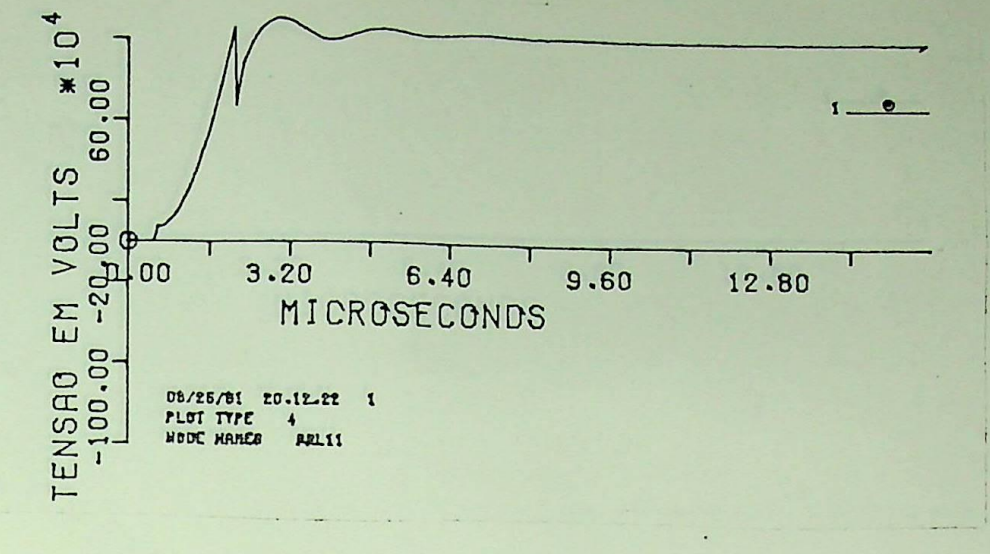


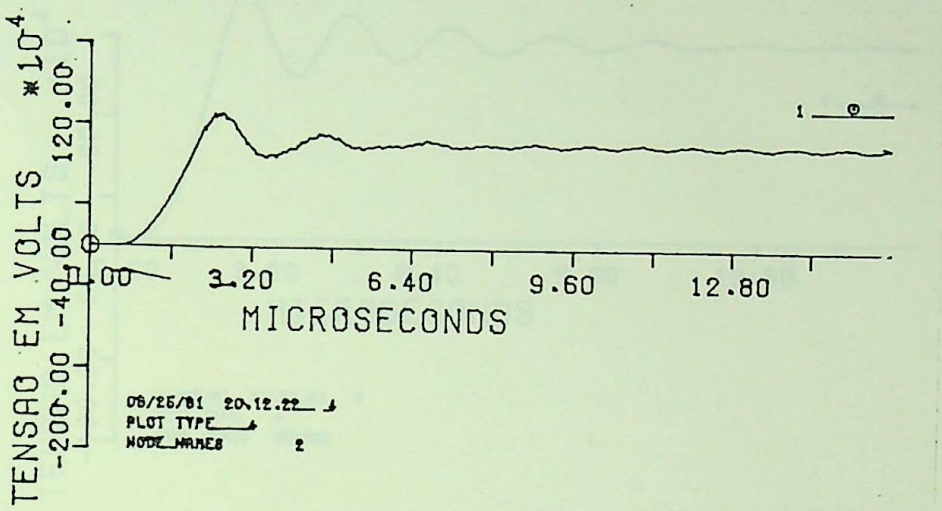
FIGURA 9.19 - Influência da Capacitância de Surto do Transformador na Tensão nos Terminais do Transformador de Potência; Tensão à Frequência Industrial = 0; Barramento Isolado a SF_6 na Tensão 765 kV [5]

CASO	PÁRA-RAIOS UTILIZADOS	CAPACITÂNCIA DO TRANSFORMADOR (nF)	VALORES MÁXIMOS DAS SOBRETENSÕES ENCONTRADAS NO SF_6 (kV)					FIGURAS
			Entrada da Linha no SF_6	Interna ao SF_6 Ponto 1	Interna ao SF_6 Ponto 2	Interna ao SF_6 Ponto 3	Terminais do Transformador	
1	Convencional	0,0	1311	1327	1318	1330	1336	9.20
2	Óxido de Zinco	0,0	1230	1252	1265	1275	1278	9.21
3	Convencional	4,0	1315	1343	1379	1421	1438	7.3
4	Óxido de Zinco	4,0	1213	1257	1302	1340	1376	7.4
5	Convencional	7,0	1262	1302	1340	1394	1435	9.22
6	Óxido de Zinco	7,0	1193	1244	1290	1336	1382	9.23

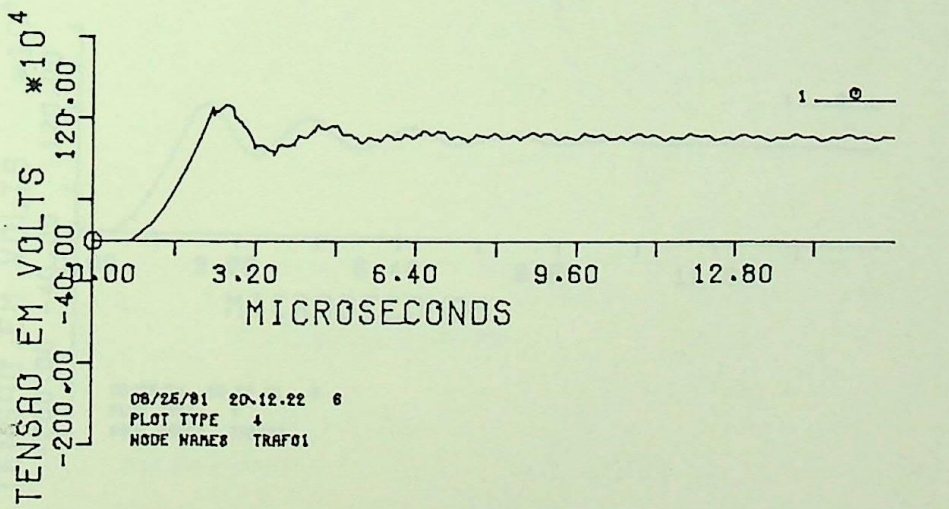
TABELA 9.5 - Valores de Sobretensões Máximas Encontradas ao Longo do Barramento Isolado a SF_6 Variando-se a Capacitância de Representação do Transformador - Onda Incidente - Ver Item 5.2.1



a)



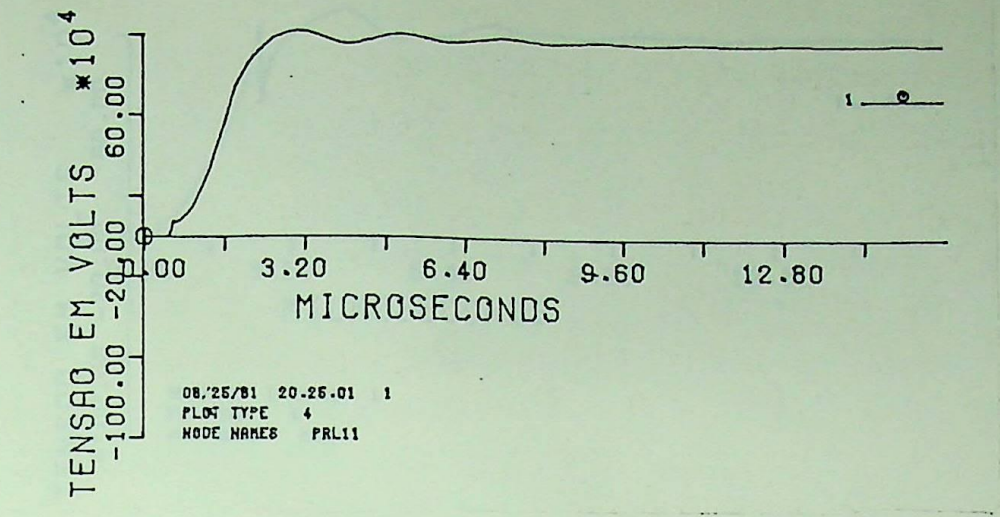
b)



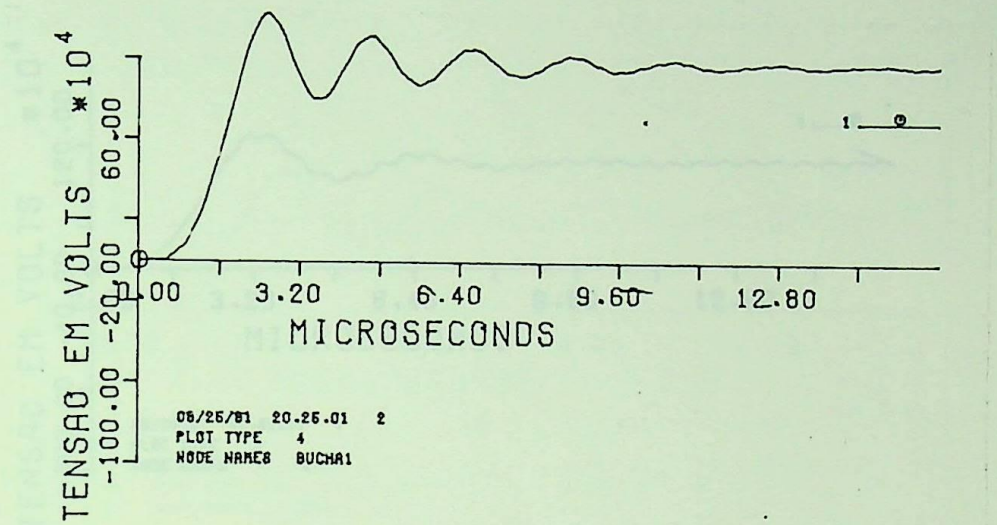
c)

a) terminais do pára-raios
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

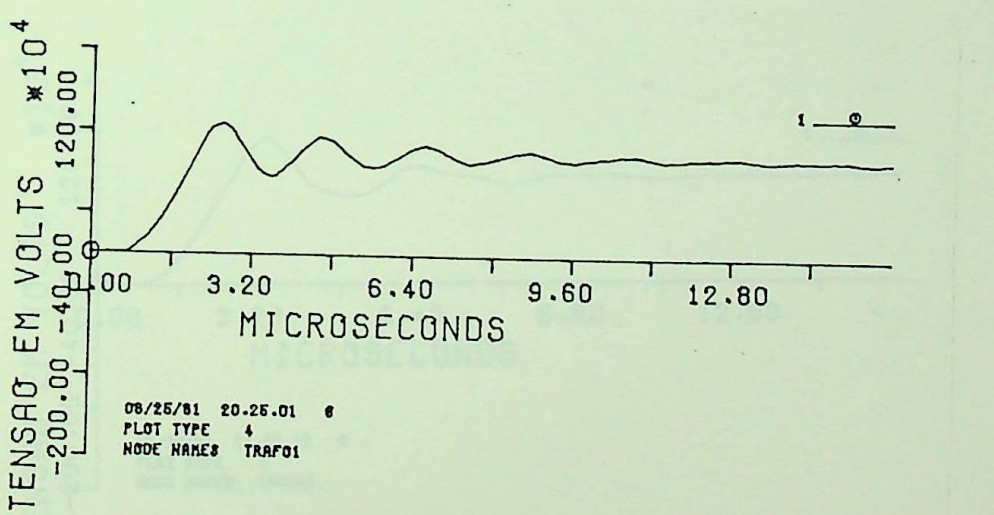
FIGURA 9.20 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 1 da Tabela 9.5 (Capacitância do Trafo = 0,0 nF)



a)



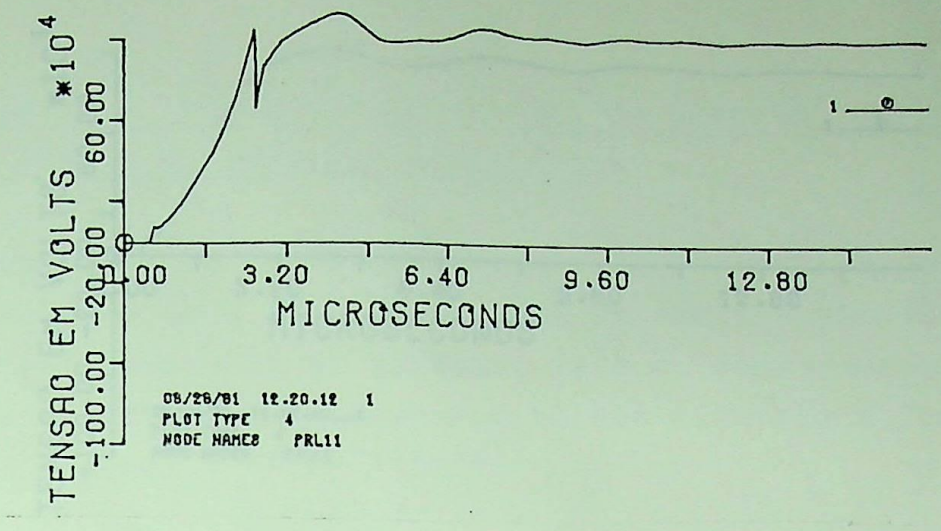
b)



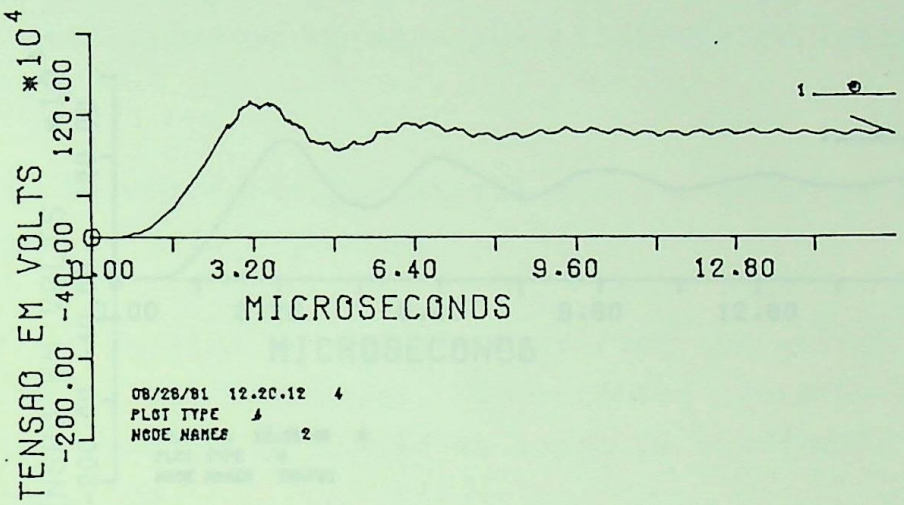
c)

a) terminais do pára-raios
b) bucha de entrada da linha no SF_6
c) terminais do transformador

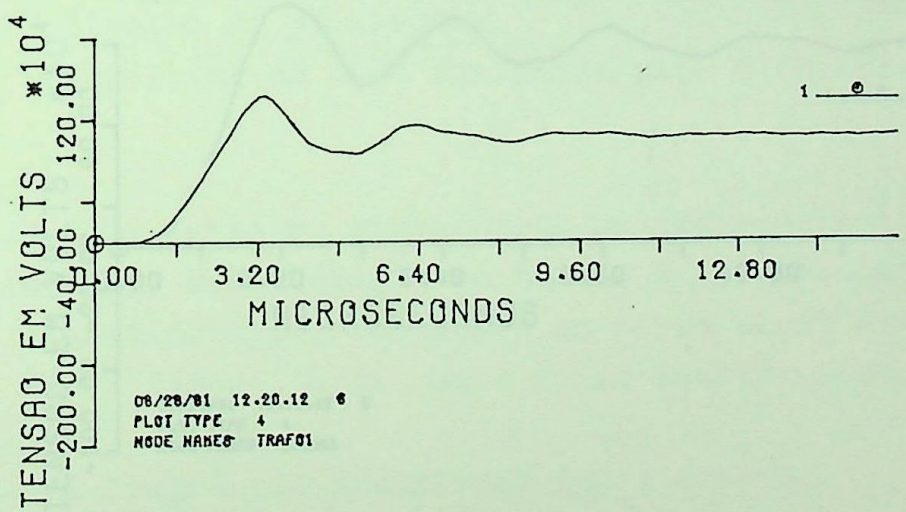
FIGURA 9.21 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 2 da Tabela 9.5 (Capacitância do Trafo = 0,0 nF)



a)



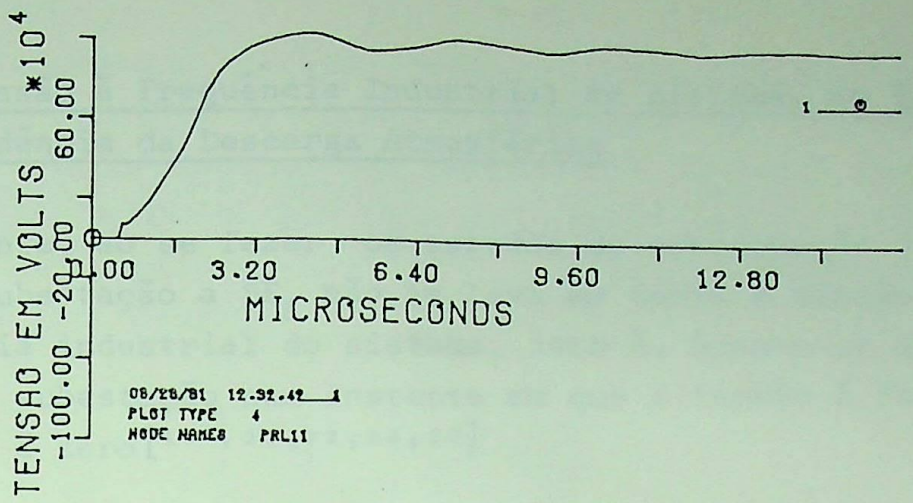
b)



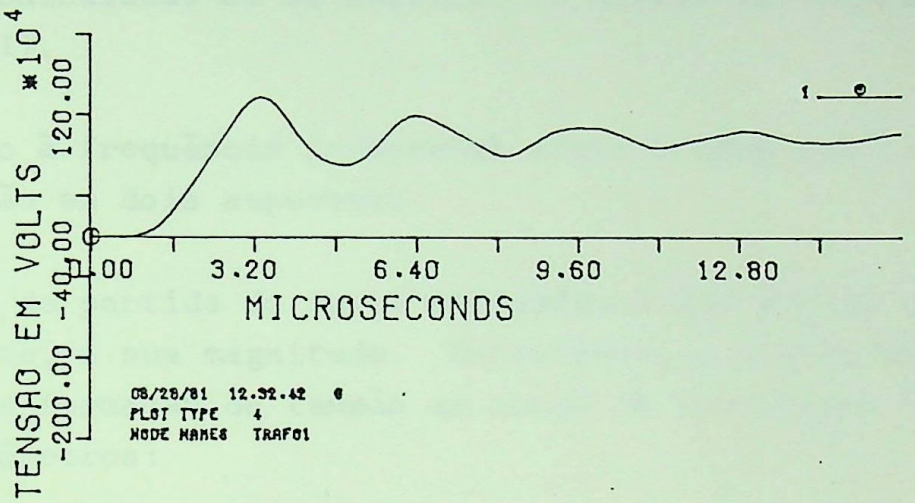
c)

a) terminais do pára-raios
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

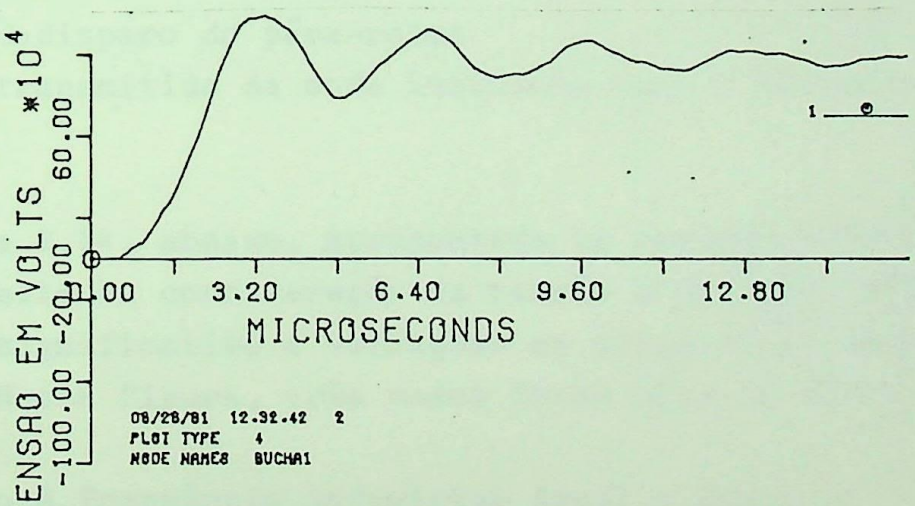
FIGURA 9.22 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 5 da Tabela 9.5 (Capacitância do Trafo = 7,0 nF)



a)



b)



c)

a) terminais do pára-raios
b) terminais do transformador
c) bucha de entrada da linha no SF_6

FIGURA 9.23 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 6 da Tabela 9.5 (Capacitância do Trafo = 7,0 nF)

9.7. Tensão à Frequência Industrial do Sistema, no Instante de Incidência da Descarga Atmosférica

Normalmente, ao se fazer os estudos de coordenação de isolamento de uma subestação a SF_6 não se leva em conta a tensão nominal de frequência industrial do sistema, isto é, assume-se que o surto penetra na subestação num instante em que a tensão à frequência industrial é zero [13, 21, 22, 26, 27]

A não consideração da tensão à frequência industrial é coberta pelas margens de segurança que se adota em relação às máximas sobretensões calculadas ao se escolher os níveis de isolamento (ver CAPÍTULO VI).

A tensão à frequência industrial afeta a onda que incide sobre a subestação em dois aspectos.

A tensão de partida do surto atmosférico que atinge a linha e, naturalmente, a sua magnitude. Entretanto, o efeito destes dois aspectos na formação da tensão ao longo da subestação depende de vários parâmetros:

- comprimento da subestação
- tensão de disparo do pára-raios
- parte transmitida da onda incidente para o interior da subestação

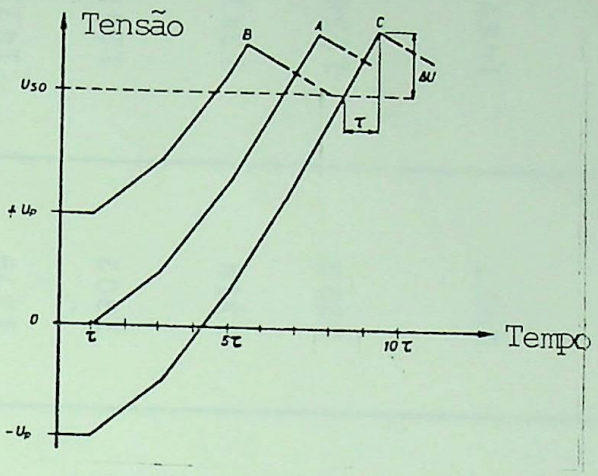
Na Figura 9.24, abaixo, apresentada na referência [13], mostra-se que o efeito da consideração da tensão à frequência industrial não é muito significativo e variações em torno de 5% deverão ser esperadas. Nesta Figura, três casos foram considerados:

a) Tensão à frequência industrial igual a zero,

b) Tensão à frequência industrial no máximo positivo,

c) Tensão à frequência industrial no máximo negativo.

Em um outro estudo prático, desta natureza, de que temos conhecimento [45], o efeito da tensão a 60 Hz foi considerado, para verificação, e se confirmou que as sobretensões encontradas não variaram mais que 5%, conforme previsto na referência [13]. Outros estudos práticos não consideraram [38,43], seguindo o estabelecido, em maioria, pela literatura.



U_{so} - tensão de disparo do pára-raios para surtos atmosféricos

U_p - valor de pico da tensão à frequência industrial

τ - tempo de tráfego no SF_6

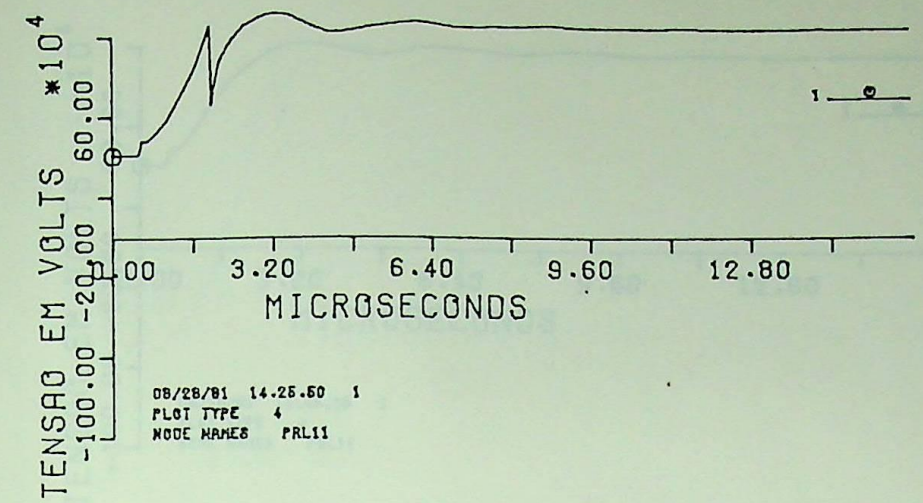
FIGURA 9.24 - Sobretensões Encontradas no Terminal Aberto de uma Subestação Isolada a SF_6, para Diferentes Valores da Tensão à Frequência Industrial [13]

Na Tabela 9.6 e nas Figuras 9.25 a 9.28, a seguir, pretende-se mostrar, através de simulações efetuadas, para confirmação do exposto anteriormente, o efeito de consideração da tensão à 60 Hz, para o sistema da Figura 9.1.a.

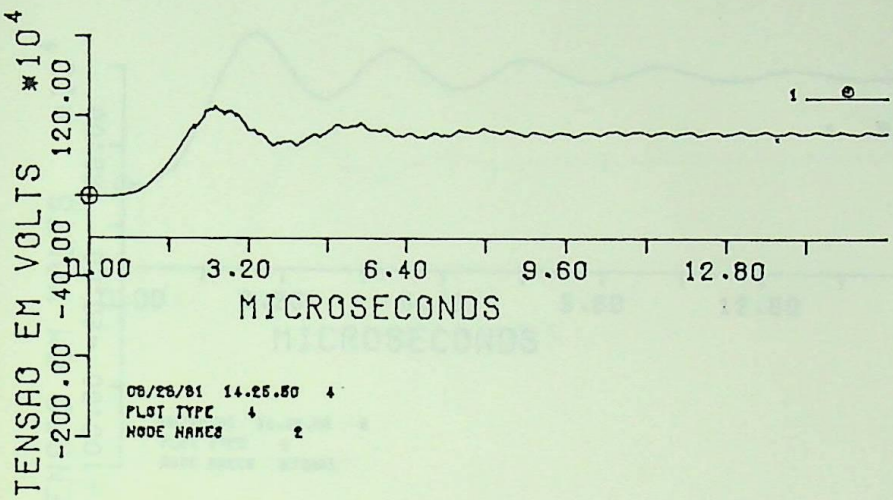
Sobre o assunto, podemos ainda dizer que poderá ser tomada como medida de segurança a repetição das simulações onde se encontram as maiores sobretensões, considerando-se nestas repetições o efeito da tensão a 60 Hz. Isto deverá ser feito sempre que o responsável pelo estudo achar necessário.

CASO	PÁRA-RAIOS UTILIZADOS	TENSÃO DO SISTEMA (kV-ØN)	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO BARRAMENTO SF_6 (kV)					FIGURAS
			Entrada da Linha no SF_6	Interna ao SF_6 Ponto 1	Interna ao SF_6 Ponto 2	Interna ao SF_6 Ponto 3	Terminais do transformador	
1	Convencional	0	1315	1343	1379	1421	1438	7.3
2	Óxido de Zinco	0	1215	1257	1302	1340	1376	7.4
3	Convencional	$+500\sqrt{2}/\sqrt{3}$	1279	1293	1314	1341	1343	9.25
4	Óxido de Zinco	$+500\sqrt{2}/\sqrt{3}$	1180	1202	1223	1238	1258	9.26
5	Convencional	$-500\sqrt{2}/\sqrt{3}$	1333	1379	1417	1467	1476	9.27
6	Óxido de Zinco	$-500\sqrt{2}/\sqrt{3}$	1226	1283	1333	1382	1423	9.28

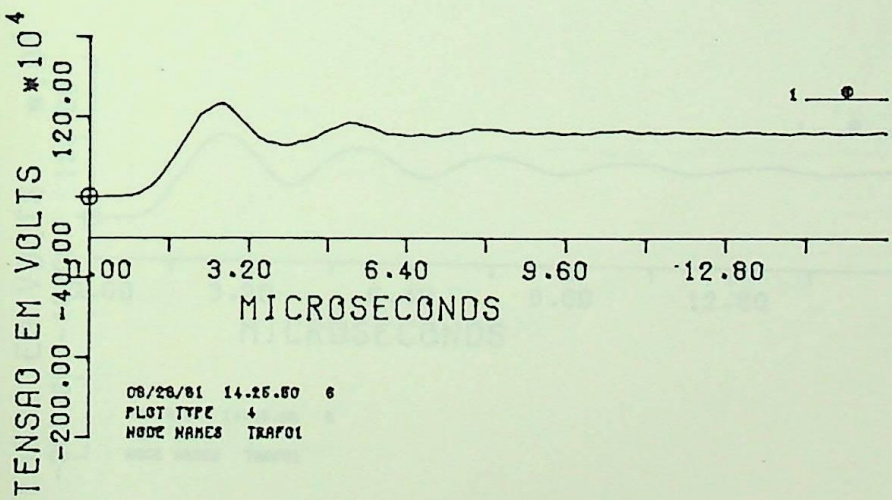
TABELA 9.6 - Valores de Sobretensões Máximas Encontradas ao Longo do Barramento Isolado a SF_6 Variando-se a Tensão do Sistema no Momento da Incidência do Surto Atmosférico - Onda Incidente - Ver Item 5.2.1



a)



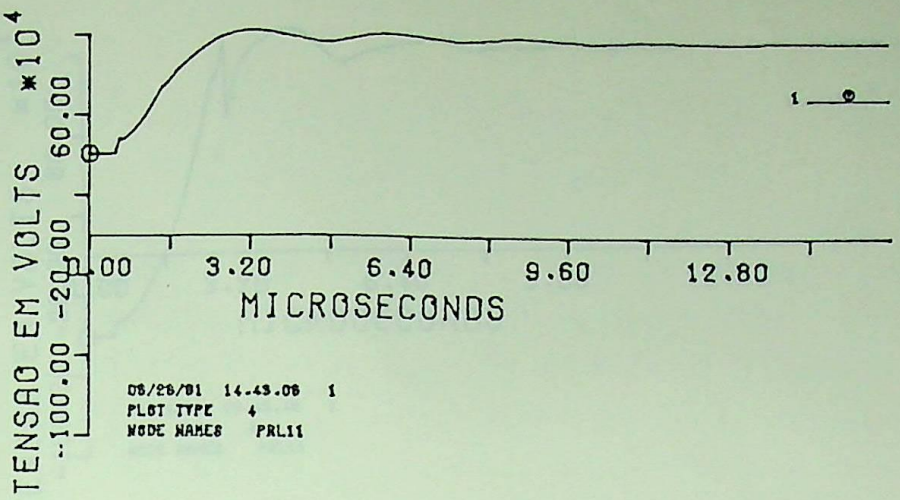
b)



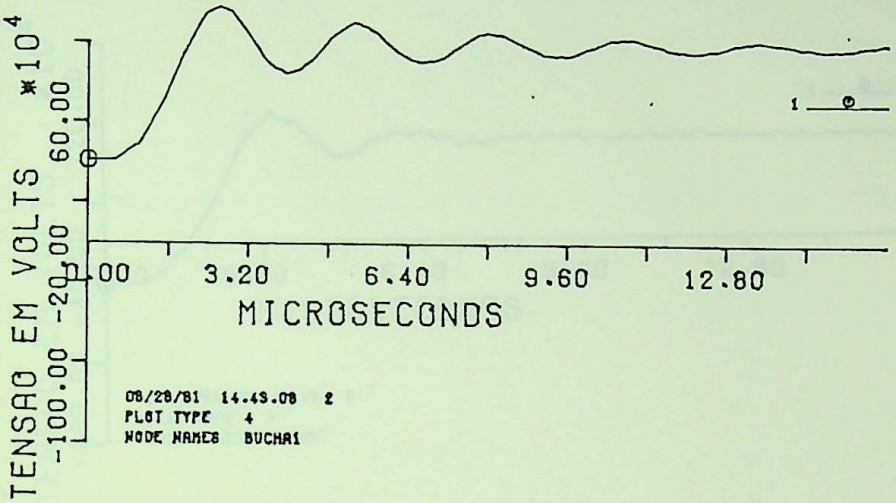
c)

a) terminais do pára-raios
b) interna ao barramento (ponto 2)
c) terminais do transformador

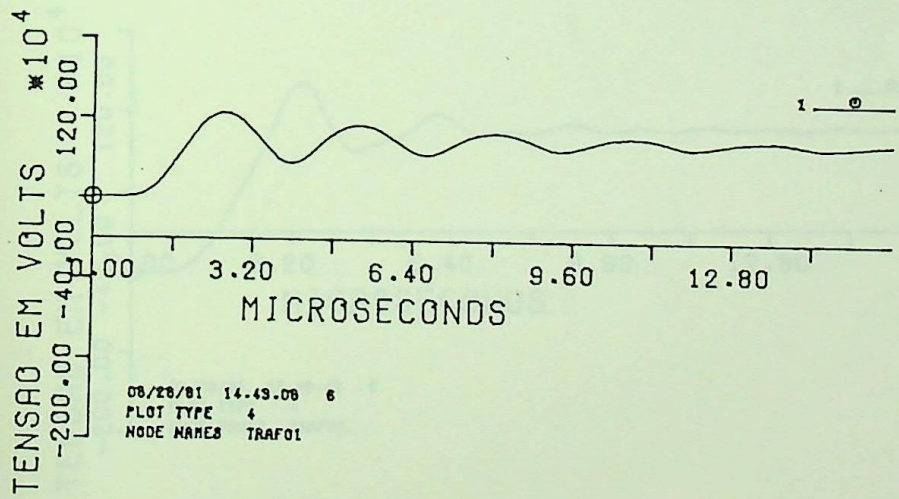
IGURA 9.25 - Sobretensões ao Longo do Barramento a SF_6:
Caso 3 da Tabela 9.6 (Tensão do Sistema = $+500/\sqrt{3}$ kV)



a)



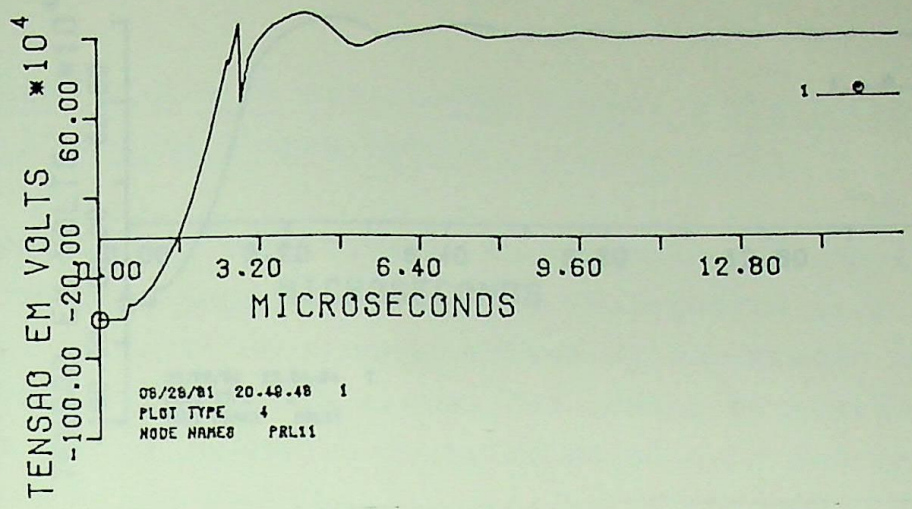
b)



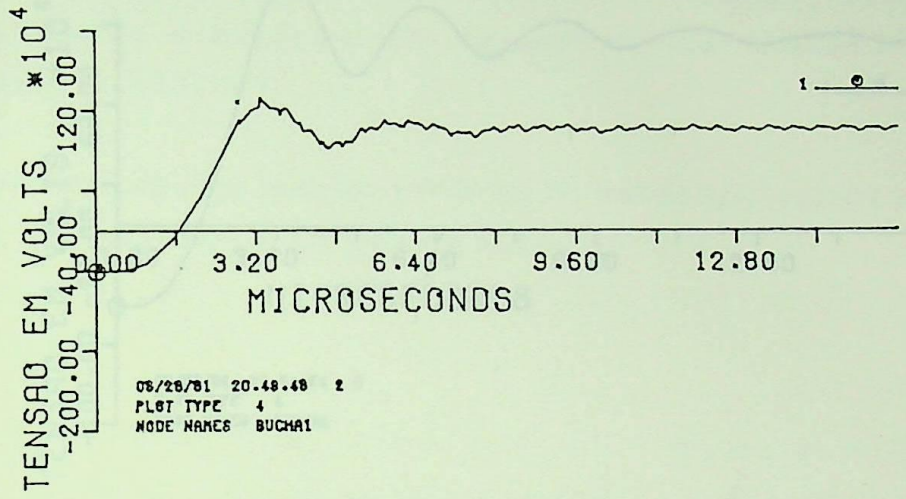
c)

a) terminais do pára-raios
b) bucha de entrada da linha do SF_6
c) terminais do transformador

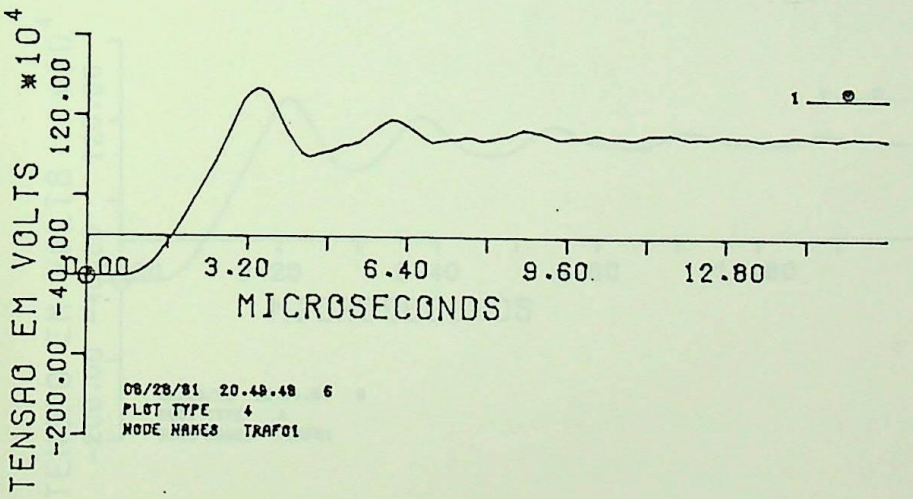
FIGURA 9.26 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6
Caso 4 da Tabela 9.6 (Tensão do Sistema = $+500/\sqrt{3}$ kV)



a)



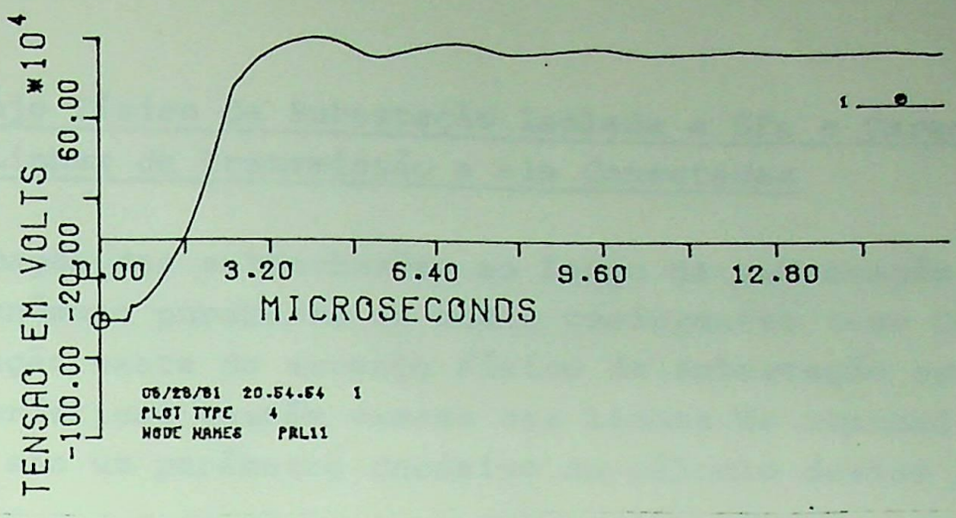
b)



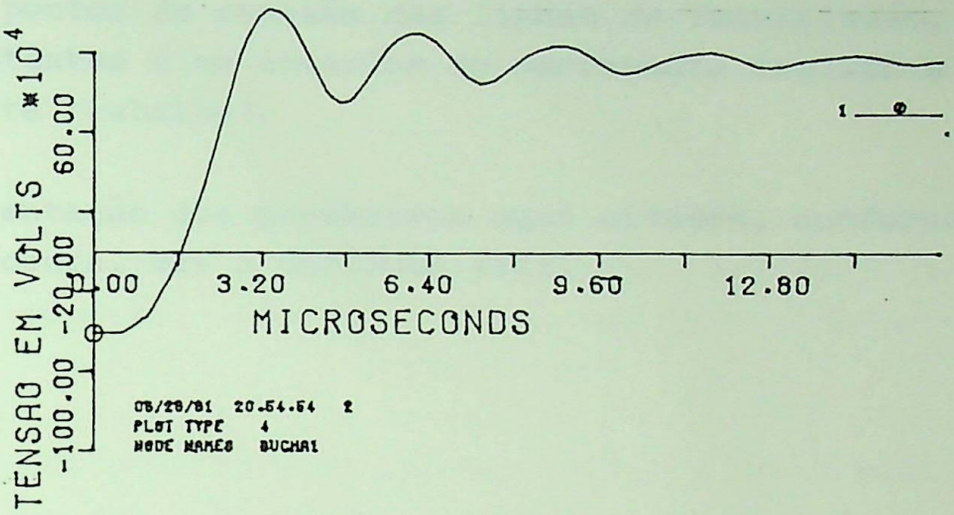
c)

a) terminais do pára-raios
b) bucha de entrada da linha no SF_6
c) terminais do transformador

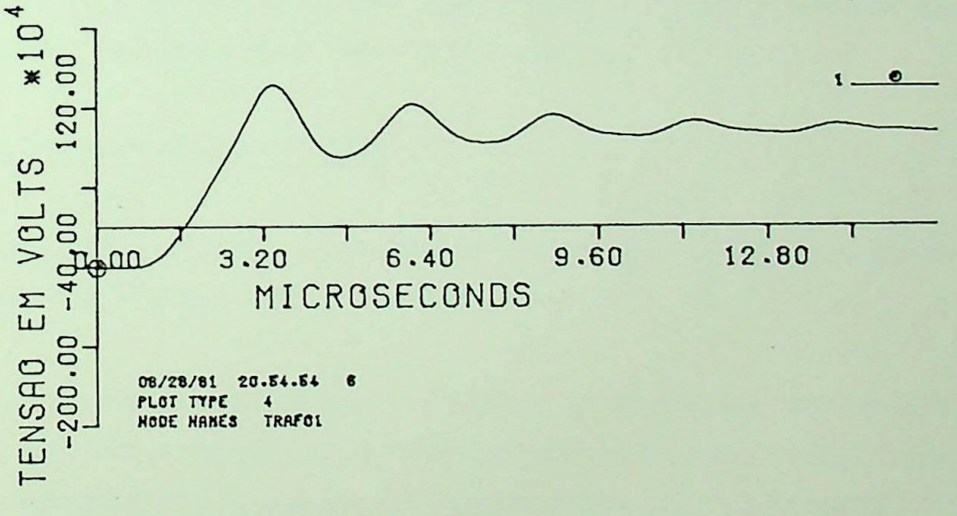
FIGURA 9.27 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 5 da Tabela 9.6 (Tensão do Sistema = $-500/\sqrt{3}$ kV)



a)



b)



c)

a) terminais do pára-raios
b) bucha de entrada da linha no SF_6
c) terminais do transformador

FIGURA 9.28 - Sobretensões ao Longo do Barramento Isolado a SF_6: Caso 6 da Tabela 9.6 (Tensão do Sistema = $-500/\sqrt{3}$ kV)

9.7. Arranjo Físico da Subestação Isolada a SF_6 e Características das Linhas de Transmissão a ela Conectadas

Como a formação das sobretensões ao longo da subestação isolada a SF_6 é um fenômeno puramente de ondas trafegantes (ver CAPÍTULO III), a consideração exata do arranjo físico da subestação estudada e das características também exatas das linhas de transmissão a ela conectadas são um parâmetro decisivo no cálculo destas sobretensões.

Desta forma, deve-se conhecer todas as distâncias físicas entre os diferentes pontos de conexão das linhas de transmissão, dos equipamentos existentes e no interior do barramento isolado a SF_6 (veja Parte 2 deste trabalho).

Para representação dos parâmetros aqui citados, conforme devem ser levados em conta, ver o CAPÍTULO VIII.

CAPÍTULO X

10.1. Regras Básicas Recomendáveis para a Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6

Numa subestação convencional a coordenação de isolamento é, normalmente, efetuada através da instalação de pára-raios próximos aos equipamentos importantes, tais como transformadores, reatores, etc. Protetores adicionais são instalados, algumas vezes, na entrada de linhas (no Brasil, em sistemas de A.T. sempre se tem pára-raios na entrada de linha, mas na Europa, Canadá e Estados Unidos nem sempre).

Em subestações a SF_6, os protetores são primeiramente instalados na entrada de linha e como proteção suplementar em pontos estratégicos da subestação, como por exemplo nas proximidades de transformadores.

Isto é motivado pelo fato de que uma descarga no interior de um barramento isolado a SF_6 é mais problemática do que numa convencional. Devido ao fato de ser a impedância de surto consideravelmente menor no SF_6, os pára-raios protegem uma distância maior, se comparados com subestações convencionais.

10.2. Seleção dos Pára-raios

A seleção dos pára-raios é feita estudando-se as sobretensões temporárias (ver CAPÍTULO II).

Não é objetivo deste trabalho estudar a escolha do valor nominal do pára-raios (isto terá sido feito em estudos anteriores ao do tipo que aqui se trata, quando da definição do sistema).

Neste estudo, de coordenação de isolamento, estuda-se a melhor localização do pára-raios e o tipo (se externo ou blindado, ou encapsulado) em relação ao barramento a SF_6.

A solução mais econômica é aquela em que se adota pára-raios externos do tipo convencional, localizados na entrada de linha. Um estudo de sobretensões atmosféricas irá determinar se esta solução mais econômica protege convenientemente o barramento a SF_6, assim como os demais equipamentos, ou se pára-raios blindados, ou encapsulados serão necessários, ou, na pior hipótese, se um aumento de isolamento teria que ser adotado.

As vantagens técnicas de um pára-raios do tipo blindado, ou encapsulado seria:

- Liberdade de se localizar os pára-raios no melhor ponto dentro do barramento a SF_6, do ponto de vista de proteção.

- Não existem "leads" de conecção entre o pára-raios e a terra e os condutores.

- Os pára-raios blindados, ou encapsulados, possuem melhores condições ambiente que os pára-raios convencionais que poderão ser afetados pela poluição (as tensões de disparo se alteram com poluição).

10.3. Localização dos Pára-raios para Proteção de uma Subestação Isolada a SF_6

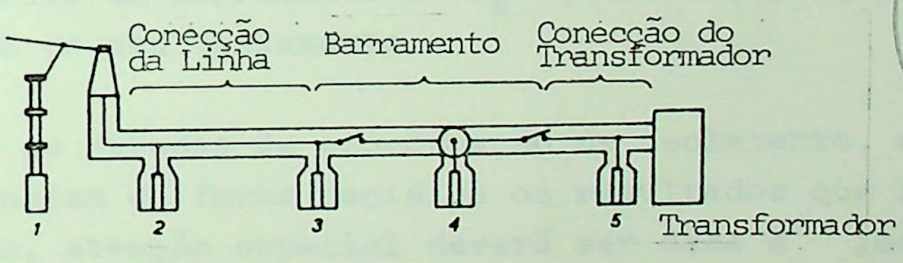
Conforme já mencionado, anteriormente, a primeira e mais simples solução a ser adotada é a utilização de pára-raios do tipo convencional ou óxido de zinco externos ao barramento isolado a SF_6, na entrada de linha (localização 1, da Figura 10.1).

Esta solução deverá ser adequada na maioria dos casos. Em algumas situações, especialmente em sistema E.A.T., não será possível proteger todo o barramento a SF_6 com um único pára-raios na entrada de linha, uma vez que o comprimento da subestação (distância entre a bucha de entrada e o ponto de reflexão mais distante) seja muito longa de forma que ocorram valores elevados de sobretensões. Então, quando a localização 1 for insuficiente, o próximo passo é

utilizar pára-raios blindados (ou encapsulados) no ponto 2. Haverá uma certa distância entre a bucha de entrada e a primeira chave seccionadora. Algumas vezes poderá ser conveniente colocar o pára-raios na posição 3 ao invés da posição 2, desde que esta última posição não reduza as sobretensões a valores adequados.

Será sempre necessário ter pára-raios em 1, 2 ou 3 para proteção da entrada de linha quando a chave secionadora estiver aberta. Para subestações muito longas (em E.A.T) um único pára-raios poderá não ser suficiente para proteger toda a subestação.

Neste caso, será necessário instalar-se outro pára-raios, usualmente em 4 ou 5. Com respeito à proteção do transformador a posição 5 é, a princípio, a melhor escolha embora a posição 4 possa também ser utilizada. O pára-raios da posição 5 poderá ser do tipo convencional desde que a ligação entre o barramento a SF_6 e o transformador seja aérea. Somente, em casos muito raros, com barramentos a SF_6 muito longos e ligações entre este barramento e o transformador também muito longas será necessários se ter os pára-raios nas locações 4 e 5, simultaneamente.



Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

FIGURA 10.1 - Possíveis Localizações dos Pára-raios para Proteção de Barramentos Isolados a SF_6 [5]

CAPÍTULO XI

11.1. Conclusões (Parte 1)

- A coordenação de isolamento de subestações isoladas a SF_6 deverá ser feita com um estudo detalhado das sobretensões atmosféricas. As sobretensões do tipo temporário terão definido as características nominais dos pára-raios, em estudos anteriores. Quanto às sobretensões do tipo de manobra, a subestação a SF_6, estará bem protegida contra as mesmas, desde que protegida adequadamente contra as de origem atmosféricas.

- O estudo do desempenho das subestações isoladas à SF_6 deverá ser feito por simulações em computadores digitais.

A ferramenta básica para este tipo de estudo é um bom programa de transitórios que permita representar os elementos do sistema conforme descrição feita no CAPÍTULO VIII.

- Todas as possíveis configurações, nas quais a subestação que se está estudando vier a operar, deverão ser analisadas, de forma a se caracterizar, realmente, as maiores sobretensões que poderão ocorrer no interior do barramento a SF_6 e, desta forma, se fazer a escolha adequada do seu isolamento.

- Ao se efetuar os estudos de coordenação de isolamento, alguns parâmetros influenciam de forma decisiva os resultados que se obterá. Desta forma, atenção especial deverá ser dada a localização dos pára-raios, comprimento das ligações dos pára-raios às fases, amplitude e taxa de crescimento das ondas de tensão que incidem na subestação isolada a SF_6, arranjo físico da subestação e características das linhas de transmissão a elas conectadas. A representação dos divisores capacitivos de potencial e transformadores de potência, na forma de capacitores de surto, não mostra ter uma sensibilidade muito grande sobre os resultados encontrados, mas de qualquer forma deve ser feita como mostrado no CAPÍTULO VIII. Fi-

nalmente, a tensão à frequência industrial do sistema no instante da incidência não é fator decisivo nos resultados encontrados e pode, de uma maneira geral, ser desconsiderada.

- Os estudos deverão ser feitos a partir da fase de pré-projeto do sistema, isto é, quando já se terá conhecido as características das linhas de transmissão ligadas à subestação a SF_6 e da própria subestação isolada a SF_6, de forma a se ter em detalhes os elementos que devem ser representados no estudo.

- A solução inicial a ser adotada para se fazer a coordenação de isolamento é a aplicação de pára-raios externos (em primeiro lugar, do tipo convencional, e, em segundo lugar, do tipo óxido de zinco). Caso esta solução mais econômica não seja adequada, a aplicação de pára-raios blindados, ou encapsulados, deverá ser tentada.

- As normas ANSI e IEC tem padronizado os níveis de isolamento para cada classe de tensão. Estes níveis de isolamento deverão ser almejados, pois serão, ao se adquirir o equipamento, os mais econômicos. Caso não se consiga a sua adoção pela aplicação conveniente dos limitadores de sobretensões (pára-raios), níveis de isolamento mais elevados deverão ser escolhidos.

PARTE 2

SIMULAÇÃO DE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO ISOLADA A SF_6, NA TENSÃO DE 500 kV

CAPÍTULO XII

12.1. Sumário

Na Parte 1, deste trabalho, foi descrita a Teoria da Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF_6. O objetivo desta Parte 2 é a consolidação dos conceitos expostos anteriormente.

Vale lembrar que a coordenação do isolamento será feita através do estudo do desempenho da subestação às descargas atmosféricas, tanto direta, quanto indireta.

O roteiro a ser seguido no estudo admite, inicialmente, que os pára-raios são do tipo externo e convencional. O segundo passo é a adoção de pára-raios do tipo óxido de zinco.

A aproximação dos pára-raios na entrada da subestação é um recurso também adotado, caso a configuração inicial não se mostre adequada. Finalmente, pode-se-á adotar os chamados pára-raios blindados ou encapsulados, internos ao barramento.

No CAPÍTULO VI, da Parte 1, mostrou-se as regras de segurança recomendadas, atualmente, pela literatura existente sobre o assunto. Elas serão aqui relembradas para efeito de fixação das metas a serem atingidas.

Para surtos atmosféricos, o seguinte objetivo deve ser alcançado:

. Nível de Isolamento = Máxima Sobretensão Encontrada X 1,20

No CAPÍTULO VI mostrou-se, na Tabela 6.1, os níveis de isolamento para impulsos atmosféricos padronizados pelas normas ANSI e IEC. Será admitido que o nível de isolamento que se deseja especificar para a subestação estudada seja o estabelecido pela norma ANSI, que para a tensão nominal do sistema de 500 kV, é igual a 1550 kV.

Tendo em vista a margem de segurança recomendável, a máxima sobretensão encontrada no interior da subestação deve ser:

$$\text{Máxima Sobretensão Encontrada} = \frac{\text{BIL}}{1,20}$$

$$\text{Máxima Sobretensão Encontrada} = \frac{1550}{1,20} = 1290 \text{ kV}$$

Este valor então não deverá ser ultrapassado no interior do barramento isolado a SF_6.

Quanto aos surtos de manobra, a margem de segurança recomendável, no CAPÍTULO VI, deve ser:

$$\text{Máxima Sobretensão Encontrada} = \frac{\text{Nível de Isolamento}}{1,15}$$

Admitindo que a subestação seja especificada seguindo a norma ANSI, conforme já mensionado anteriormente, pode-se ver pela Tabela 6.1 que o nível de isolamento para surtos de manobra seria 1240 kV. Desta forma, para surtos de manobra se terá:

$$\text{Máxima Tensão Encontrada} = \frac{1240}{1,15} = 1078 \text{ kV}$$

Conforme descrito na Parte 1, se a subestação estiver convenientemente coordenada para surtos atmosféricos, também estará para surtos de manobra.

CAPÍTULO XIII

13.1. Configuração da Subestação Estudada

Conforme exposto no texto da Parte 1, os barramentos isolados a SF_6 poderão tomar os mesmos arranjos das subestações convencionais. Para a subestação imaginada como protótipo para o estudo que aqui será desenvolvido foi admitido um arranjo de "disjuntor e meio", conforme pode ser visto nas Figuras 13.1 a 13.5, a seguir.

A subestação estudada possui 2 linhas de alimentação e dois transformadores, à tensão nominal de 500 kV.

A colocação inicial dos pára-raios de linha (P.R.1 e P.R.2) é externa e são primeiros equipamentos na chegada da subestação. A seguir, aos pára-raios, de linha, encontram-se os divisores capacitivos de potencial (DCP1 e DCP2). Também os transformadores são protegidos por pára-raios externos (P.R.3 e P.R.4) e possuem em seus vãos divisores capacitivos de potencial (DCP5 e DCP6).

A Figura 13.5, mostra além dos pára-raios acima citados (P.R.1 a P.R.4) os pára-raios (P.R.5 a P.R.8) que são blindados e poderiam ser uma opção a mais na tentativa de se alcançar uma coordenação de isolamento adequada. Nas simulações feitas não se defrontou com a necessidade de utilizá-los e os mesmos são mostrados como ilustração. O texto da Parte 1 descreve a versatilidade que os pára-raios blindados oferecem na coordenação de isolamento das subestações a SF_6.

Além disso, a subestação possui dois divisores capacitivos de potencial (DCP4 e DCP5) internos ao barramento.

A Figura 13.6, mostra de que maneira foi representada a linha de transmissão.

Os cabos guarda, as torres, os isoladores e as resistências de aterramento são representadas quando se estuda as descargas indiretas no topo das torres.

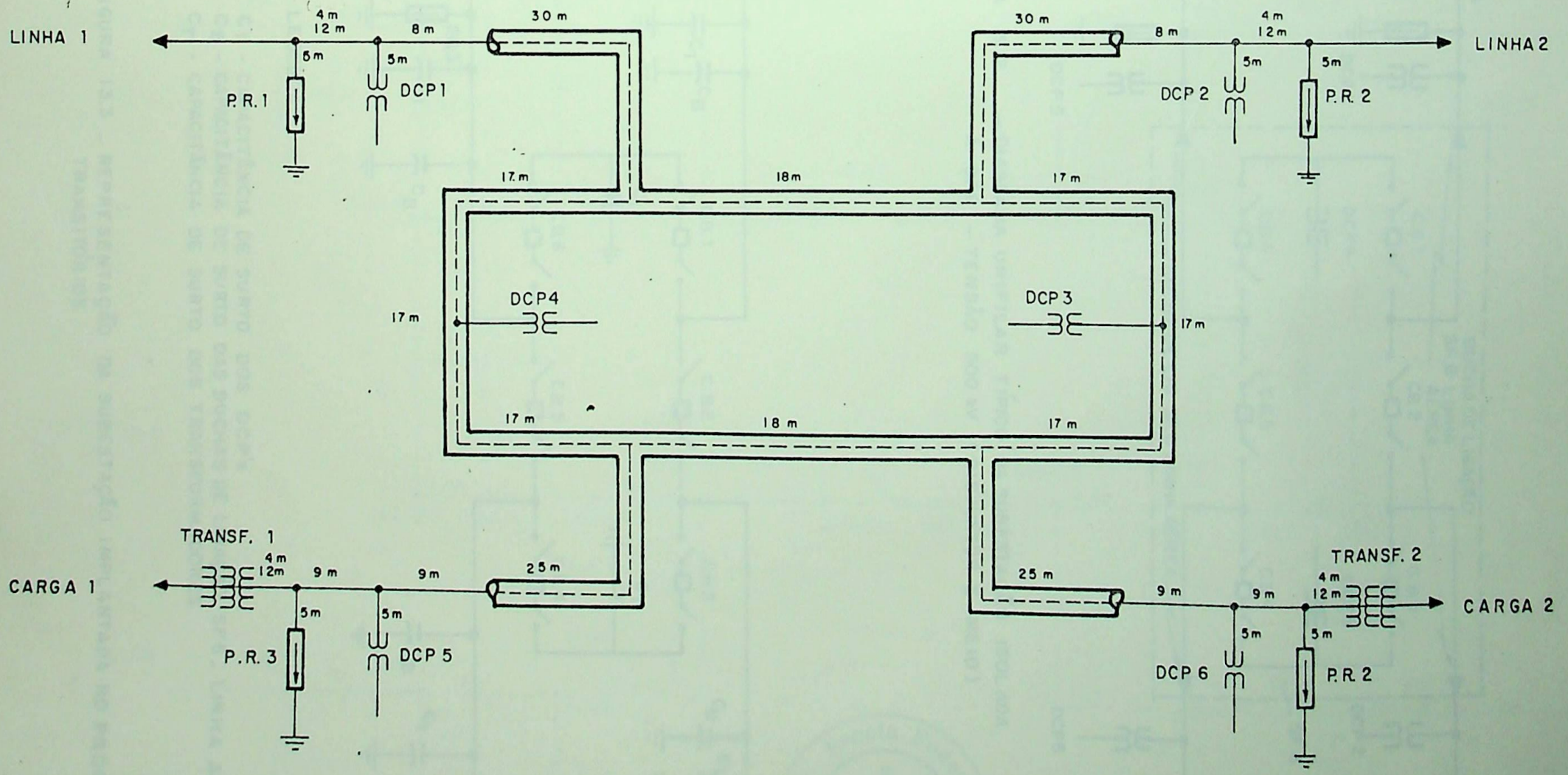


FIGURA 13.1 CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE UMA SUBESTAÇÃO ISOLADA A SF6 – TENSÃO 500 kV (DISJUNTOR E MEIO) – PÁRA-RAIOS EXTERNOS.

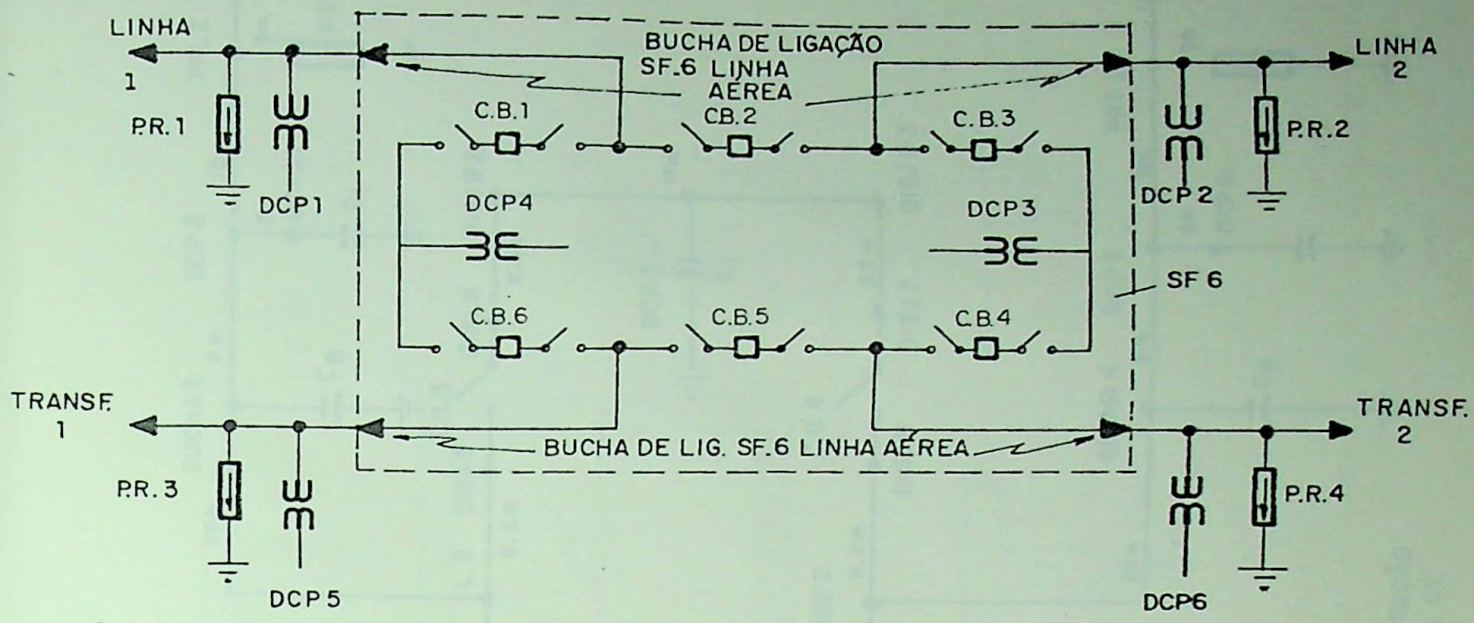
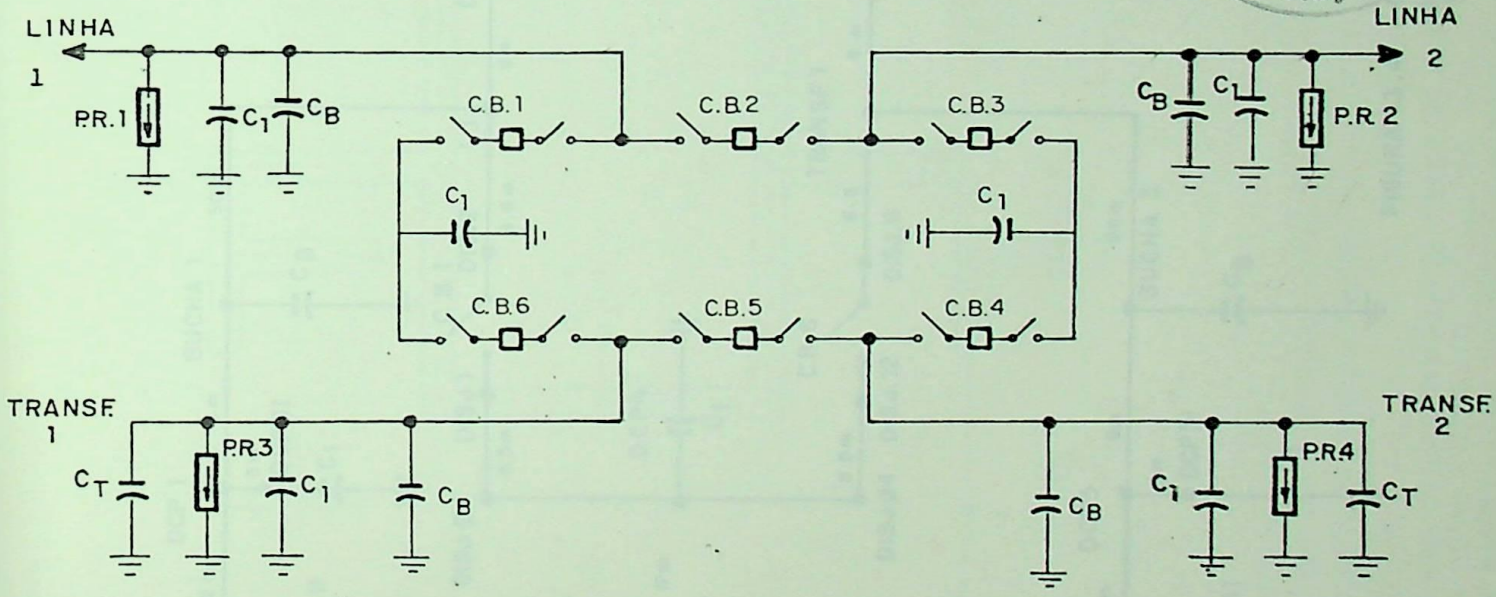


FIGURA 19.2 — DIAGRAMA UNIFILAR TÍPICO DA SUBESTAÇÃO ISOLADA A SF6 — TENSÃO 500 kV (DISJUNTOR E MEIO)

Escola Federal de Engenharia Biblioteca MAUÁ Itajubá



LEGENDA:

C_1 - CAPACITÂNCIA DE SURTO DOS DCP's
C_B - CAPACITÂNCIA DE SURTO DAS BUCHAS DE LIGAÇÃO SF6 - LINHA AÉREA
C_T - CAPACITÂNCIA DE SURTO DOS TRANSFORMADORES

FIGURA 13.3 - REPRESENTAÇÃO DA SUBESTAÇÃO IMPLANTADA NO PROGRAMA DE TRANSITÓRIOS

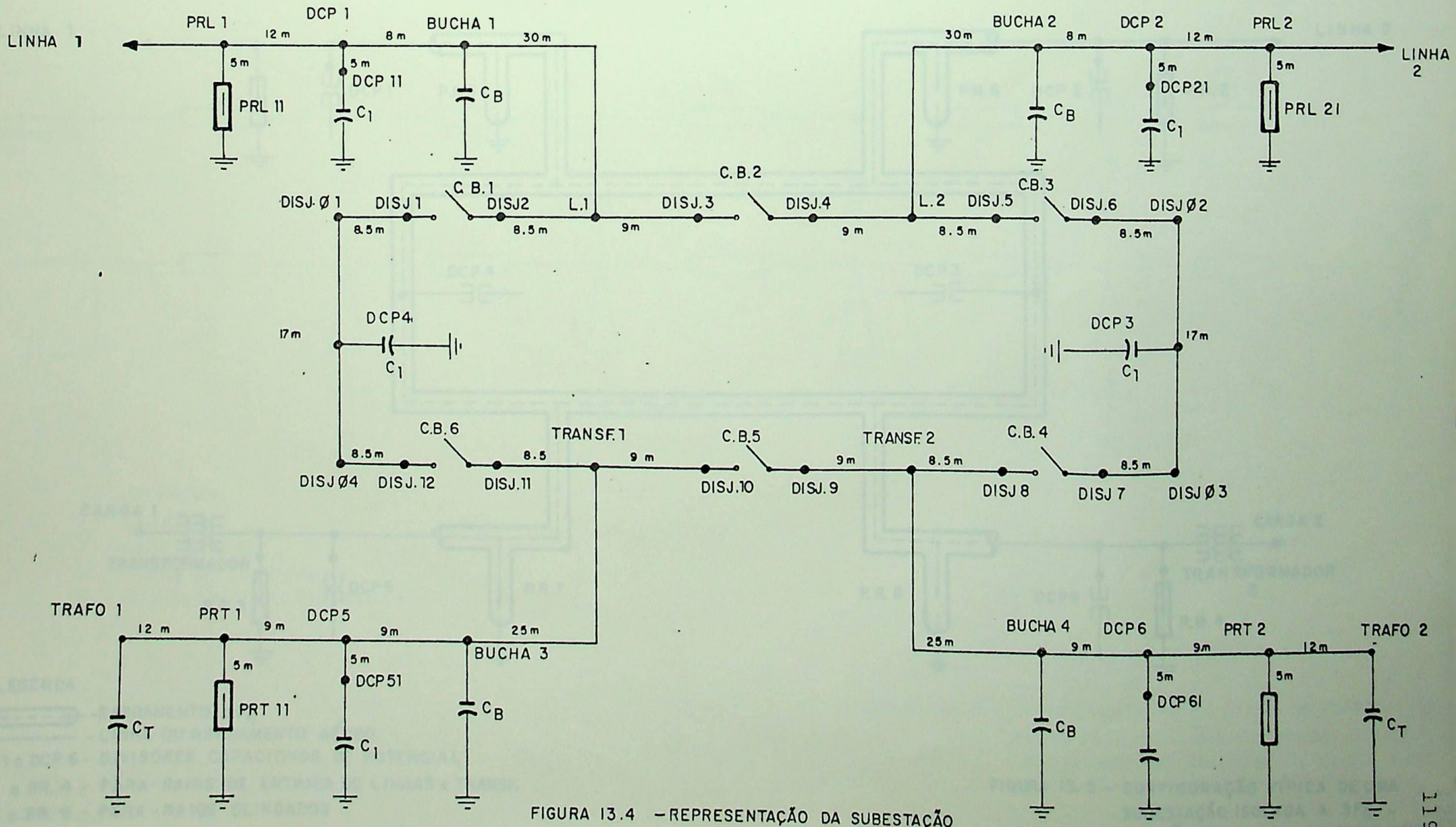
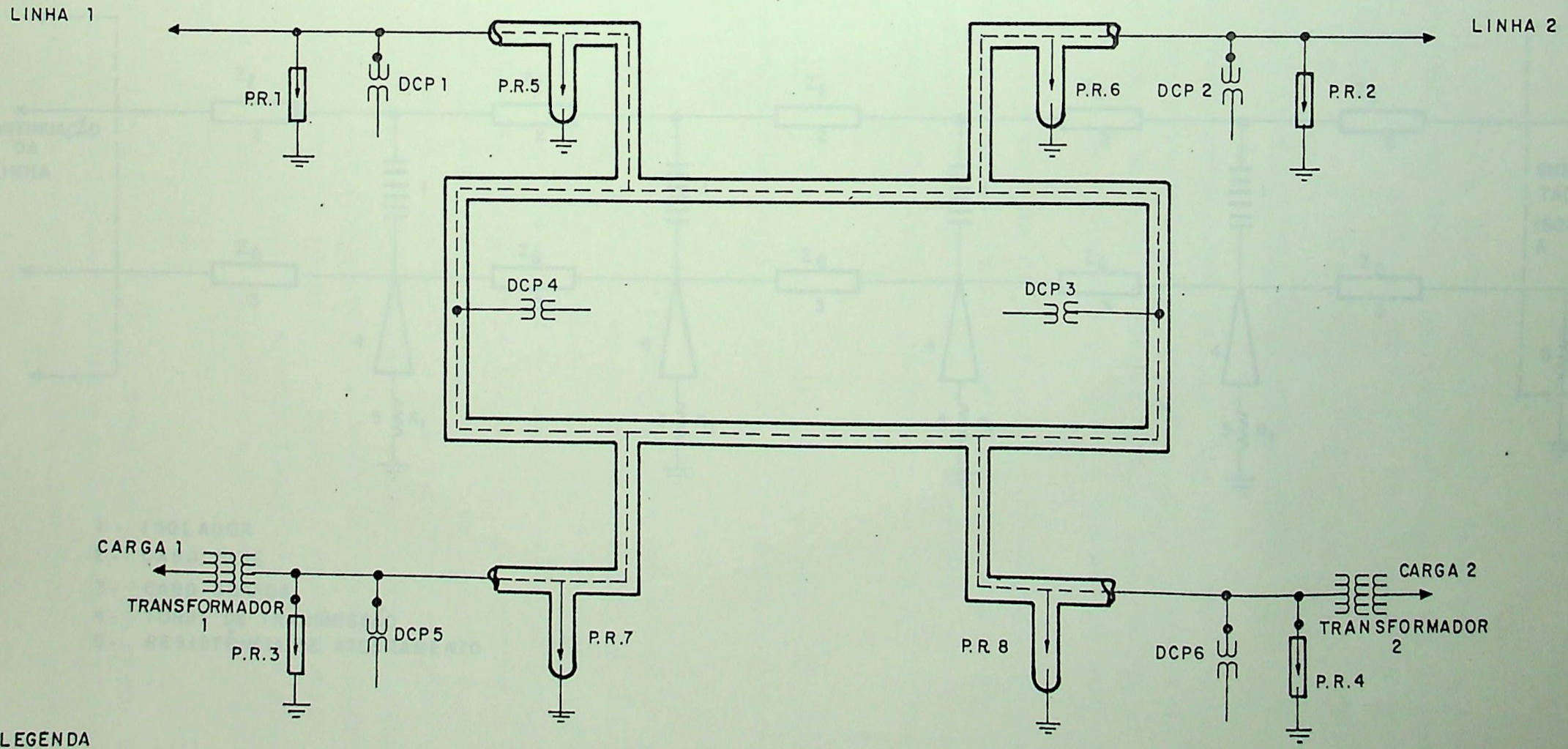


FIGURA 13.4 – REPRESENTAÇÃO DA SUBESTAÇÃO IMPLANTADA NO PROGRAMA DE TRANSITÓRIOS



LEGENDA

- BARRAMENTO SF_6
- LINHA OU BARRAMENTO AÉREO

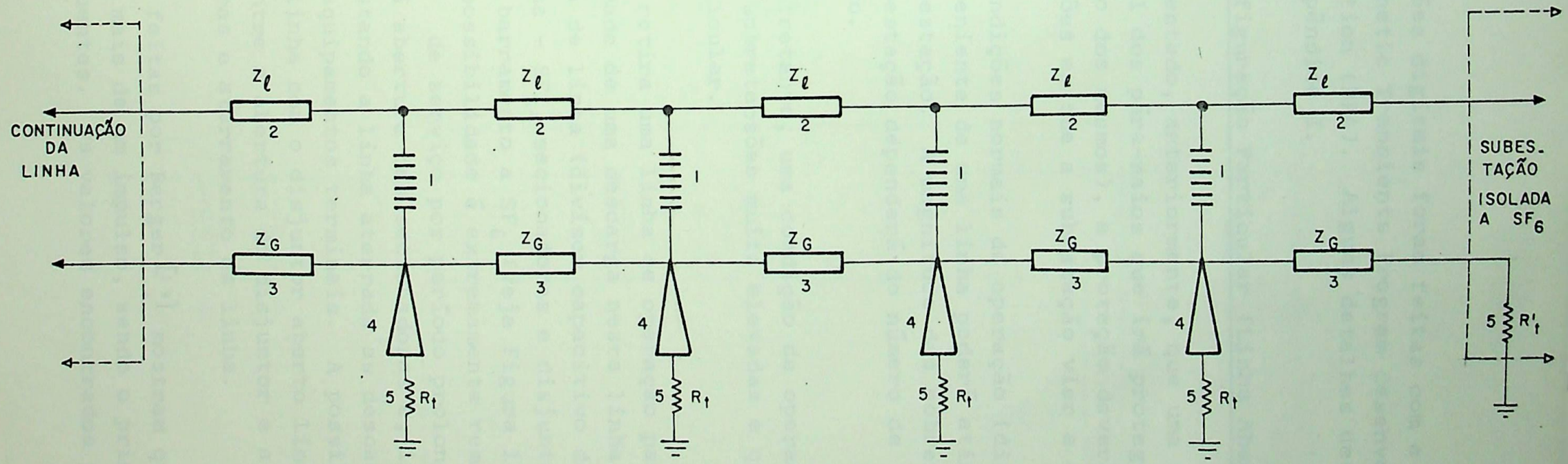
DCP 1 a DCP 6 - DIVISORES CAPACITIVOS DE POTENCIAL

P.R. 1 a P.R. 4 - PÁRA-RAIOS DE ENTRADA DE LINHAS e TRANSF.

P.R.5 a P.R. 8 - PÁRA-RAIOS BLINDADOS

OBS: OS PÁRA-RAIOS BLINDADOS NÃO SERIAM INSTALADOS TODOS AO MESMO TEMPO. ESTÃO MOSTRADOS COMO EXEMPLOS DE SOLUÇÃO PARA POSSÍVEIS PROBLEMAS NA COORDENAÇÃO COM PÁRA-RAIOS CONVENCIONAIS

FIGURA 13.5 - CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE UMA SUBESTAÇÃO ISOLADA A SF_6 - TENSÃO, 500 kV (DISJUNTOR E MEIO) COM PÁRA-RAIOS BLINDADOS.



1 - ISOLADOR
2 - CABO FASE
3 - CABO GUARDA
4 - TORRE DE TRANSMISSÃO
5 - RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

FIGURA 13.6 — REPRESENTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO (CABO FASE, CABO GUARDA, TORRE, ISOLADOR, RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO) PARA SIMULAÇÃO DAS DESCARGAS INDIRETAS.

As simulações digitais foram feitas com o programa de transitórios Electromagnetic Transients Program desenvolvido na Bonneville Power Administration (BPA). Alguns detalhes deste programa são apresentados no Apêndice I.

13.2. Configuração Particular (Linha Aberta)

Já foi comentado, anteriormente, que uma vez encontrada a configuração ideal dos pára-raios que irá proteger a subestação (tipo e localização dos mesmos), a proteção deverá ser obtida em todas as configurações em que a subestação vier a operar na sua vida útil.

Durante condições normais de operação (disjuntores fechados), o surto proveniente de uma linha poderá atingir todos os equipamentos da subestação. A magnitude das sobretensões nos diversos pontos da subestação dependerá do número de linhas e transformadores em operação.

Existe, entretanto, uma condição de operação especial na qual poderá se ter sobretensões muito elevadas e que deve ser tratada de maneira particular.

Quando se retira uma linha de operação para manutenção, existe a possibilidade de uma descarga nesta linha atingir os equipamentos da entrada de linha (divisor capacitivo de potencial, buchas de ligação linha - SF_6, secionadoras e disjuntores) e, consequentemente, o próprio barramento a SF_6 (veja Figura 13.7, a seguir). Entretanto, esta possibilidade é extremamente remota porque ao se retirar uma linha de serviço por período prolongado, é prática usual se proceder à abertura das secionadoras e, imediatamente, aterrar a linha. Estando a linha aterrada as descargas atmosféricas não atingirão os equipamentos terminais. A possibilidade do raio atingir o vão de linha com o disjuntor aberto limitar-se-á ao pequeno intervalo entre a abertura do disjuntor e a operação de abertura das secionadoras e aterramento da linha.

Pesquisas feitas por Berger [19] mostram que as descargas negativas podem ter mais de um impulso, sendo o primeiro de maior valor que os subsequentes. Os valores encontrados por Berger estão mostra-

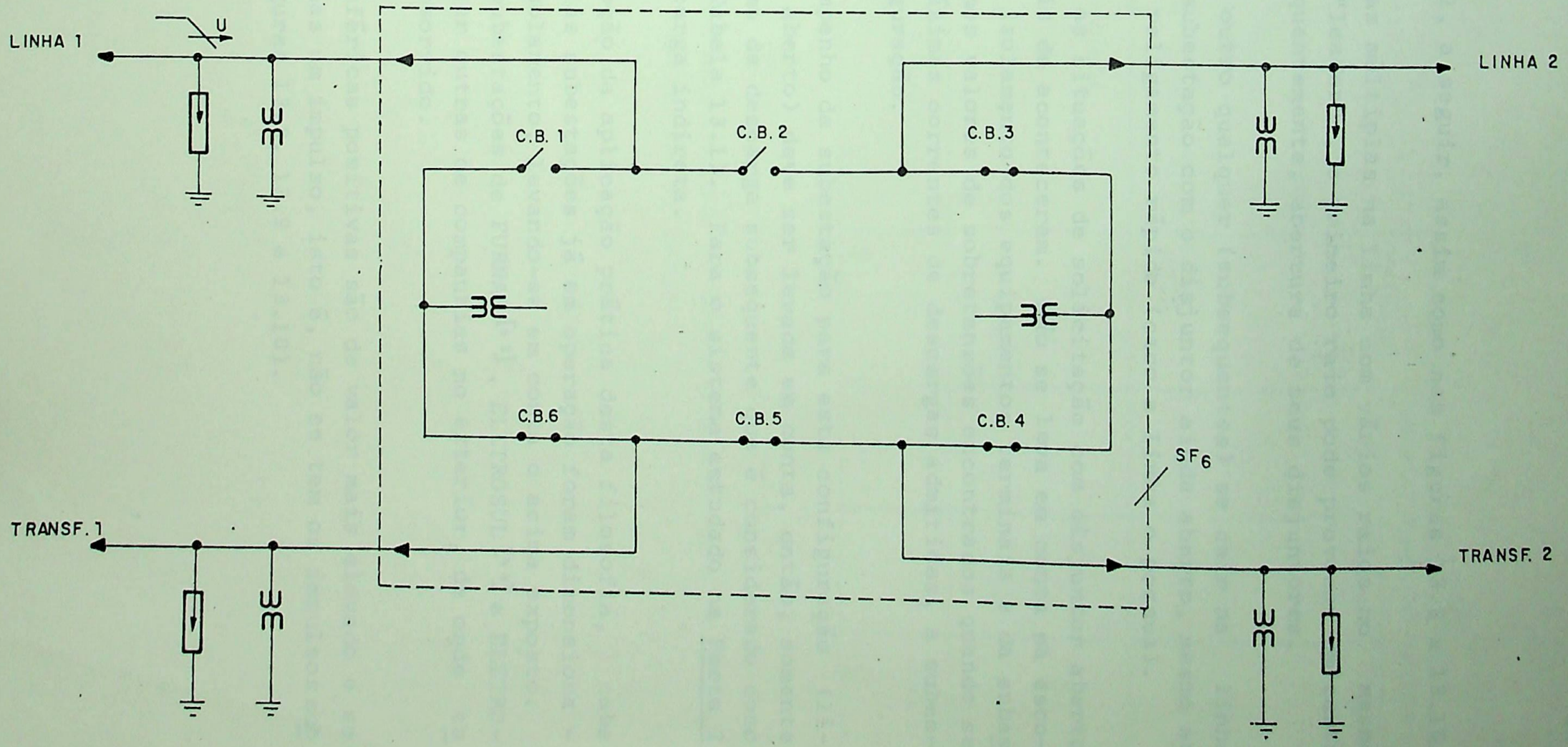


FIGURA 13.7- SUBESTAÇÃO COM DISJUNTORES DA LINHA 1 ABERTOS

dos na Tabela 13.1, a seguir, assim como nas Figuras 13.8 a 13.10.

Quando há descargas múltiplas na linha com vários raios no mesmo canal precursor ("leader"), o primeiro raio pode provocar um curto na linha e, consequentemente, abertura de seus disjuntores.

O segundo raio ou outro qualquer (subsequentes) se cair na linha poderá atingir a subestação com o disjuntor ainda aberto, mesmo antes de ocorrer um religamento rápido (caso a linha o possua).

Pode-se notar que as situações de solicitação com disjuntor aberto são pouco prováveis de acontecerem. Não se leva em conta na escolha dos níveis de isolamento dos equipamentos terminais e da subestação a SF_6 os máximos valores de sobretensões encontrados quando se analisa, com as máximas correntes de descargas admitidas, a subestação nesta configuração.

A análise do desempenho da subestação para esta configuração (linha com disjuntor aberto) deve ser levada em conta, então, somente para o valor máximo de descarga subsequente que é considerado como sendo 30 kA (ver Tabela 13.1). Para o sistema estudado na Parte 2 esta será uma descarga indireta.

Para se ter uma noção da aplicação prática desta filosofia, cabe salientar que várias subestações já em operação foram dimensionadas, quanto ao isolamento, levando-se em conta o acima exposto. Este é o caso de subestações de FURNAS [63], ELETROSUL [44] e ELETRONORTE [43], sem citar outras de companhias no exterior, de onde este conceito foi absorvido.

As descargas atmosféricas positivas são de valor mais elevado e se constituem de apenas um impulso, isto é, não se tem os impulsos subsequentes (ver Figuras 13.8, 13.9 e 13.10).

FIGURA Nº	PARÂMETRO	UNIDADE	PROBABILIDADE DE EXCEDER A		
			95%	50%	5%
	Intensidade de corrente (negativa)				
13.8	1a. descarga	kA	14	30	80
13.8	Seguintes	kA	4,6	12	30
	Frente de Onda				
13.9	1a. descarga	seg	1,8	5,5	18
13.9	Seguintes	seg	0,22	1,1	4,5
13.10	Intervalo entre raios negativos	ms	7	33	150

TABELA 13.1 - Parâmetros Típicos de Descargas Negativas - Pesquisas feitas por K. Berger [19]

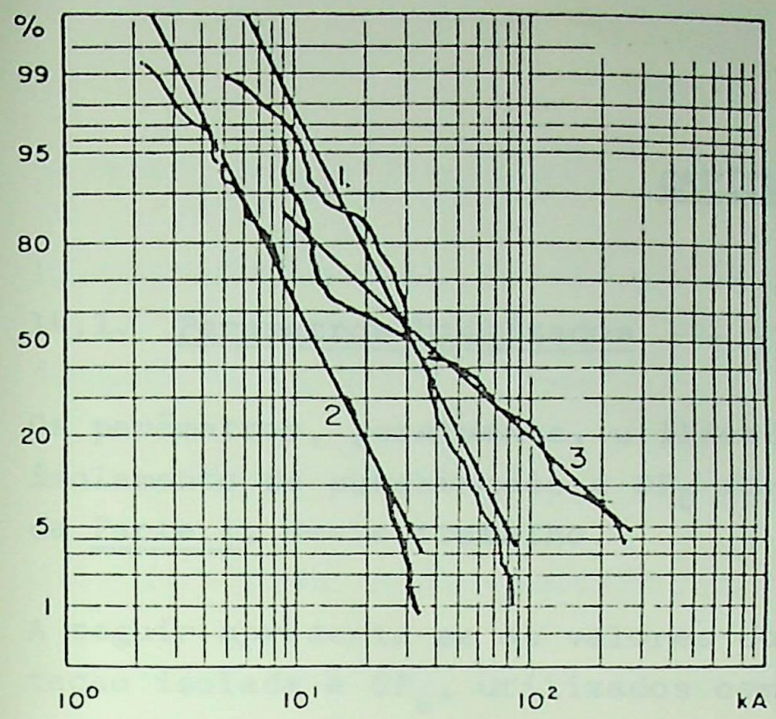


FIGURA 13.8 - Valores de Corrente de Descarga

1. Primeiros Impulsos Negativos
2. Impulsos Negativos Subsequentes
3. Impulsos Positivos

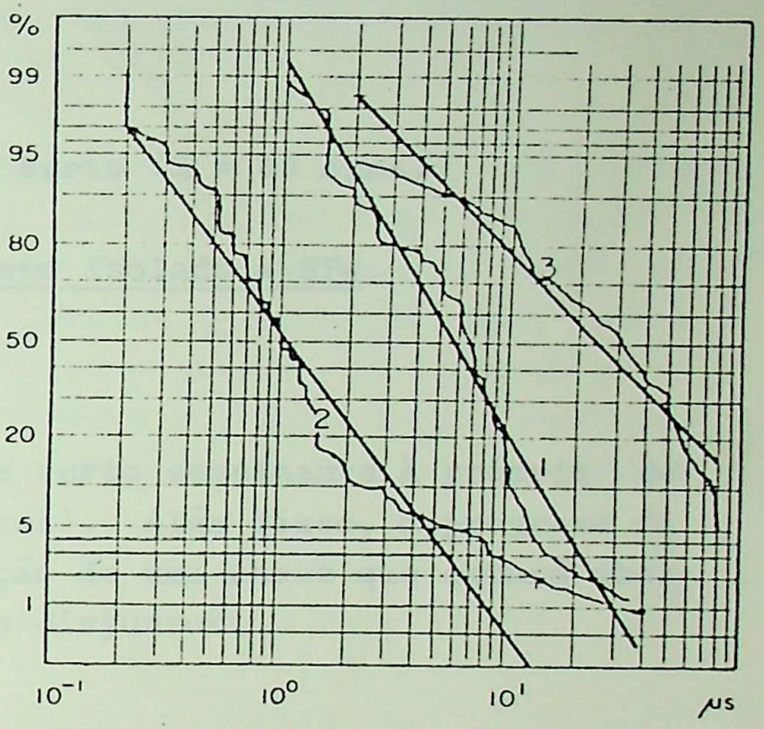


FIGURA 13.9 - Valores de Frente de Onda

1. Primeiros Impulsos Negativos
2. Impulsos Negativos Subsequentes
3. Impulsos Positivos

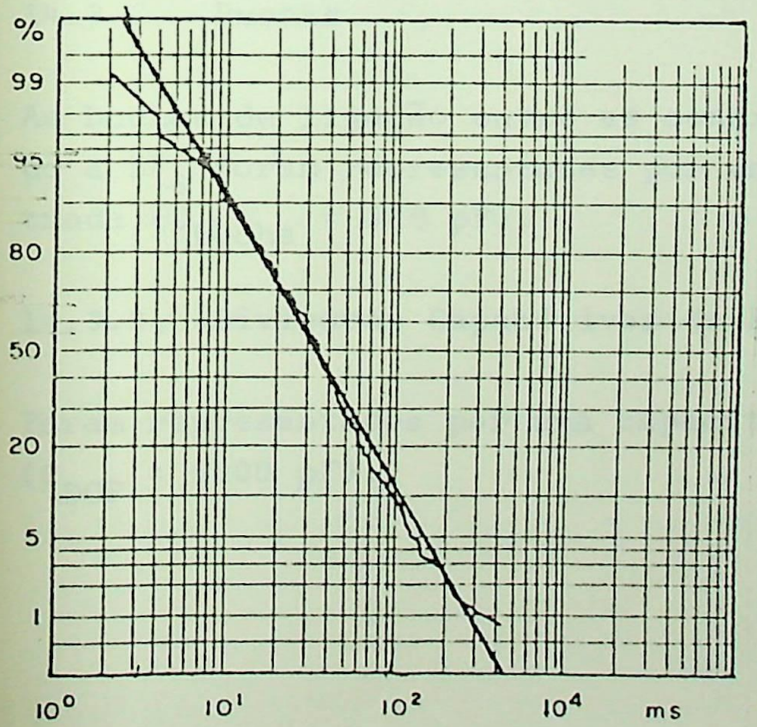


FIGURA 13.10 - Intervalo entre Descargas Negativas

CAPÍTULO XIV

14.1. Parâmetros Utilizados

Os parâmetros, geralmente, utilizados nos estudos de coordenação de isolamento de subestações a SF_6 foram apresentados no CAPÍTULO VIII da Parte 1, deste trabalho.

A seguir apresenta-se os valores correspondentes ao sistema e subestação isolada a SF_6, utilizados como exemplo nesta Parte 2.

14.2. Barramento Isolado a SF_6

Representado por sua impedância de surto (Z = 60 ohms)

14.3. Elementos Dentro do Barramento Isolado a SF_6

14.3.1. Disjuntores

Representados por uma impedância de surto semelhante à própria do barramento isolado a SF_6 (Z = 60 ohms). Além disso, o programa digital deverá permitir a representação de uma chave que estará aberta ou fechada conforme a posição do disjuntor.

14.3.2. Buchas

As buchas de ligação entre as conexões aérea e o barramento isolado a SF_6 foram representadas por uma capacitância de surto concentrada (C_{bucha} = 500 pF).

14.3.3. Divisores Capacitivos de Potencial

Foram representados por uma capacitância de surto concentrada (C_{DCP} = 5000 pF).

14.3.4. Demais Elementos

Elementos tais como chaves secionadoras e transformadores de corrente são representados como uma sequência do próprio barramento isolado a SF_6 (Z = 60 ohms).

14.4. Elementos Fora do Barramento Isolado a SF_6

14.4.1. Linha de Transmissão [62]

A linha de transmissão que serve de veículo para as ondas que atingem a subestação é representada por suas impedâncias próprias de surto.

A seguir, mostra-se os cálculos feitos para a linha que tem a torre típica da Figura 5.2, da Parte 1, e utilizados nas simulações. Estes cálculos mostram a determinação das impedâncias de surto do cabo fase, do cabo guarda, das impedâncias de surto mútuas entre cabos guarda (são 2) e entre cabos fase e guarda, do fator de acoplamento entre um cabo guarda equivalente e o cabo fase simulado e, finalmente, a impedância de surto própria do cabo guarda equivalente.

a) Impedância de Surto dos Cabos Fase ($Z_{11} = Z_{22} = Z_{33}$)

$$Z_{11} = 60 \ln \frac{2H_1}{R_1} \quad (Z_{11} = Z_{22} = Z_{33}) \qquad (14.1)$$

Onde:

H_1 = altura média do condutor fase na linha

R_1 = raio médio do condutor fase equivalente

Sendo:

$$H_1 = h_1 - \frac{2}{3} (h_1 - h_{gw_1}) = 23 \text{ m} \qquad (14.2)$$

Onde:

h_1 = altura do condutor fase na torre = 25 m

h_{gw_1} = altura do condutor fase no meio do vão = 22 m

R_1 = 21,6 cm (dimensão do condutor)

Então, substituindo os valores:

$$Z_{11} = 60 \times \ell n \frac{2 \times 23}{0,216}$$

Z_{11} = 320 ohms

b) Impedância de Surto do Cabo Guarda

$$Z_{44} = 60 \ \ell n \frac{2H_4}{R_4} \quad (Z_{44} = Z_{55}) \qquad (14.3)$$

Onde:

H_4 = altura média do cabo guarda na linha

R_4 = raio médio do cabo guarda = 3/8" = 0,476 cm

Sendo:

$$H_4 = h_4 - \frac{2}{3} (h_4 - h_{gw^4}) = 36,6 \text{ m} \qquad (14.4)$$

Onde:

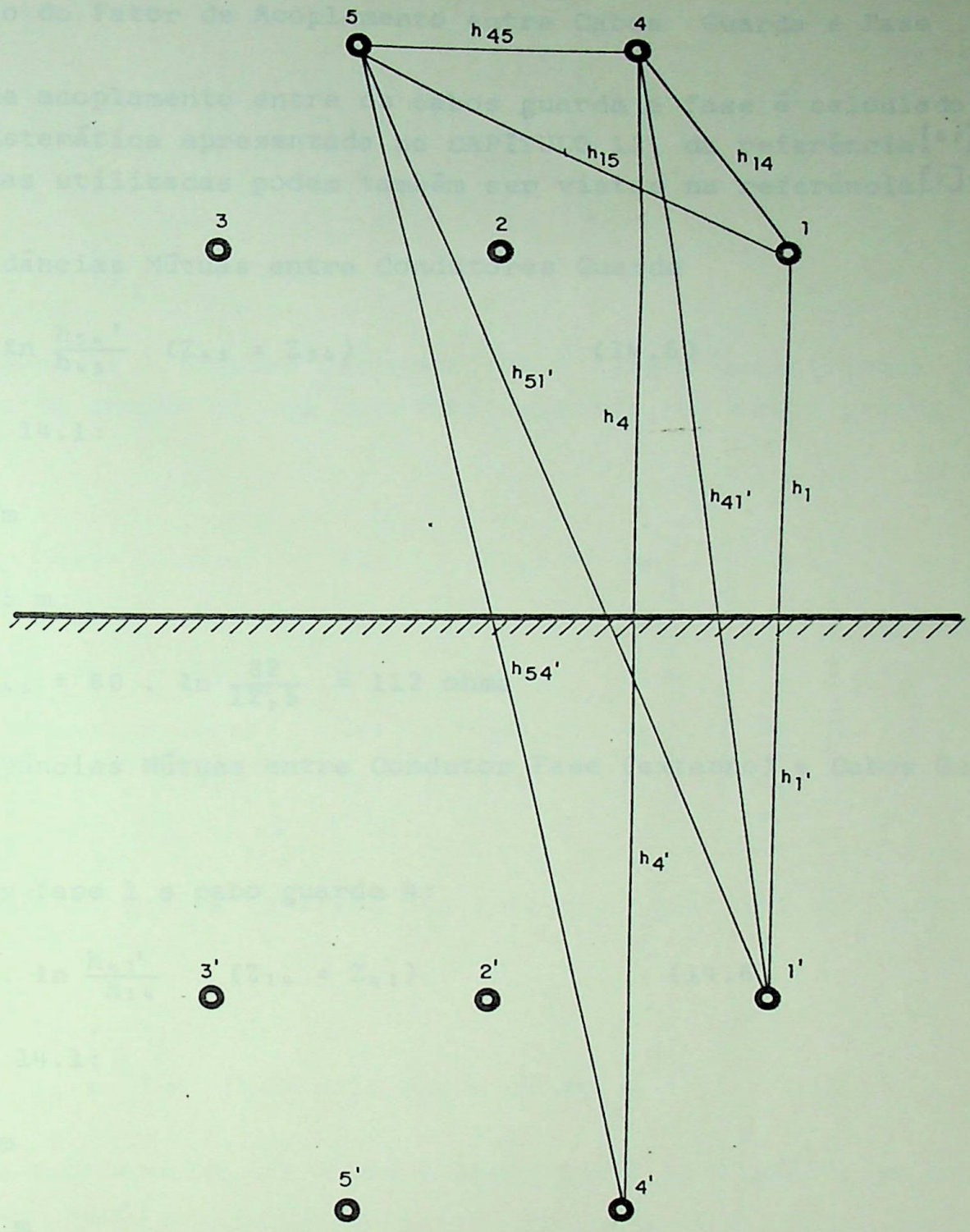
h_4 = altura do cabo guarda na torre = 40 m

h_{gw_4} = altura do cabo fase no meio do vão = 35 m

Então:

$$Z_{44} = 60 \ . \ \ell n \frac{2 \times 36,6}{0,00476}$$

Z_{44} = 578 ohms



1, 2, 3 - CABOS FASE
4, 5 - CABOS GUARDA
1', 2', 3' - IMAGENS DOS CABOS FASE
4', 5' - IMAGENS DOS CABOS GUARDA

$h_1 = h_1' =$ 25 m
$h_4 = h_4' =$ 40 m
$h_{45} =$ 12,5 m
$h_{41'} =$ 65 m
$h_{14} =$ 16 m
$h_{51'} =$ 67 m
$h_{54'} =$ 82 m
$h_{15} =$ 24 m

FIGURA 14.1 - DIMENSÕES DOS CONDUTORES NA TORRE UTILIZADA PARA CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS DE SURTO.

c) Cálculo do Fator de Acoplamento entre Cabos Guarda e Fase

O fator de acoplamento entre os cabos guarda e fase é calculado seguindo sistemática apresentada no CAPÍTULO 12, da referência[62]. As fórmulas utilizadas podem também ser vistas na referência[1].

c.1) Impedâncias Mútuas entre Condutores Guarda

$$Z_{45} = 60 \ln \frac{h_{54}'}{h_{45}} \quad (Z_{45} = Z_{54}) \qquad (14.5)$$

Da Figura 14.1:

$h_{54}' = 82$ m

$h_{45} = 12,5$ m

Então: $Z_{45} = 60 \cdot \ln \frac{82}{12,5} \cong 112$ ohms

c.2) Impedâncias Mútuas entre Condutor Fase (externo) e Cabos Guarda

- Condutor fase 1 e cabo guarda 4:

$$Z_{14} = 60 \cdot \ln \frac{h_{41}'}{h_{14}} \quad (Z_{14} = Z_{41}) \qquad (14.6)$$

Da Figura 14.1:

$h_{14} = 16$ m

$h_{41}' = 65$ m

$$Z_{14} = 60 \cdot \ln \frac{65}{16} = 84 \text{ ohms}$$

- Condutor fase 1 e cabo guarda 5:

$$Z_{15} = 60 \times \ln \frac{h_{15}}{h_{51}'} \quad (Z_{15} = Z_{51}) \qquad (14.7)$$

Da Figura 14.1:

$h_{15} = 24$ m

$h_{51}' = 67$ m

$Z_{15} = 60 \cdot \ell n \frac{67}{24} \cong 61$ ohms

Para a Figura 14.1 podemos escrever que a tensão desenvolvida nos condutores em função de uma corrente injetada nos cabos guarda será:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \qquad (14.8)$$

Considerando-se que se injetará uma corrente igual a I no topo da torre:

$$I_1 = I_2 = I_3 = 0$$

$$I_4 = I_5 = I/4 \quad \text{(são dois cabos guarda)}$$

O fator de acoplamento (c) entre o cabo fase 1 (externo) e os condutores fase será:

$$C = \frac{V_1}{V_4} = \frac{V_1}{V_5}$$

Da equação matricial 14.8, acima:

$$V_1 = \frac{I}{4} \quad (Z_{14} + Z_{15})$$

$$V_4 = \frac{I}{4} \ (Z_{44} + Z_{45})$$

$$V_5 = \frac{I}{4} \ (Z_{54} + Z_{55})$$

Sendo $C = \frac{V_1}{V_4}$

$$C = \frac{I/4 \ (Z_{14} + Z_{15})}{I/4 \ (Z_{54} + Z_{55})}$$

$$C = \frac{Z_{14} + Z_{15}}{Z_{54} + Z_{55}} \qquad (14.9)$$

Substituindo valores anteriormente calculados:

$$C = \frac{84 + 61}{112 + 578} \quad \therefore \quad C \cong 0,22 \quad (C = \text{fator de acoplamento})$$

d) Impedância de Surto de um Condutor Guarda Equivalente

$$Z_{cg} = \frac{Z_{44} + Z_{45}}{2} = \frac{Z_{55} + Z_{54}}{2}$$

$$Z_{cg} = \frac{578 + 112}{2}$$

$$Z_{cg} = 345 \text{ ohms}$$

14.4.2. Transformador de Potência

Os transformadores de potência foram representados por uma capacitância de surto concentrada ($C_{trafo} = 4000$ pF).

14.4.3. Divisores Capacitivos de Potencial

Da mesma forma, os divisores capacitivos de potencial são representados por uma capacitância de surto concentrada ($C_{DCP} = 5000$ pF).

14.4.4. Pára-raios

Tendo em vista a versatilidade do programa de transitórios empregado no estudo (EMTP, da Bonneville Power Administration) os pára-raios, tanto os convencionais, quanto os de óxido de zinco, foram representados bem próximo da sua real operação.

Os dados empregados são os descritos no CAPÍTULO VIII.

14.4.5. Torre de Transmissão

As torres de transmissão foram representadas por uma impedância de surto equivalente, típica, de 100 ohms.

14.4.6. Resistência de Aterramento das Torres

As resistências de aterramento das torres foram supostas igual a 12 ohms, e a do cabo guarda no interior da subestação igual a 1,0 ohm.

Obs.: Cabe observar que para elementos representados por suas impedâncias de surto são também considerados os seus respectivos comprimentos.

14.4.7. Isoladores

Representados como "gaps" que disparam quando a tensão ultrapassa o valor de 2200 kV. Este valor foi obtido em testes efetuados, por FURNAS e pela LIGHT-Rio, para cadeias utilizadas em linhas de 500 kV, com 26 isoladores. Estes testes mostraram que 100% das tensões que ultrapassaram o valor de 2200 kV causaram o disparo dos referidos isoladores.

14.5. Descargas Atmosféricas

Os parâmetros das descargas atmosféricas foram analisadas no CAPÍTULO V, da Parte 1, deste trabalho. Nas simulações efetuadas nesta Parte 2 os seguintes valores foram utilizados:

15.5.1. Descargas Diretas

O valor da descarga atmosférica possível de atingir os condutores fase das linhas foi calculado no CAPÍTULO V, da Parte 1. É de 13,64 kA e corresponde a uma tensão injetada na subestação de 2182 kV.

A frente de onda mínima admitida foi de 0,5 μseg, mas outros valores mais elevados foram investigados para se ter uma sensibilidade de sua variação. A influência da amplitude e da taxa de crescimento da onda incidente na subestação foram analisados no CAPÍTULO IX da Parte 1 deste trabalho.

14.5.2. Descarga Indiretas

Foi admitido um valor máximo de 200 kA e uma taxa de frente de onda de 0,50 μseg. Da mesma forma que para descargas diretas, foi feita uma avaliação para valores maiores de frente de onda. As descargas indiretas foram injetadas no topo das quatro primeiras torres [5,28]. Para o caso particular da configuração da linha com disjuntor aberto foi também admitida uma descarga indireta de 30 kA, conforme explicado no item 13.2 [19,43,44,63].

O valor de 200 kA admitido como sendo o de descarga indireta máxima poderia ser reavaliado, utilizando-se 150 kA, como é feito em inúmeras referências. Como os resultados obtidos não se mostraram exagerados esta reavaliação não foi feita.

Da mesma forma, o tempo de frente de onda de 0,5 μseg, para a descarga indireta, poderia ser reavaliado para 1,0 μseg, que seria um valor que provocaria menores solicitações, em termos de sobre - tensões, no interior do barramento isolado a SF_6.

CAPÍTULO XV

15.1. Descrição dos Casos Simulados

O arranjo de pára-raios (tipo e localização dos mesmos na subestação) que fornece uma coordenação de isolamento adequada não é uma solução única. Conforme descrito no texto da Parte 1, existirão soluções mais econômicas que outras e, naturalmente, estas deverão ser preferidas.

Dentro deste entendimento, serão descritos os casos que foram simulados para se chegar às características de isolamento adequadas para a subestação que se está estudando. Os resultados obtidos nas diferentes simulações efetuadas (45 Casos) estão apresentados na Tabela 16.1 no item a seguir.

As simulações foram iniciadas supondo os pára-raios localizados conforme mostrados na Figura 13.1, distando 12 m dos DCP's de linha (P.R.1 e P.R.2) e dos transformadores de força (P.R.3 e P.R.4) e sendo do tipo convencional. As primeiras descargas estudadas foram do tipo direto (Casos: 1, 2, 3, 4, 5, 6). Observar que foi efetuada uma variação do valor do tempo de crista da onda incidente de forma a se confirmar o exposto no item 9.4. Quanto mais lento o tempo de crista da onda incidente mais baixo será o valor da máxima sobretensão encontrada ao longo da subestação (Casos: 1, 2, 3, 4, 5).

Com a finalidade de se verificar uma possível coordenação para a configuração de linha com disjuntores abertos (Figura 13.7), esta situação foi estudada utilizando-se pára-raios convencionais e de óxido de zinco (Casos: 6 e 7). Nota-se que isto não foi conseguido.

Em seguida passou-se ao estudo das descargas indiretas, variando-se a torre na qual se injetou a descarga atmosférica (da 1a. à 4a torre) e, também, a configuração da subestação (Casos: 8 a 22).

Com estes casos foi observado que as maiores sobretensões aparecerão no interior da subestação quando a descarga atingir a 1a. torre (Casos: 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16) e, também, que a margem de segurança descrito no item 6.2 não foi conseguida para o arranjo inicial de pára-raios (Casos: 19, 20, 21, 22).

Numa tentativa de se conseguir a coordenação adequada, ainda para descargas indiretas, efetuou-se a troca dos pára-raios convencionais simulados até o Caso 22, por outros do tipo óxido de zinco, mantendo-se a princípio a mesma distância em relação aos equipamentos protegidos (Figura 13.1). Mesmo com pára-raios do tipo óxido de zinco a margem de segurança recomendável também não foi conseguida (Casos: 23 e 24).

As simulações prosseguiram, aproximando-se os pára-raios de óxido de zinco dos DCP's de linha (P.R.1 e P.R.2), de 12m para 4m, e dos transformadores de força (P.R.3 e P.R.4), também de 12m para 4m (Figura 13.1). Com este arranjo, as sobretensões desenvolvidas ao longo da subestação para as diferentes configurações nas quais a mesma poderá operar, estarão sempre dentro da margem de segurança recomendável, tanto para descargas diretas quanto para descargas indiretas (Casos: 25 a 41).

Foram também simulados casos de descarga direta supondo a tensão de operação do sistema no momento da queda da descarga igual a $+500/\sqrt{3}$ kV e $-500/\sqrt{3}$ kV (Casos: 42 e 43), de forma a se verificar o exposto no item 9.7.

Finalmente, simulou-se a incidência na subestação de um surto do tipo manobra, verificando-se que as sobretensões desenvolvidas ao longo de toda a subestação apresentarão sempre o mesmo valor (Casos: 44 e 45). Com estes dois casos procurou-se comprovar conforme exposto na Parte 1, e na literatura sobre o assunto, que se a subestação estiver adequadamente protegida para surtos atmosféricos estará também para surtos de manobra.

A seguir, é apresentada uma descrição dos diferentes casos simulados com relação ao tipo de descarga, valor da onda incidente, configuração da subestação e tipo de pára-raios utilizados.

Obs: Por ser a posição relativa da linha 1 idêntica a da linha 2 dentro do arranjo da subestação, ver Figura 13.1, foram simuladas descargas incidentes apenas na linha 1 (haverá sempre situação semelhante para a linha 2 que, naturalmente, não necessitará ser simulada).

Caso 1

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Tempo de Crista = 0,50 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

137
8
J45

Caso 2

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Tempo de Crista = 1,0 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 3

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Tempo de Crista = 2,0 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 4

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Tempo de Crista = 3,0 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios
  Convencionais Externos

Caso 5

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Tempo de Crista = 4,0 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 6

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Tempo de Crista = 0,5 µseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios:
  Convencionais Externos .

Caso 7

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,50 µseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Caso 8

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Tempo de Crista = 0,50 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 9

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Tempo de Crista = 0,5 µseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 10

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 30 kA (descarga subsequente)
  Tempo de Crista = 0,5 µseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios
  Convencionais Externos

Caso 11

- Descarga Indireta na 2a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Tempo de Crista = 0,5 μseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 12

- Descarga Indireta na 2a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 30 kA (descarga subsequente)
  Tempo de Crista = 0,50 μseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 13

- Descarga Indireta na 3a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Tempo de Crista = 0,5 μseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 14

- Descarga Indireta na 3a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 30 kA (descarga subsequente)
  Tempo de Crista = 0,50 µseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 15

- Descarga Indireta na 4a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Tempo de Crista = 0,50 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 16

- Descarga Indireta na 4a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 30 kA (descarga subsequente)
  Tempo de Crista = 0,50 µseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 17

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,5 μseg

- Configuração:
  Transformador 1 fora de operação

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 18

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Transformador 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 19

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Transformadores 1 e 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 20

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,50 µseg

- Configuração:
  Linha 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 21

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,50 µseg

- Configuração:
  Linha 2 e transformador 1 fora de operação

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 22

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,50 µseg

- Configuração:
  Linha 2 e transformador 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Convencionais Externos

Caso 23

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,5 µseg

- Configuração:
  Linha 2 e transformador 1 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos

Caso 24

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,5 µseg

- Configuração:
  Linha 2 e transformador 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos

Caso 25

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,5 μseg

- Configuração:
  Linha 2 e transformador 1 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (aproximados dos DCP's de linhas e dos transformadores de força - de 12m para 4m - Figura 13.1)

Caso 26

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,5 μseg

- Configuração:
  Linha 2 e transformador 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 27

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Transformadores 1 e 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 28

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,50 µseg

- Configuração:
  Linha 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 29

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,50 µseg

- Configuração:
  Transformador 1 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 30

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Taxa de Crescimento = 0,5 μseg

- Configuração:
  Transformador 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 31

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Tempo de Crista = 0,50 μseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 32

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Tempo de Crista = 1,0 μseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 33

- Descarga Indireta na 1a. Torre da Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 200 kA
  Tempo de Crista = 2,0 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 34

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Tempo de Crista = 0,50 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 35

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,50 µseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 36

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,5 μseg

- Configuração:
  Transformador 1 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 37

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,5 μseg

- Configuração:
  Transformador 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 38

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Transformadores 1 e 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 39

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Linha 2 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 40

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Linha 2 e transformador 1 fora de operação

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 41

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Linha 2 e transformador 2 fora de operação

Caso 42

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Obs.: Tensão de operação do sistema no momento da queda da descarga atmosférica: $+500/\sqrt{3}$ kV

Caso 43

- Descarga Direta na Linha 1

- Onda Incidente:
  Amplitude = 2182 kV
  Taxa de Crescimento = 0,50 μseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Obs.: Tensão de operação do sistema no momento da queda da descarga atmosférica: $-500/\sqrt{3}$ kV

Caso 44

- Surto de Manobra

- Onda Incidente:
  Amplitude = 1632 kV (4 pu)
  Taxa de Crescimento = 120 µseg

- Configuração:
  Subestação Completa

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Caso 45

- Surto de Manobra

- Onda Incidente:
  Amplitude = 1632 kV (4 pu)
  Taxa de Crescimento = 120 µseg

- Configuração:
  Linha 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos

- Pára-raios:
  Óxido de Zinco Externos (Idem 25)

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

CAPÍTULO XVI

16.1. Resultados Obtidos

Na Tabela 16.1, a seguir, são apresentados os resultados obtidos nas simulações efetuadas para se chegar a uma coordenação de isolamento adequada, assim como os oscilogramas de tensões para alguns casos selecionados a título de ilustração. Como a forma da onda de tensão é bastante repetitiva não foram apresentados oscilogramas de tensão para todos os casos.

CASO	CONFIGURAÇÃO	PÁRA-RAIOS	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO (kV)													
			PR'S LT 1	BUCHA 1 (LT 1)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 1)	PR'S LT 2	BUCHA 2 (LT 2)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 2)	TERMIN. DE 500kV TRAFO 1	PR'S TRAFO 1	BUCHA 3 (TRAFO 1)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 1	TERMIN. DE 500kV TRAFO 2	PR'S TRAFO 2	BUCHA 4 (TRAFO 2)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 2
1	Subestação completa	convencion. externos	1013	1003	995	1051	1032	1003	1118	1049	988	973	1087	1050	982	949
2	Subestação completa	convencion. externos	1032	1023	1004	1051	1045	1011	1077	1050	1029	1015	1081	1051	1018	1007
3	Subestação completa	convencion. externos	1051	1083	1075	1051	1076	1073	1055	1050	1044	1065	1060	1050	1039	1054
4	Subestação completa	convencion. externos	1050	1072	1088	1050	1073	1090	1059	1050	1068	1079	1059	1051	1068	1085
5	Subestação completa	convencion. externos	1050	1061	1067	1050	1057	1062	1067	1050	1058	1068	1067	1050	1060	1073
6	LT 1 com disj. C.B.1 e C.B.2 abertos	convencion. externos	1106	1450	1487	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	LT 1 com disj. C.B.1 e C.B.2 abertos	óxido de zinco externos	1018	1448	1476	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Subestação completa	convencion. externos	1061	1190	1035	1050	1202	1009	1327	1050	1035	1024	1335	1051	1038	1025
9	LT 1 com disj. C.B.1 e C.B.2 abertos	convencion. externos	1239	1705	1715	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	LT 1 com disj. C.B.1 e C.B.2 abertos	convencion. externos	536	530	523	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	Subestação completa	convencion. externos	1214	1004	994	1054	1014	890	996	899	963	944	1008	902	974	933

TABELA 16.1 - VALORES DE TENSÕES EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO A SF

CASO	CONFIGURAÇÃO	PÁRA-RAIOS	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO (kV)													
			PR'S LT 1	BUCHA 1 (LT 1)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 1)	PR'S LT 2	BUCHA 2 (LT 2)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 2)	TERMIN. DE 500kV TRAFO 1	PR'S TRAFO 1	BUCHA 3 (TRAFO 1)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 1	TERMIN. DE 500kV TRAFO 2	PR'S TRAFO 2	BUCHA 4 (TRAFO 2)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 2
12	LT 1 com disj. C.B.1 e C.B.2 abertos	convencion. externos	478	455	470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	Subestação completa	convencion. externos	990	536	441	645	628	445	522	381	407	440	502	323	392	362
14	LT 1 com disj. C.B.1 e C.B.2 abertos	convencion. externos	473	427	443	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Subestação completa	convencion. externos	867	494	443	608	625	373	470	305	354	373	469	306	452	403
16	LT 1 com disj. C.B.1 e C.B.2 abertos	convencion. externos	465	440	453	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	Trafo 1 fora de operação	convencion. externos	1061	1216	1201	1009	1277	1088	-	-	-	-	1257	1051	1188	1232
18	Trafo 2 fora de operação	convencion. externos	1061	1277	1083	1054	1295	1109	1202	1054	1147	1146	-	-	-	-
19	Trafos 1 e 2 fora de operação	convencion. externos	1061	1234	1156	1034	1381	1241	-	-	-	-	-	-	-	-
20	Linha 2 fora de operação	convencion. externos	1077	1328	1297	-	-	-	1294	1053	1231	1252	1385	1051	1352	1363
21	Linha 2 e trafo 1 fora de operação	convencion. externos	1061	1410	1257	-	-	-	-	-	-	-	1539	1051	1237	1338
22	Linha 2 e trafo 2 fora de operação	convencion. externos	1065	1208	1398	-	-	-	1692	1070	1362	1423	-	-	-	-

TABELA 16.1 - VALORES DE TENSÕES EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO A SF_6
(ANÁLISE DO DESEMPENHO DA SUBESTAÇÃO A SURTOS ATMOSFÉRICOS)

CASO	CONFIGURAÇÃO	PÁRA-RAIOS	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO (kV)													
			PR'S LT 1	BUCHA 1 (LT 1)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 1)	PR'S LT 2	BUCHA 2 (LT 2)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 2)	TERMIN. DE 500kV TRAFO 1	PR'S TRAFO 1	BUCHA 3 (TRAFO 1)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 1	TERMIN. DE 500kV TRAFO 2	PR'S TRAFO 2	BUCHA 4 (TRAFO 2)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 2
23	Linha 2 e trafo 1 fora de operação	óxido de zinco externos	989	1328	1255	-	-	-	-	-	-	-	1590	1002	1256	1365
24	Linha 2 e trafo 2 fora de operação	óxido de zinco externos	992	1290	1451	-	-	-	1733	1013	1405	1429	-	-	-	-
25	Linha 2 e trafo 1 fora de operação	óxido de zinco externos	994	1274	1193	-	-	-	-	-	-	-	1258	1007	1138	1203
26	Linha 2 e trafo 2 fora de operação	óxido de zinco externos	987	1290	1287	-	-	-	1290	1032	1290	1287	-	-	-	-
27	Trafos 1 e 2 fora de operação	óxido de zinco externos	1014	1296	1150	980	1186	1184	-	-	-	-	-	-	-	-
28	Linha 2 fora de operação	óxido de zinco externos	959	1144	1105	-	-	-	1063	962	1134	1137	1149	989	1177	1220
29	Trafo 1 fora de operação	óxido de zinco externos	966	1146	1093	992	1217	1132	-	-	-	-	1130	954	1108	1109
30	Trafo 2 fora de operação	óxido de zinco externos	981	1267	1071	990	1218	1117	1052	916	1135	1164	-	-	-	-
31	Subestação completa	óxido de zinco externos	935	1047	1070	1003	1262	1067	1025	912	1070	1128	1026	910	1152	1146
32	Subestação completa	óxido de zinco externos	913	1084	1065	984	1151	1036	958	893	1044	1014	953	892	1074	1080

TABELA 16.1 - VALORES DE TENSÕES EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO A SF_6
(ANÁLISE DO DESEMPENHO DA SUBESTAÇÃO A SURTOS ATMOSFÉRICOS)

CASO	CONFIGURAÇÃO	PÁRA-RAIOS	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO (kV)													
			PR'S LT 1	BUCHA 1 (LT 1)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 1)	PR'S LT 2	BUCHA 2 (LT 2)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 2)	TERMIN. DE 500kV TRAFO 1	PR'S TRAFO 1	BUCHA 3 (TRAFO 1)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 1	TERMIN. DE 500kV TRAFO 2	PR'S TRAFO 2	BUCHA 4 (TRAFO 2)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 2
33	Subestação completa	óxido de zinco externos	882	976	960	877	991	967	904	881	993	968	906	883	987	993
34	Subestação completa	óxido de zinco externos	859	867	868	862	877	873	880	862	862	863	886	867	864	865
35	LT 1 com disj. C.B.1 e C.B.2 abertos	óxido de zinco externos	997	1233	1269	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	Trafo 1 fora de operação	óxido de zinco externos	874	898	918	887	898	892	-	-	-	-	895	879	892	892
37	Trafo 2 fora de operação	óxido de zinco externos	880	906	907	893	913	893	897	877	900	905	-	-	-	-
38	Trafos 1 e 2 fora de operação	óxido de zinco externos	901	928	924	922	977	956	-	-	-	-	-	-	-	-
39	Linha 2 fora de operação	óxido de zinco externos	906	970	990	-	-	-	949	907	910	897	907	885	901	902
40	Linha 2 e trafo 1 fora de operação	óxido de zinco externos	942	1032	1001	-	-	-	-	-	-	-	959	920	988	1003
41	Linha 2 e trafo 2 fora de operação	óxido de zinco externos	933	1012	1034	-	-	-	1021	928	963	987	-	-	-	-
42	Subestação completa	óxido de zinco externos	868	902	898	899	920	898	894	867	881	887	902	870	890	884

TABELA 16.1 - VALORES DE TENSÕES EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO A SF_6
(ANÁLISE DO DESEMPENHO DA SUBESTAÇÃO A SURTOS ATMOSFÉRICOS)

CASO	CONFIGURAÇÃO	PÁRA-RAIOS	VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO (kV)													
			PR'S LT 1	BUCHA 1 (LT 1)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 1)	PR'S LT 2	BUCHA 2 (LT 2)	INTERNA AO SF_6 (LINHA 2)	TERMIN. DE 500kV TRAFO 1	PR'S TRAFO 1	BUCHA 3 (TRAFO 1)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 1	TERMIN. DE 500kV TRAFO 2	PR'S TRAFO 2	BUCHA 4 (TRAFO 2)	INTERNA AO SF_6 TRAFO 2
43	Subestação completa	óxido de zinco externos	850	864	846	835	853	849	846	837	842	843	847	838	844	846
44	Subestação completa	óxido de zinco externos	863	863	863	863	863	863	863	863	863	863	863	863	863	863
45	LT 1 com disjuntores C.B.1 e C.B.2 abertos	óxido de zinco externos	959	959	959	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TABELA 16.1 - VALORES DE TENSÕES EM DIFERENTES PONTOS DA SUBESTAÇÃO A SF_6
(ANÁLISE DO DESEMPENHO DA SUBESTAÇÃO A SURTOS ATMOSFÉRICOS)

OSCILOGRAMAS DE TENSÕES AO LONGO DA SUBESTAÇÃO ISOLADA A SF_6 OBTIDOS NOS CASOS: 3, 6, 31, 42, 43 e 45

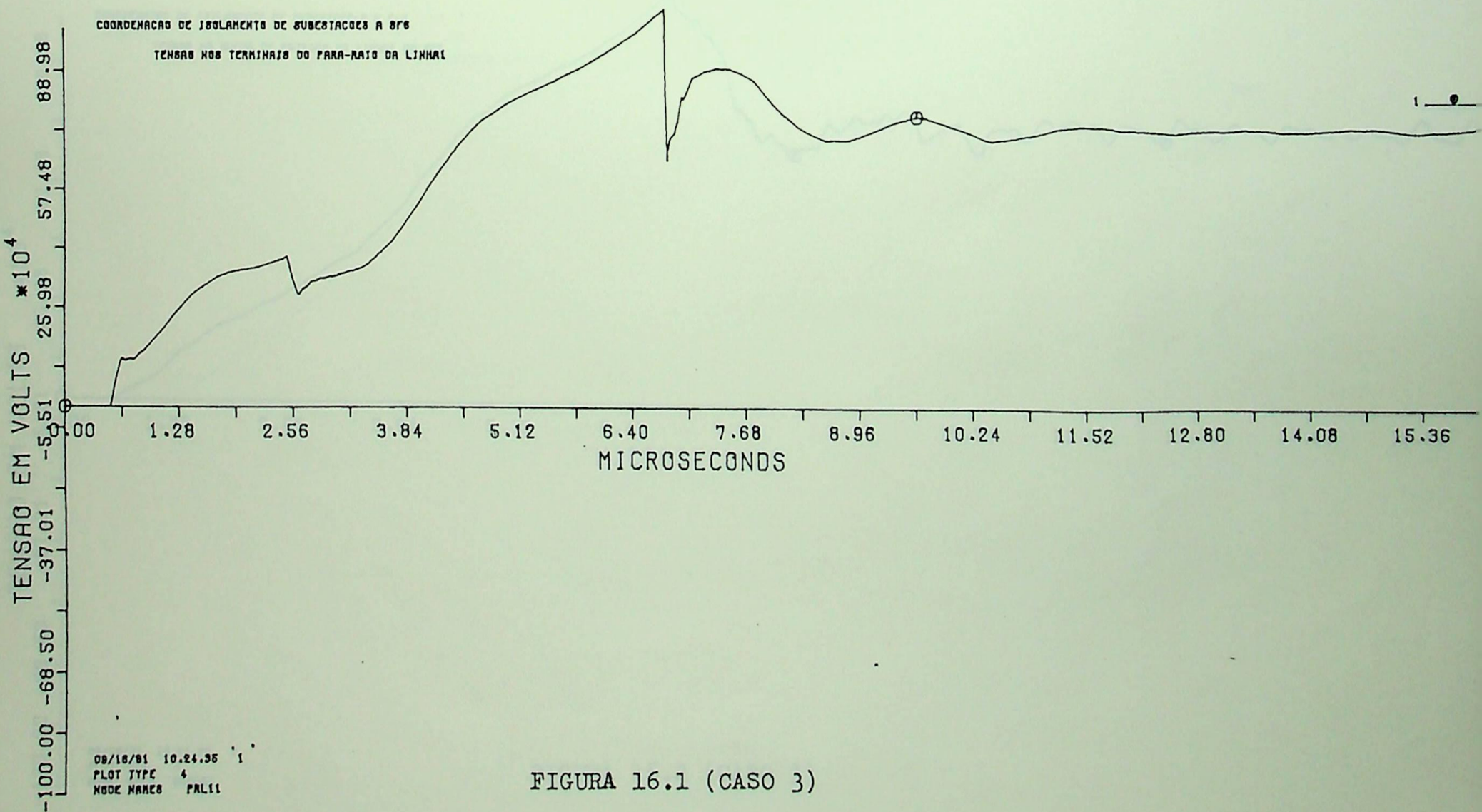


FIGURA 16.1 (CASO 3)

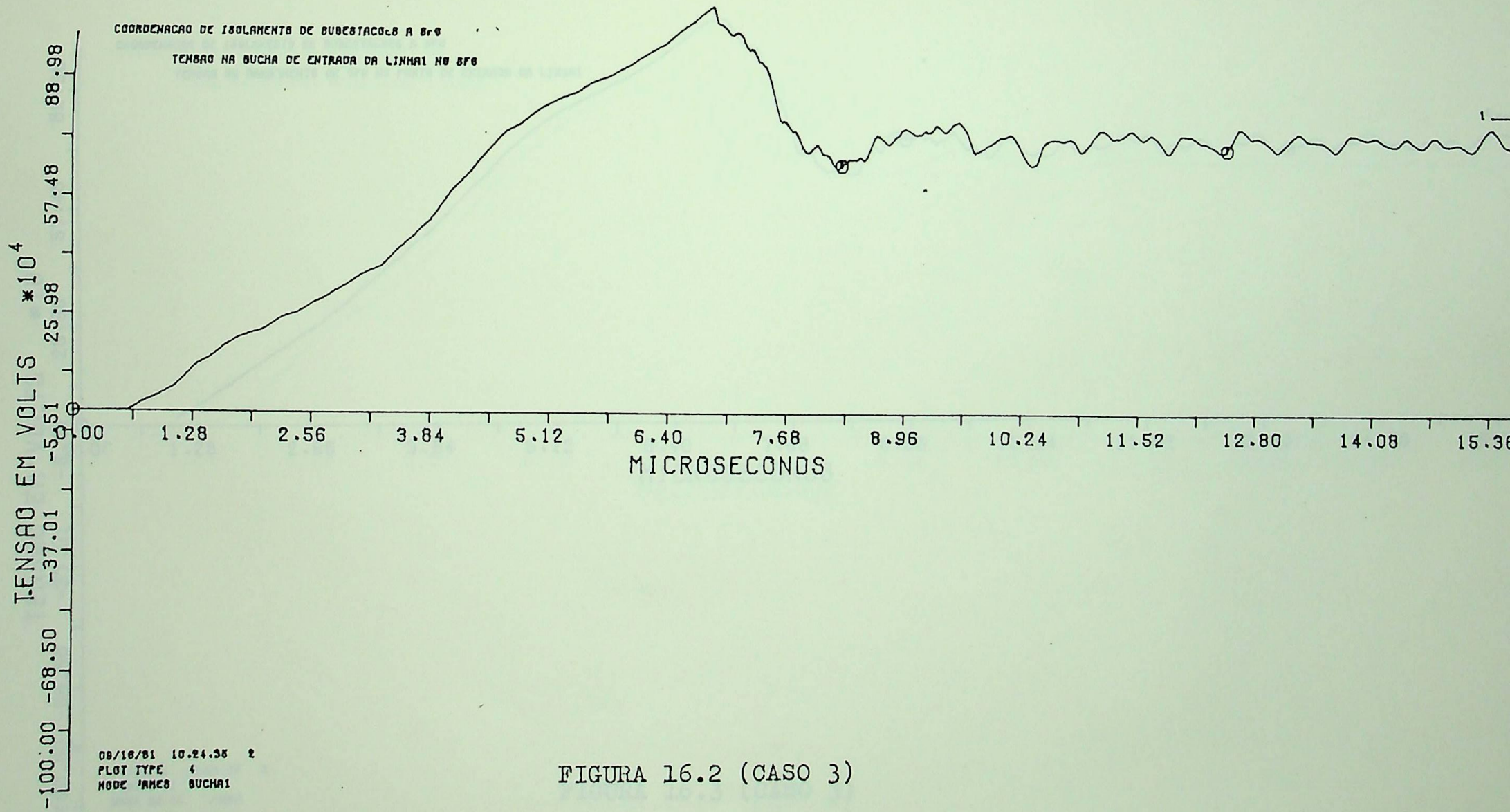


FIGURA 16.2 (CASO 3)

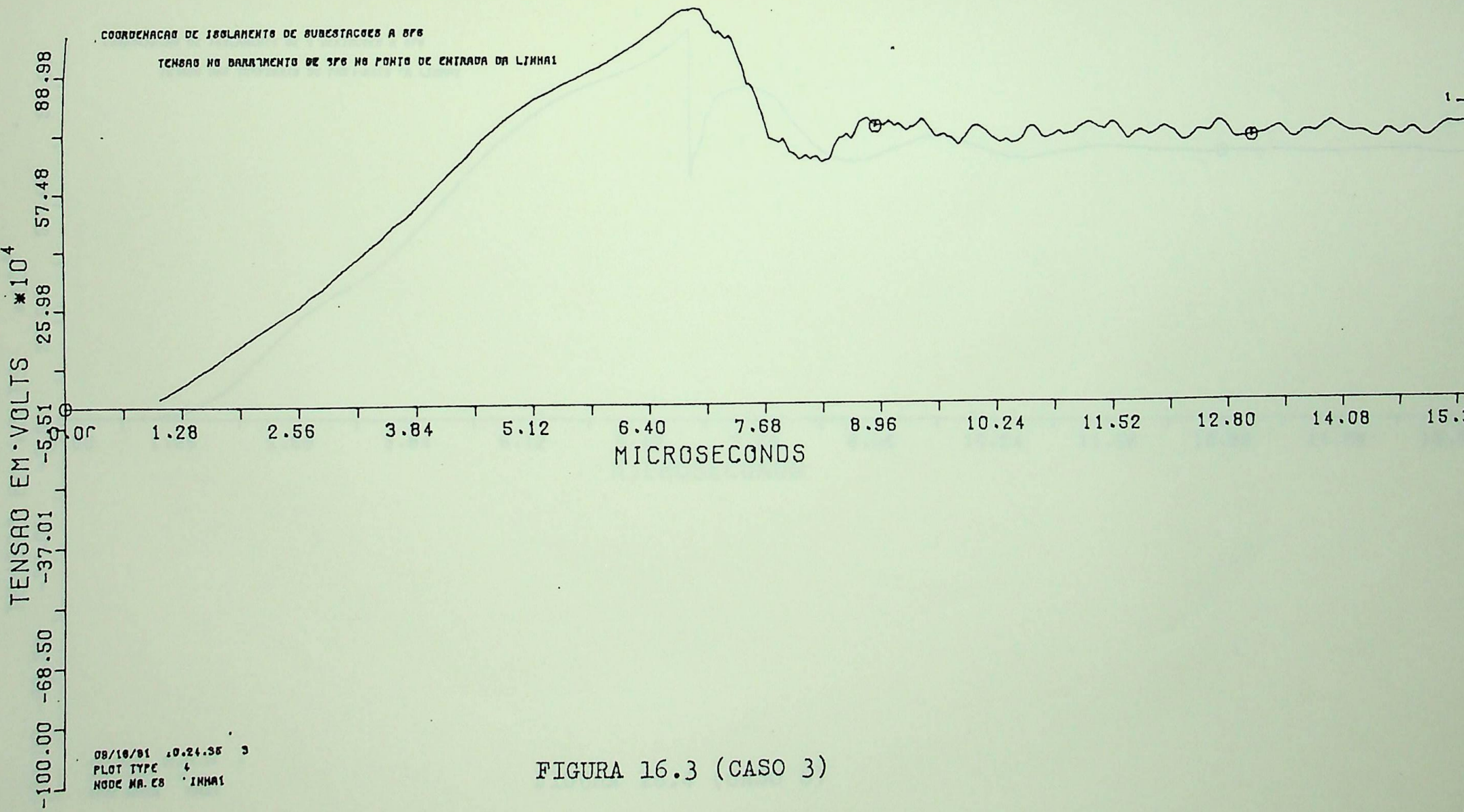


FIGURA 16.3 (CASO 3)

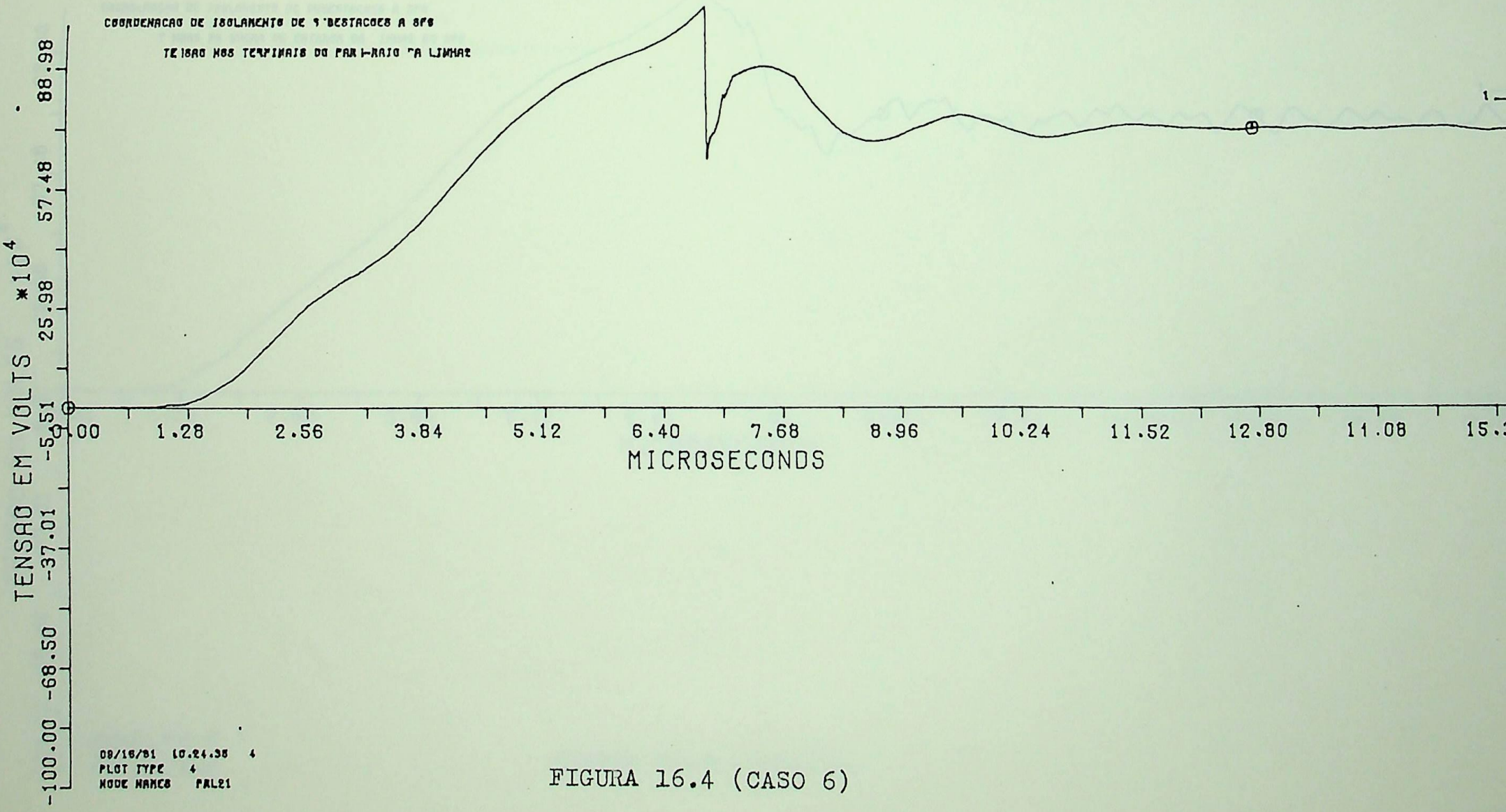


FIGURA 16.4 (CASO 6)

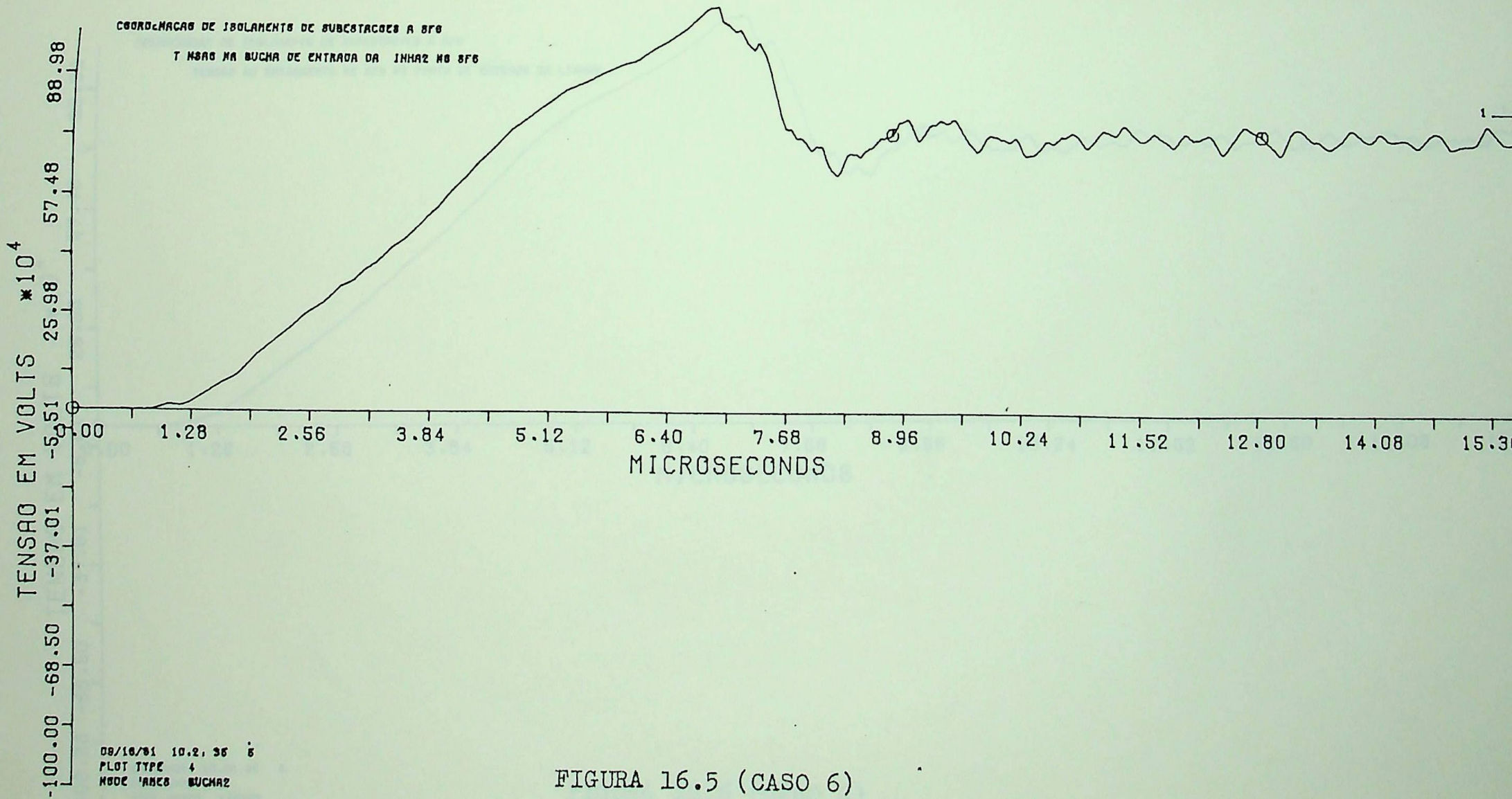


FIGURA 16.5 (CASO 6)

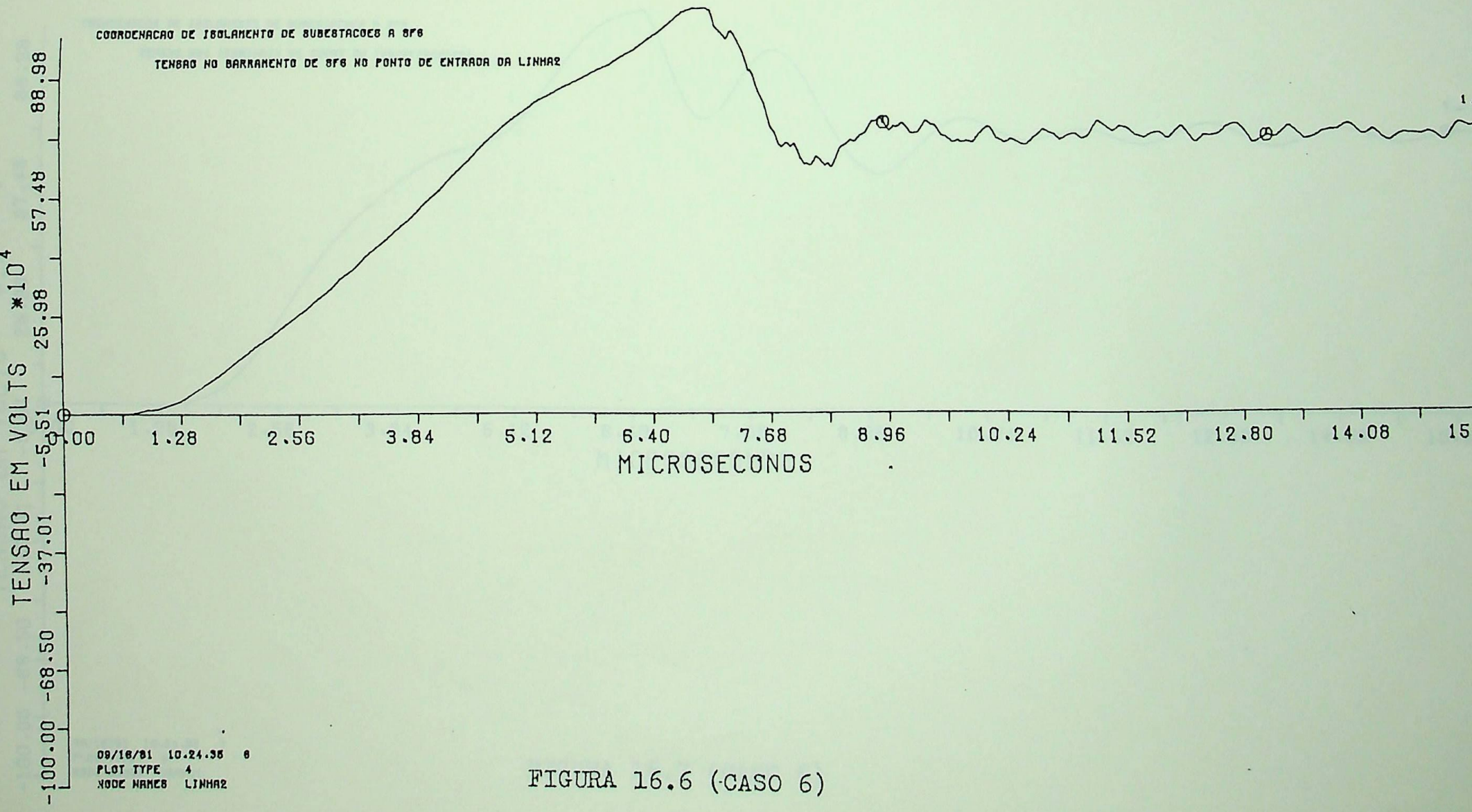


FIGURA 16.6 (CASO 6)

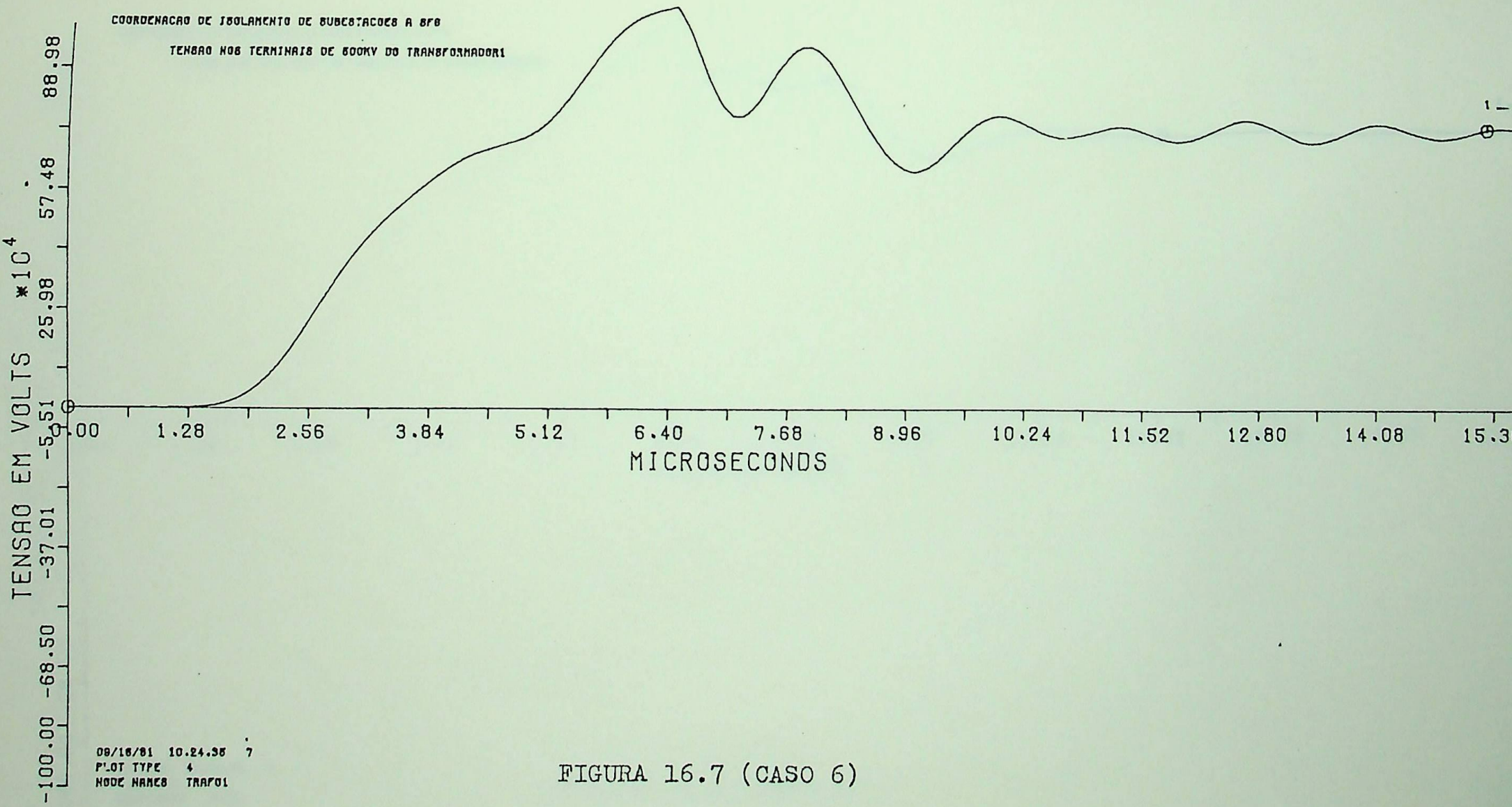


FIGURA 16.7 (CASO 6)

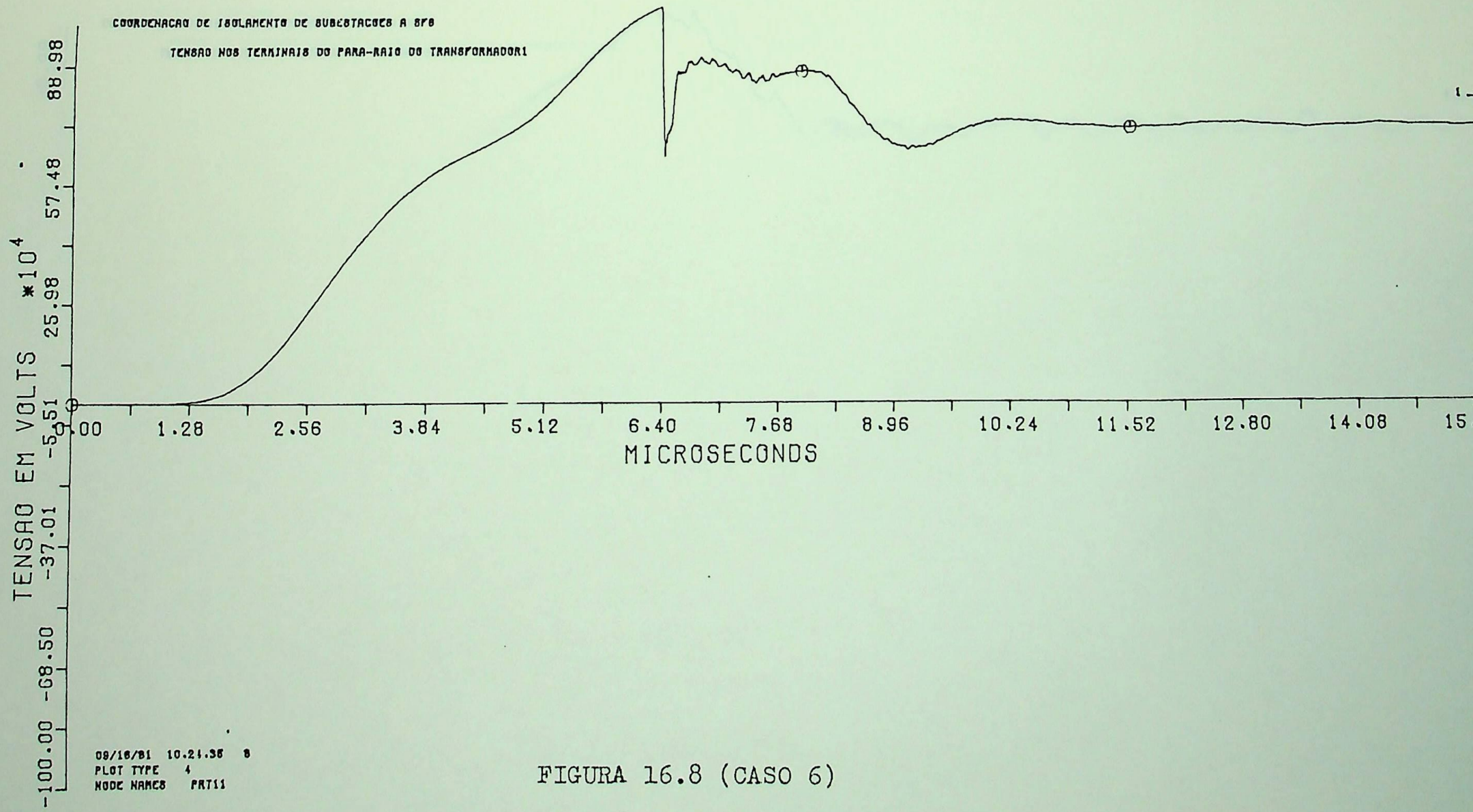


FIGURA 16.8 (CASO 6)

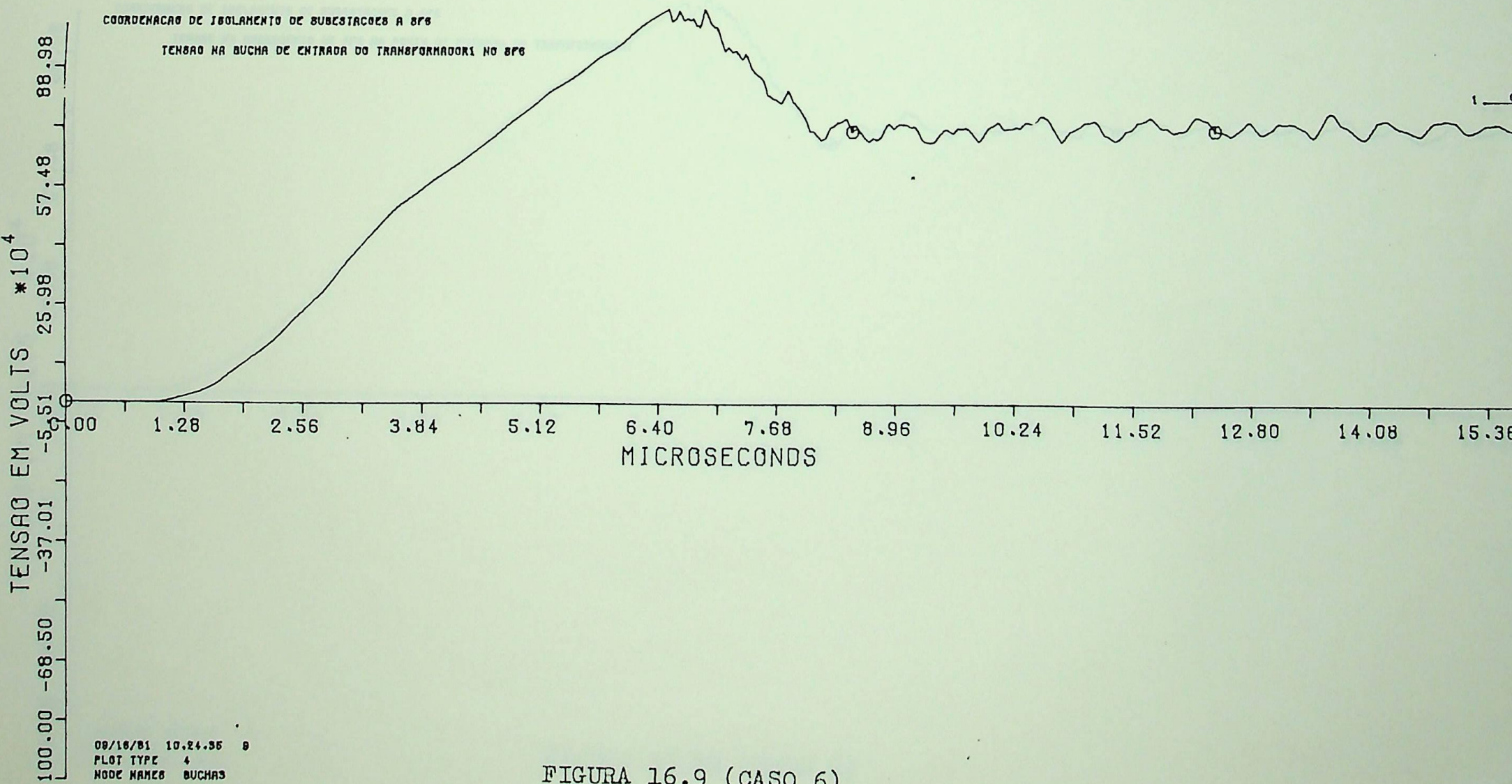


FIGURA 16.9 (CASO 6)

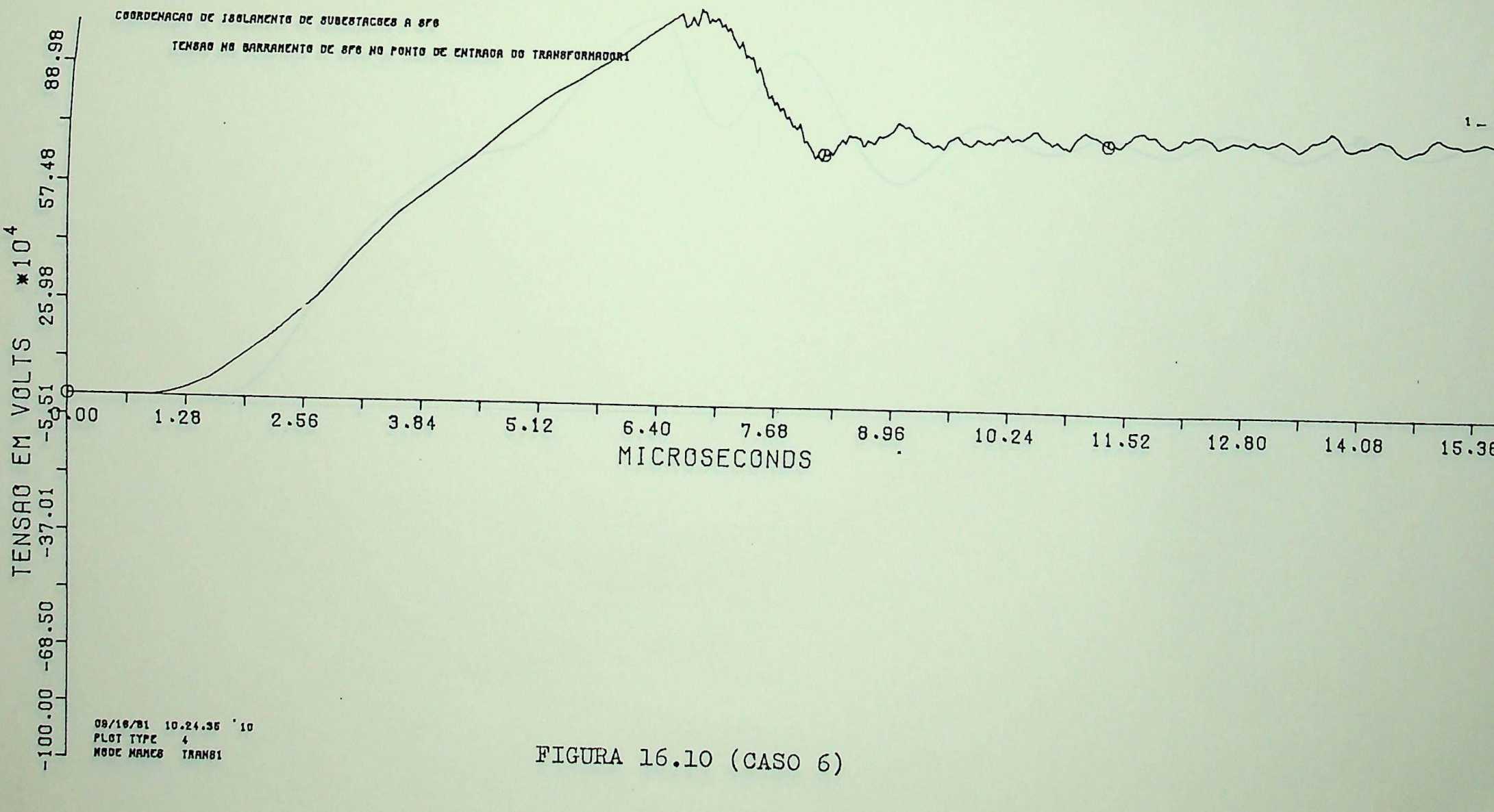


FIGURA 16.10 (CASO 6)

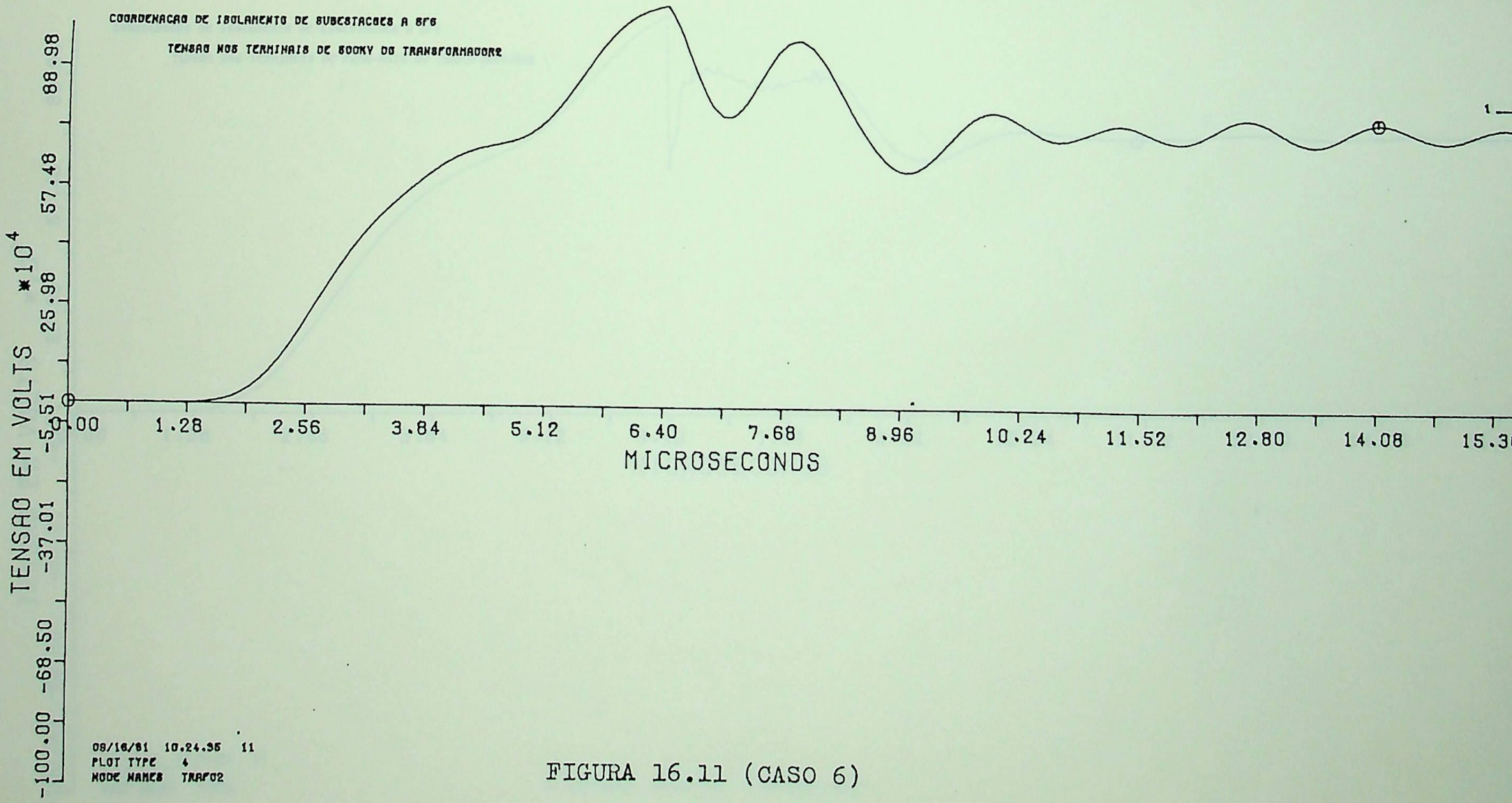


FIGURA 16.11 (CASO 6)

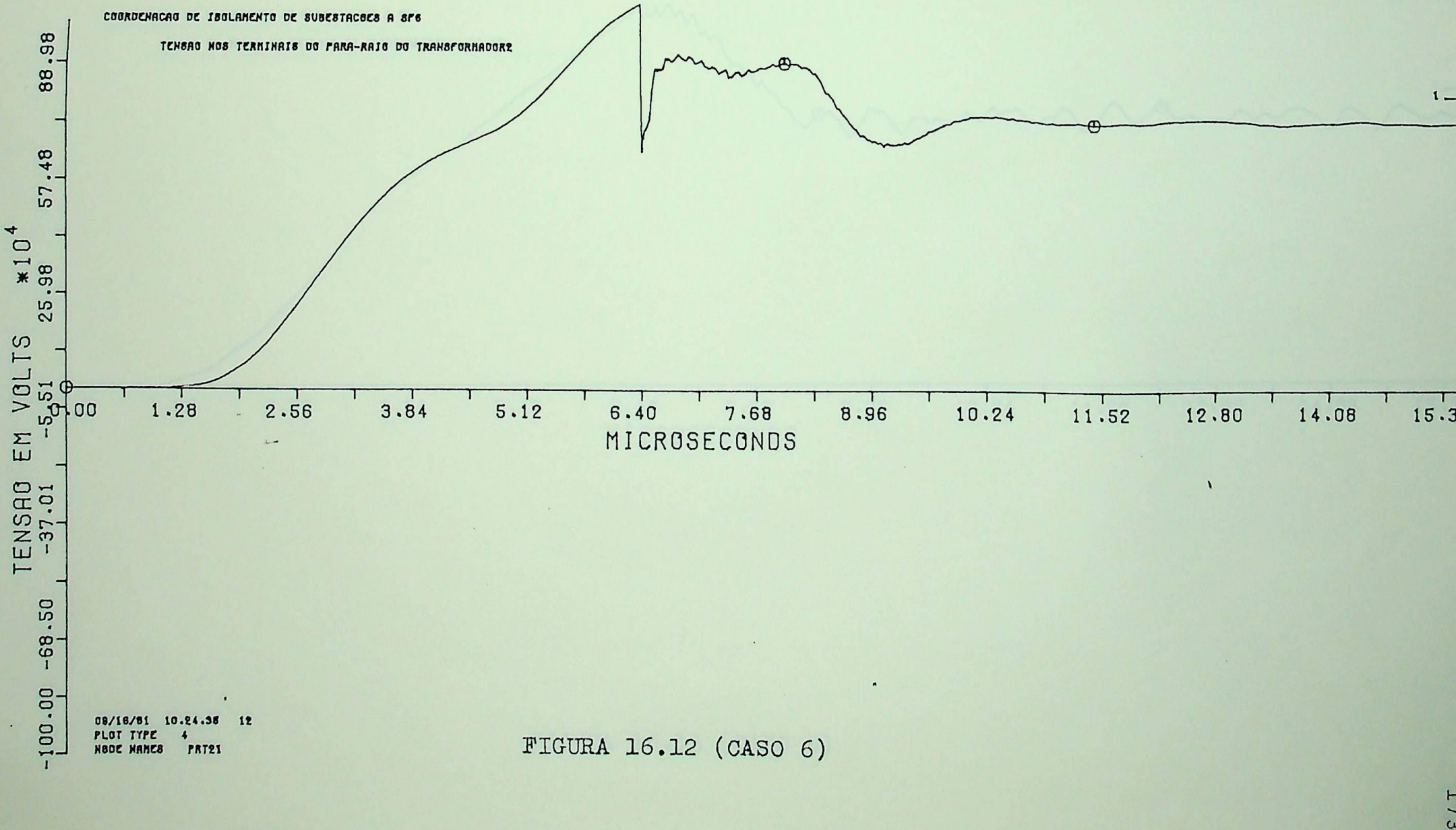


FIGURA 16.12 (CASO 6)

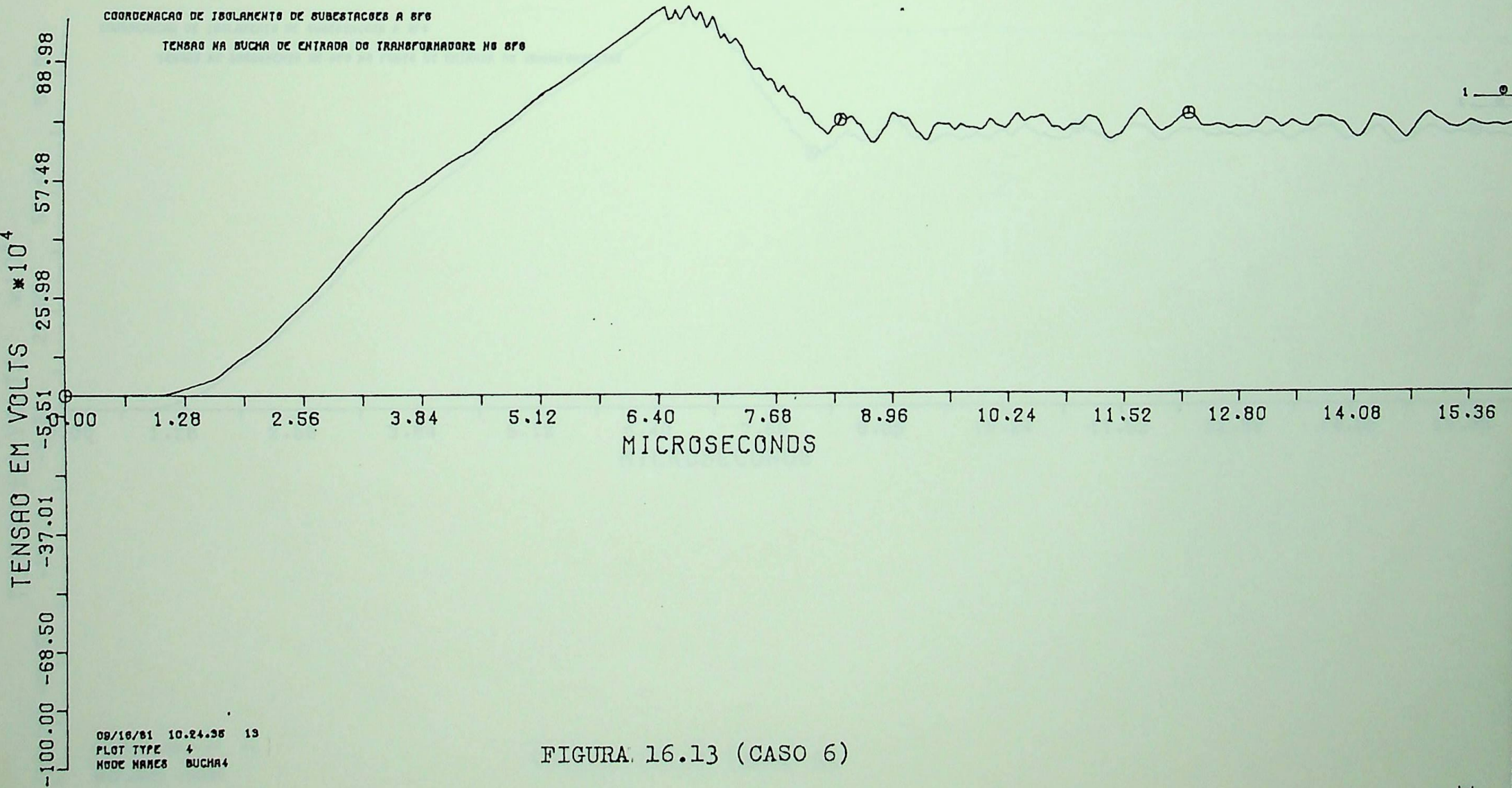


FIGURA 16.13 (CASO 6)

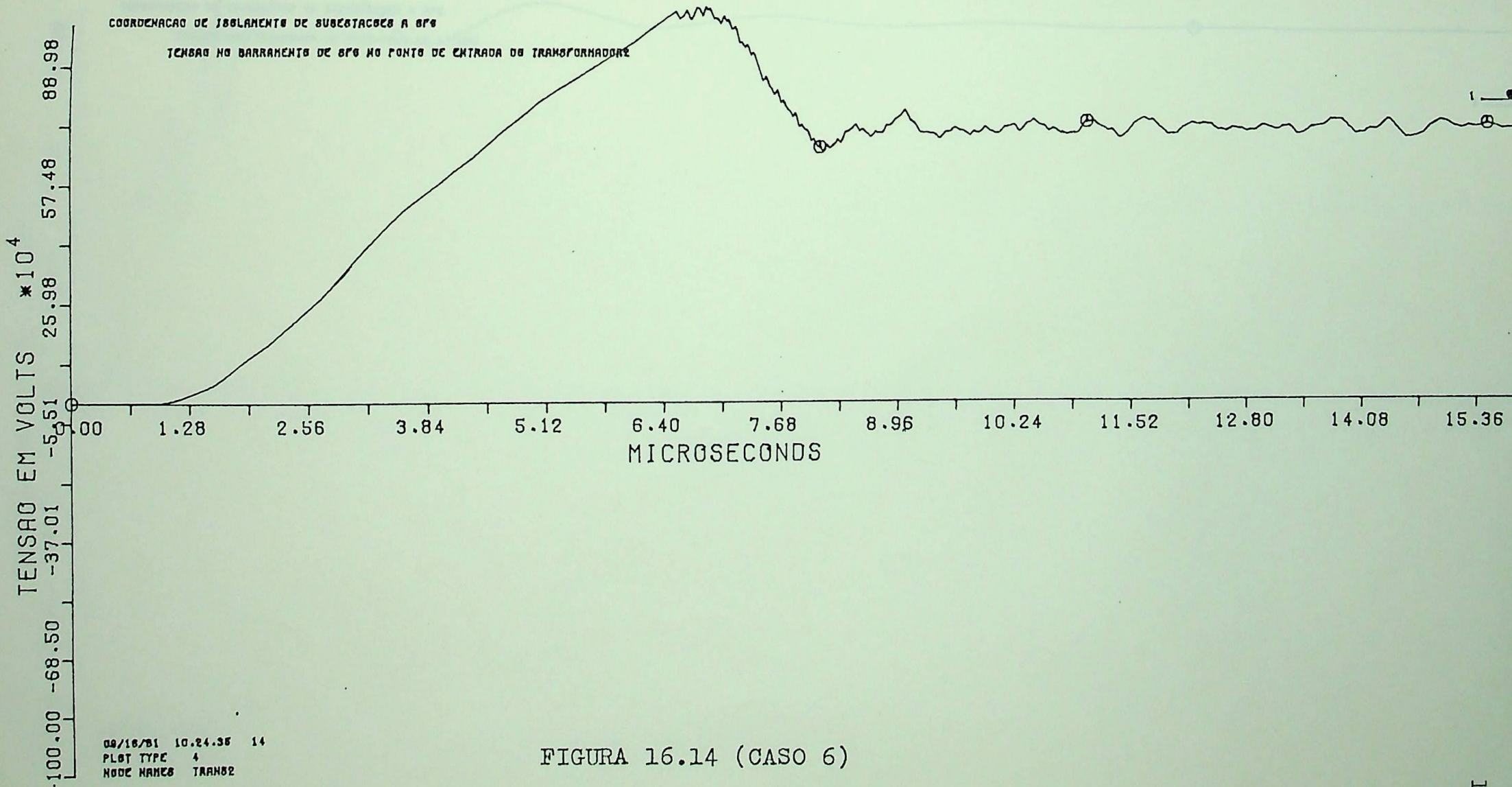


FIGURA 16.14 (CASO 6)

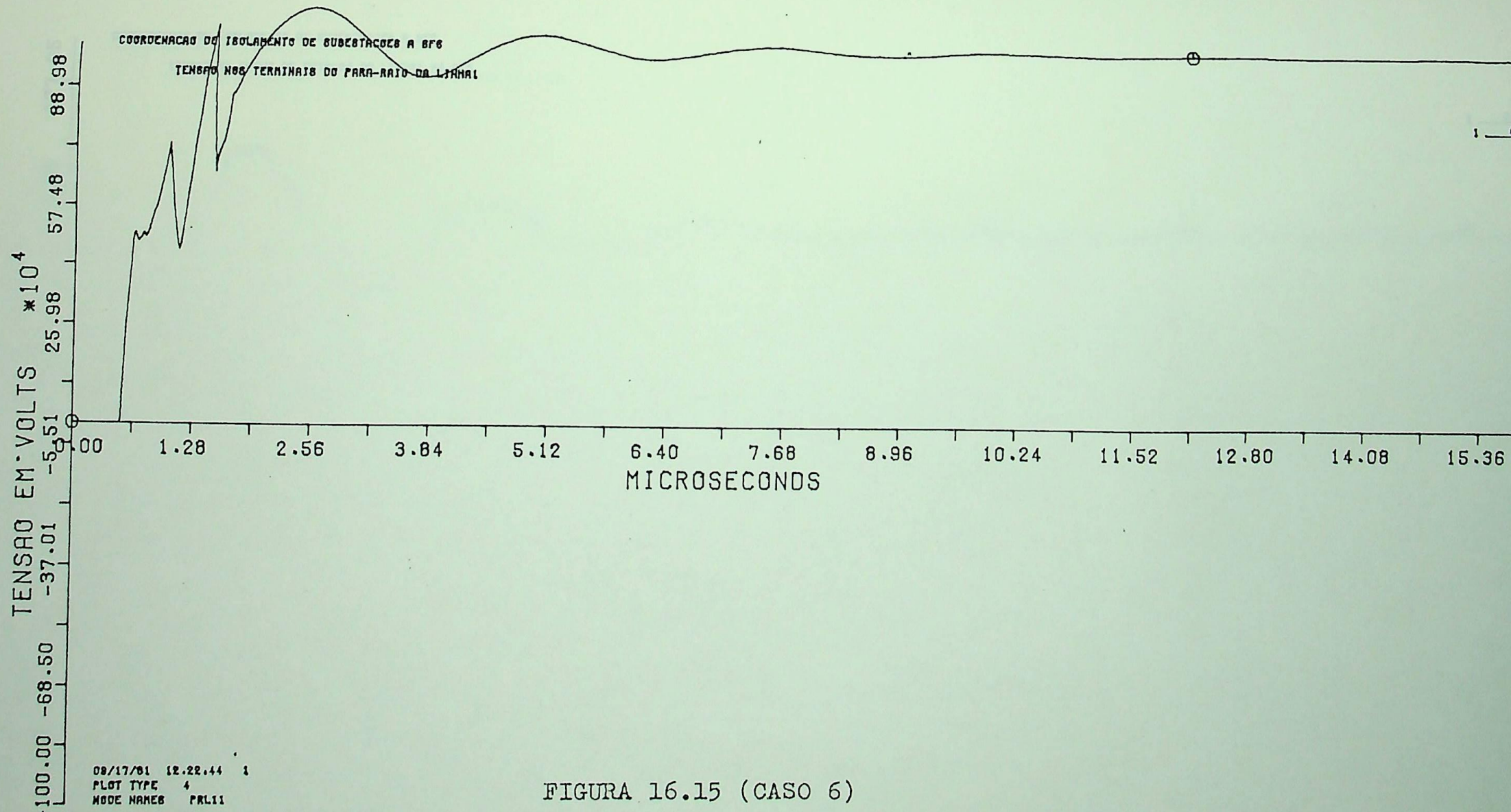


FIGURA 16.15 (CASO 6)

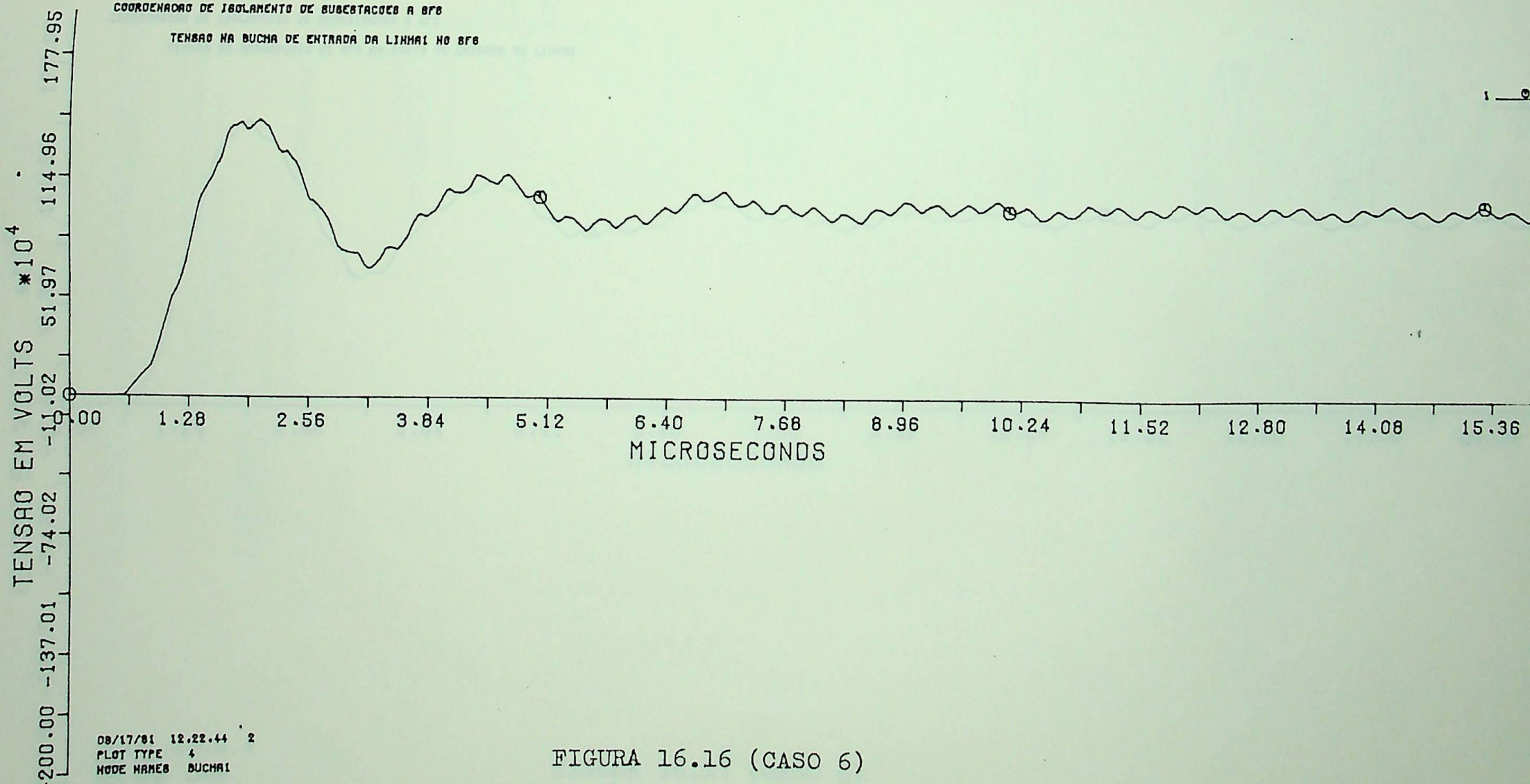


FIGURA 16.16 (CASO 6)

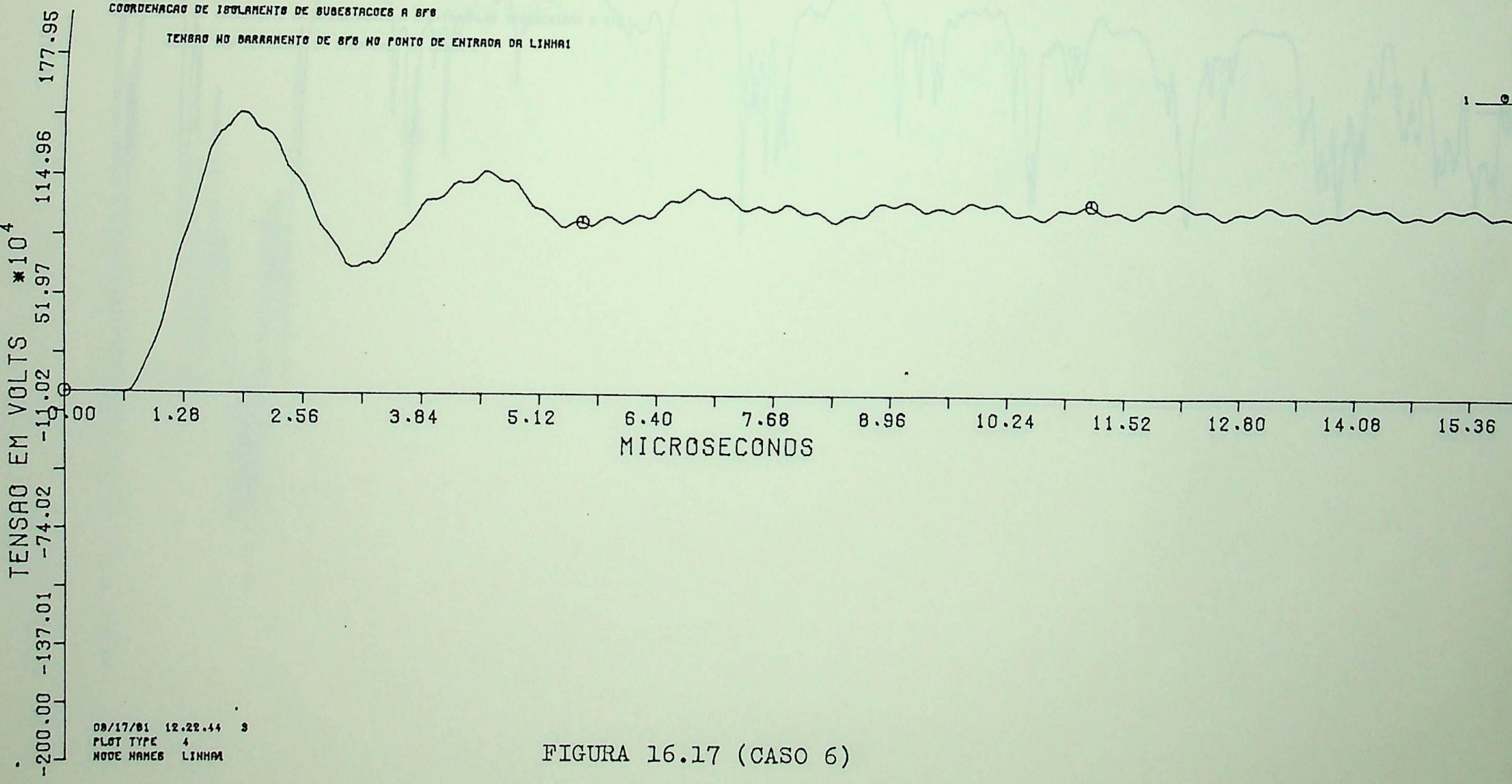


FIGURA 16.17 (CASO 6)

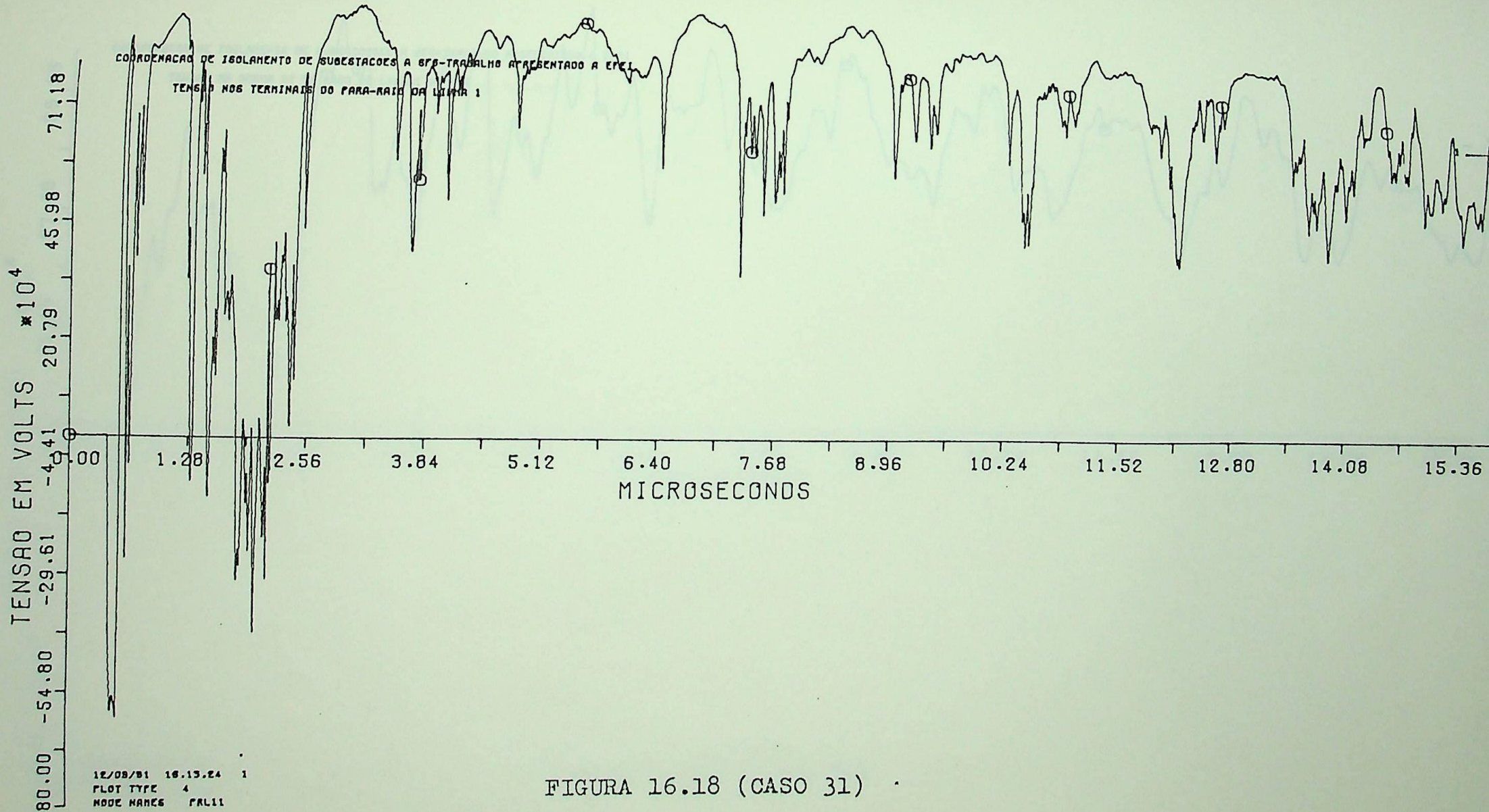


FIGURA 16.18 (CASO 31)

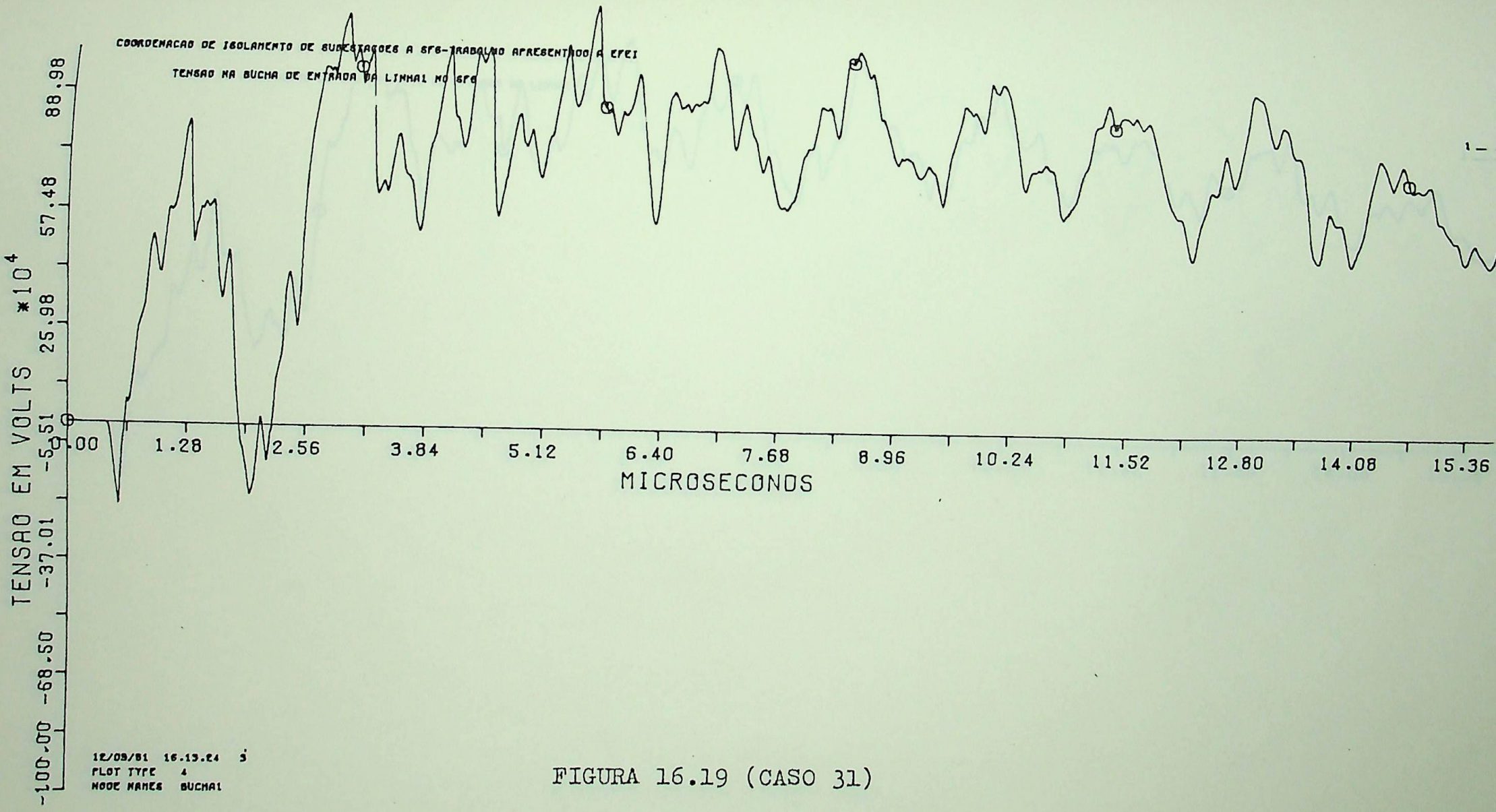


FIGURA 16.19 (CASO 31)

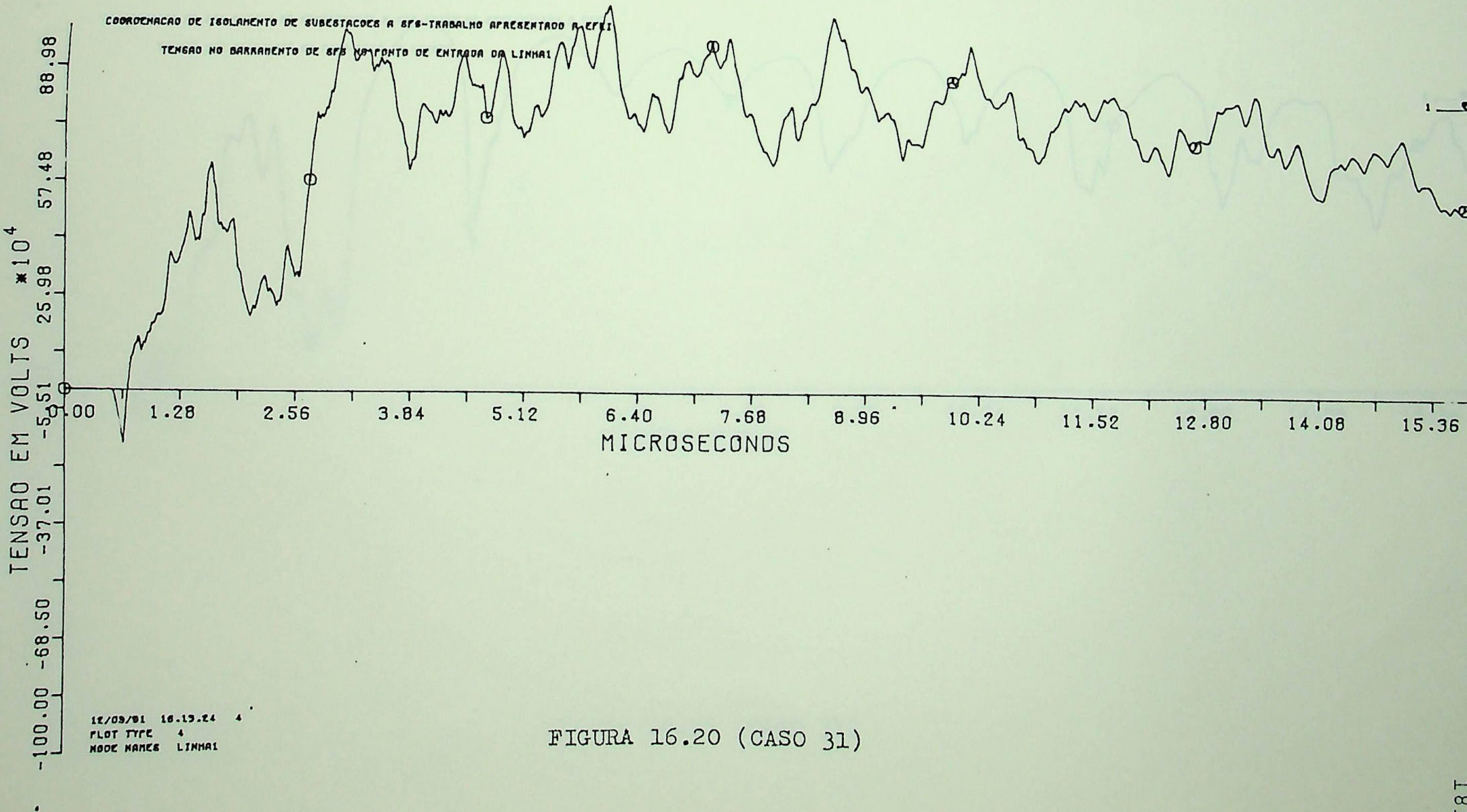


FIGURA 16.20 (CASO 31)

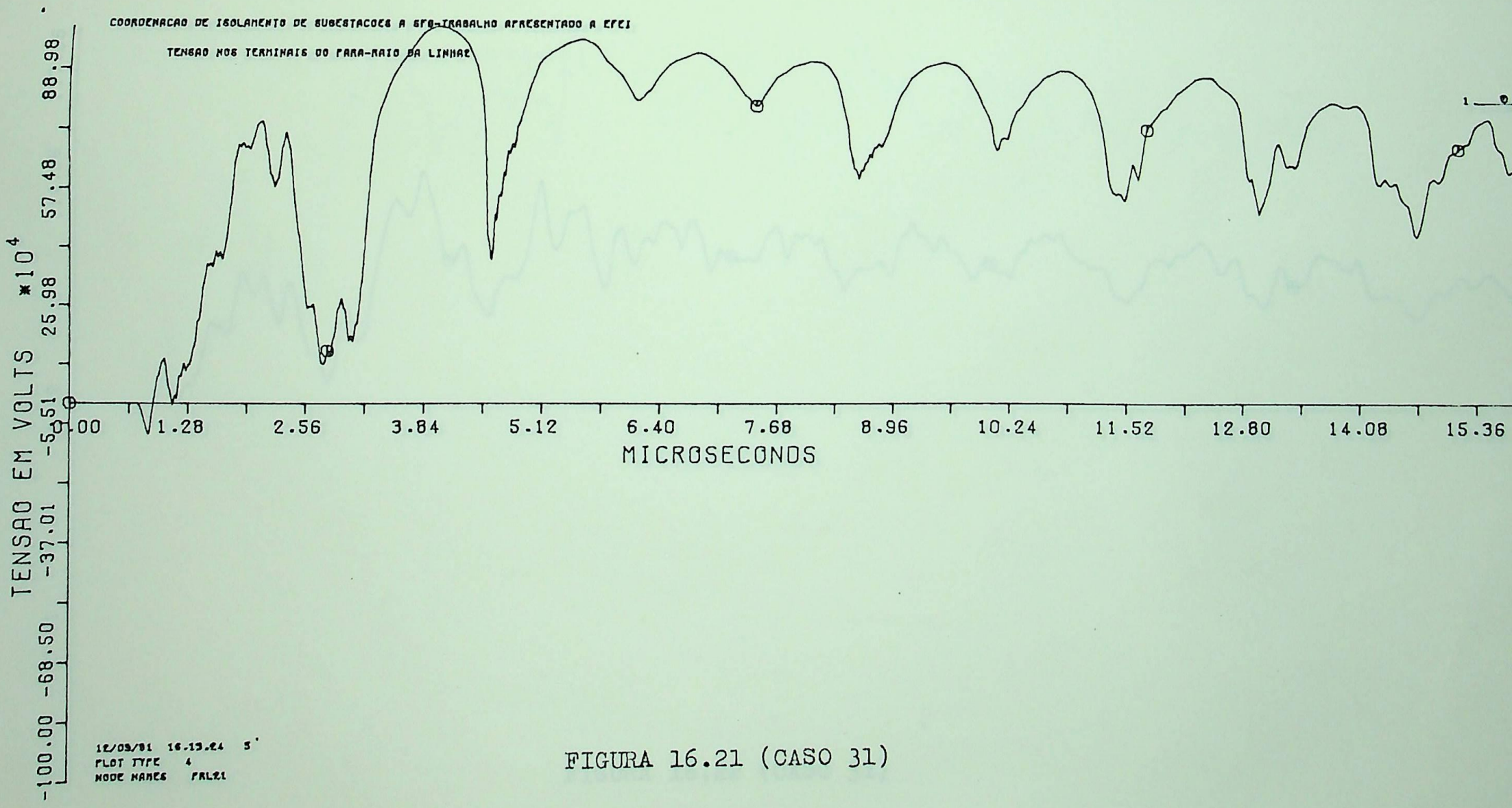


FIGURA 16.21 (CASO 31)

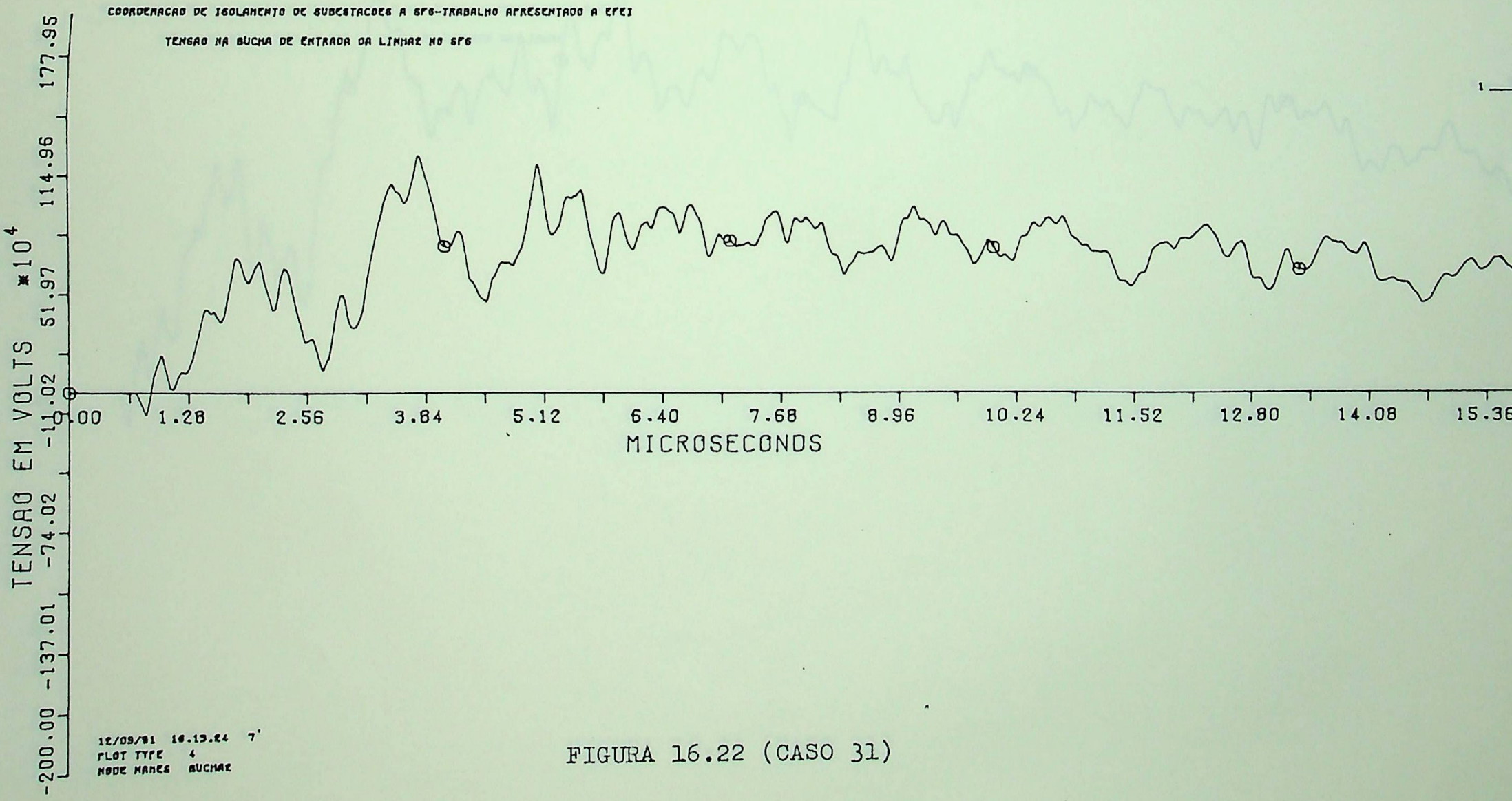


FIGURA 16.22 (CASO 31)

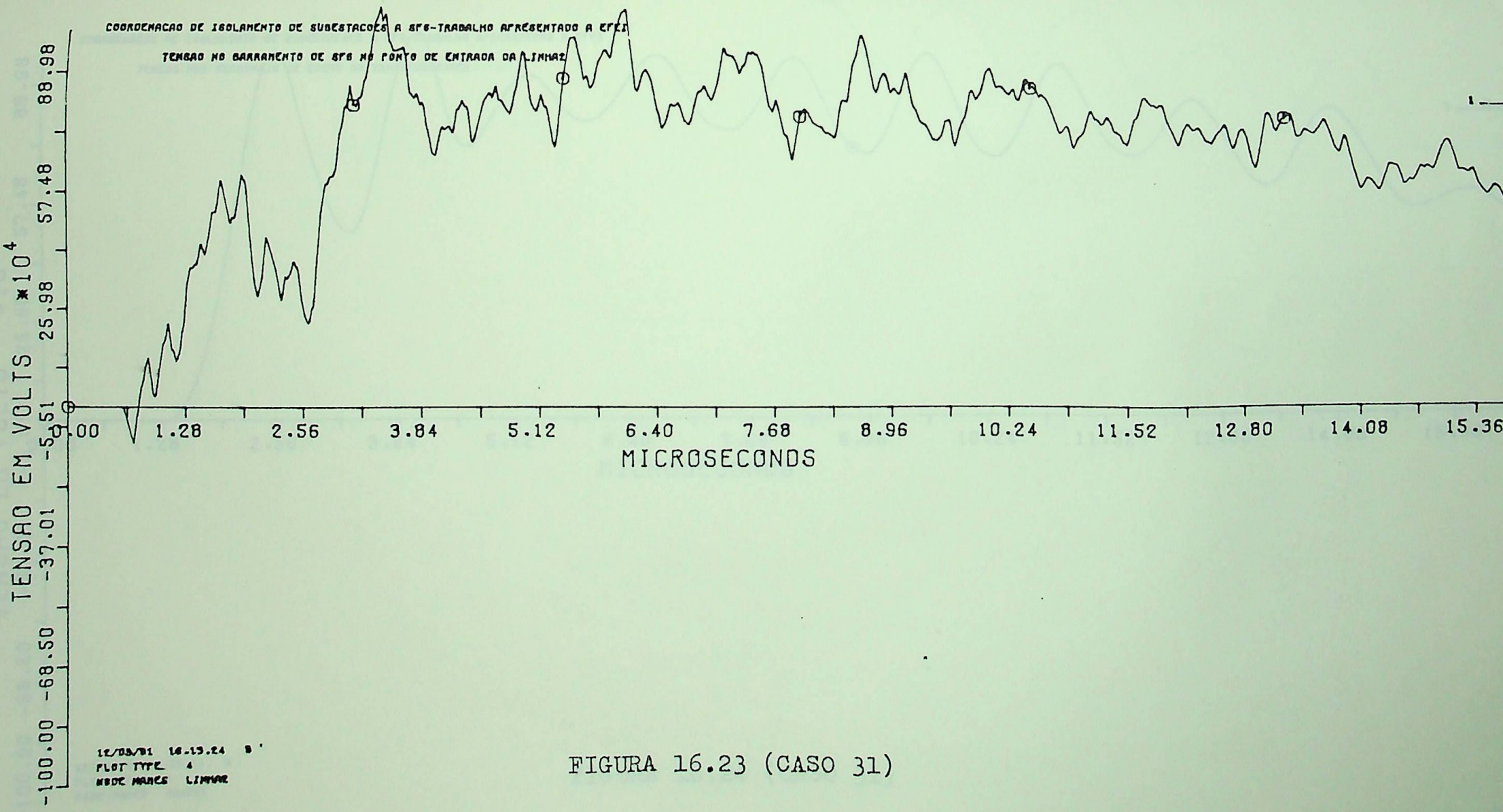


FIGURA 16.23 (CASO 31)

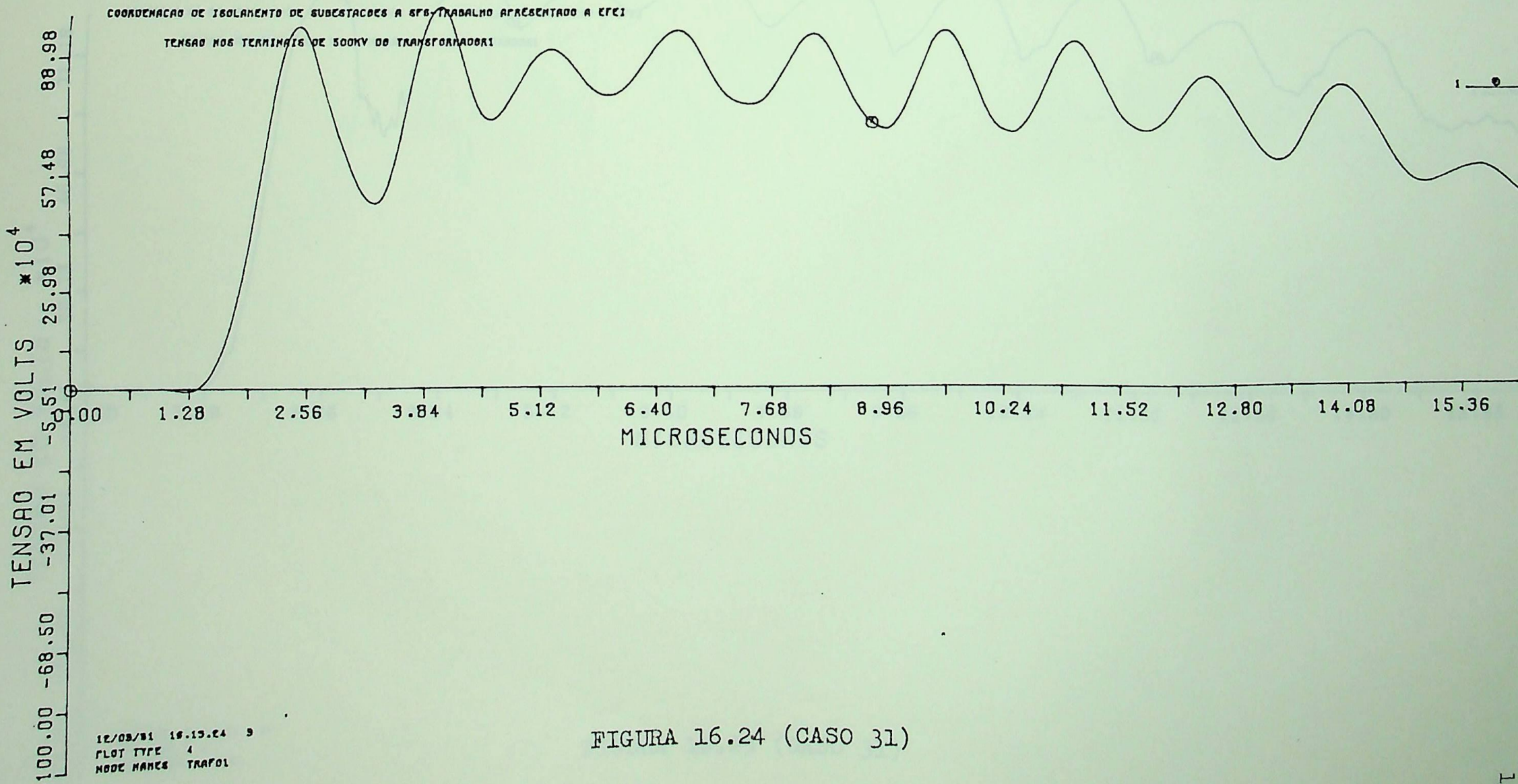


FIGURA 16.24 (CASO 31)

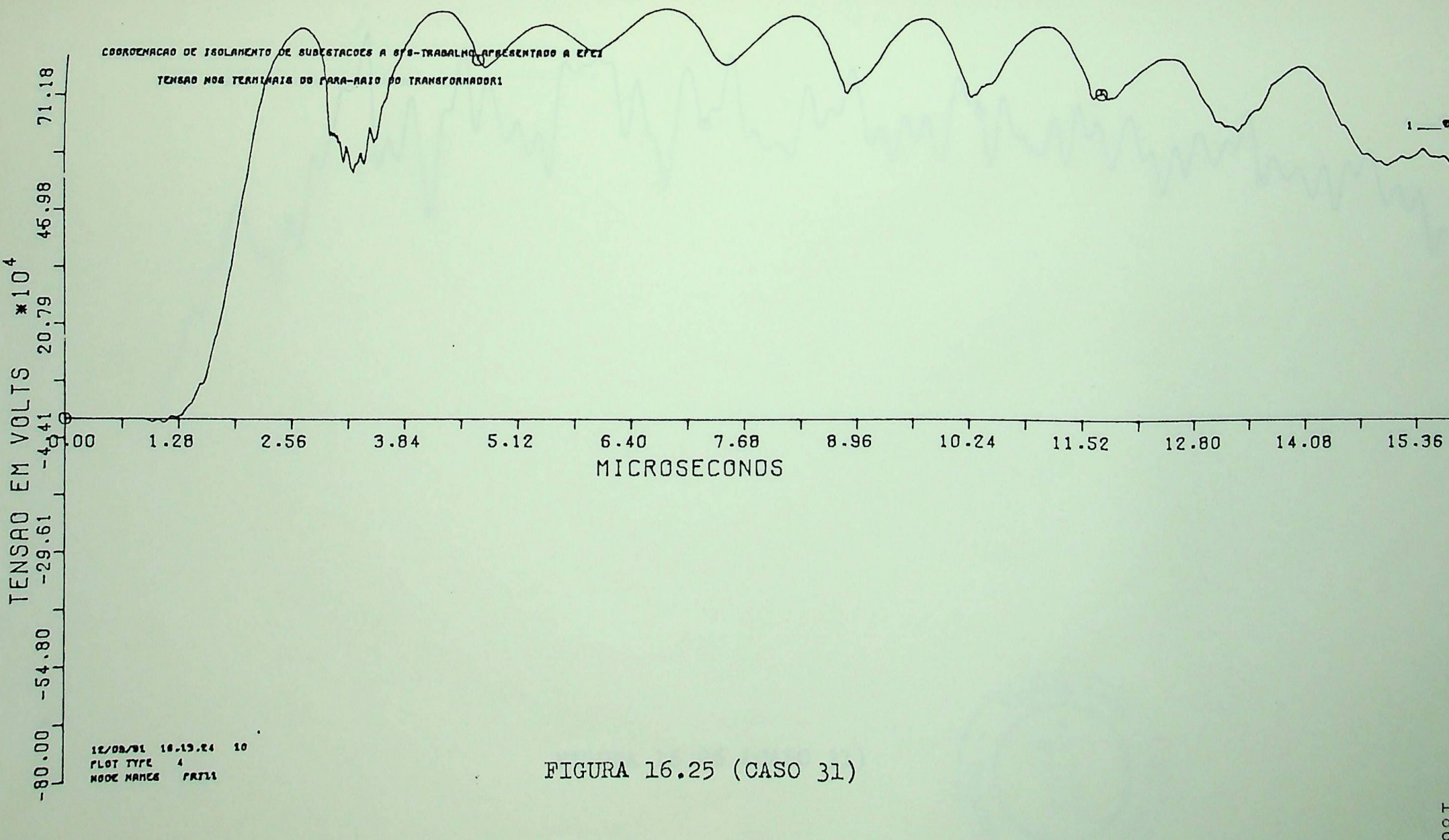


FIGURA 16.25 (CASO 31)

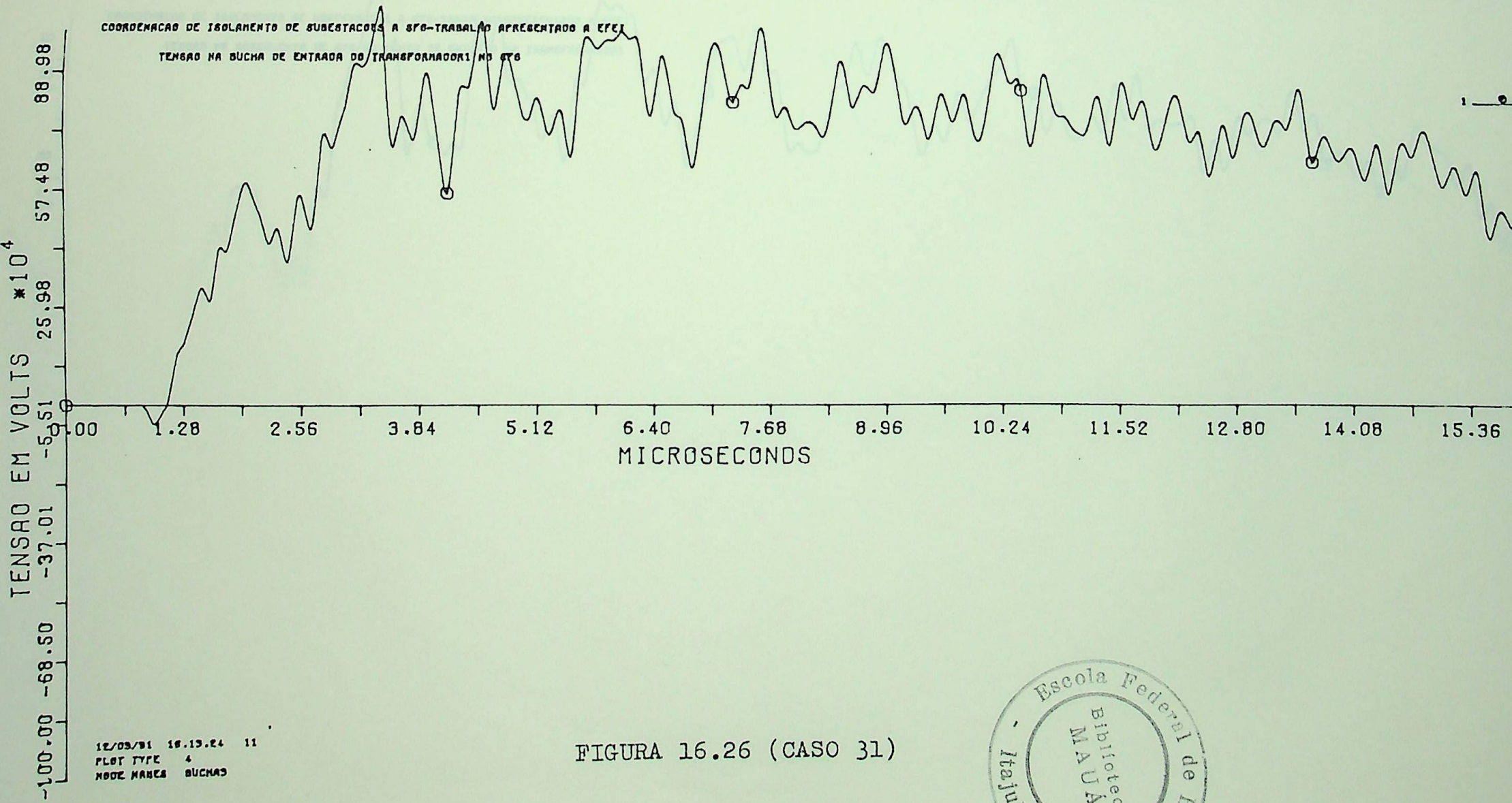


FIGURA 16.26 (CASO 31)

Escola Federal de Engenharia - Itajubá
Biblioteca MAUÁ

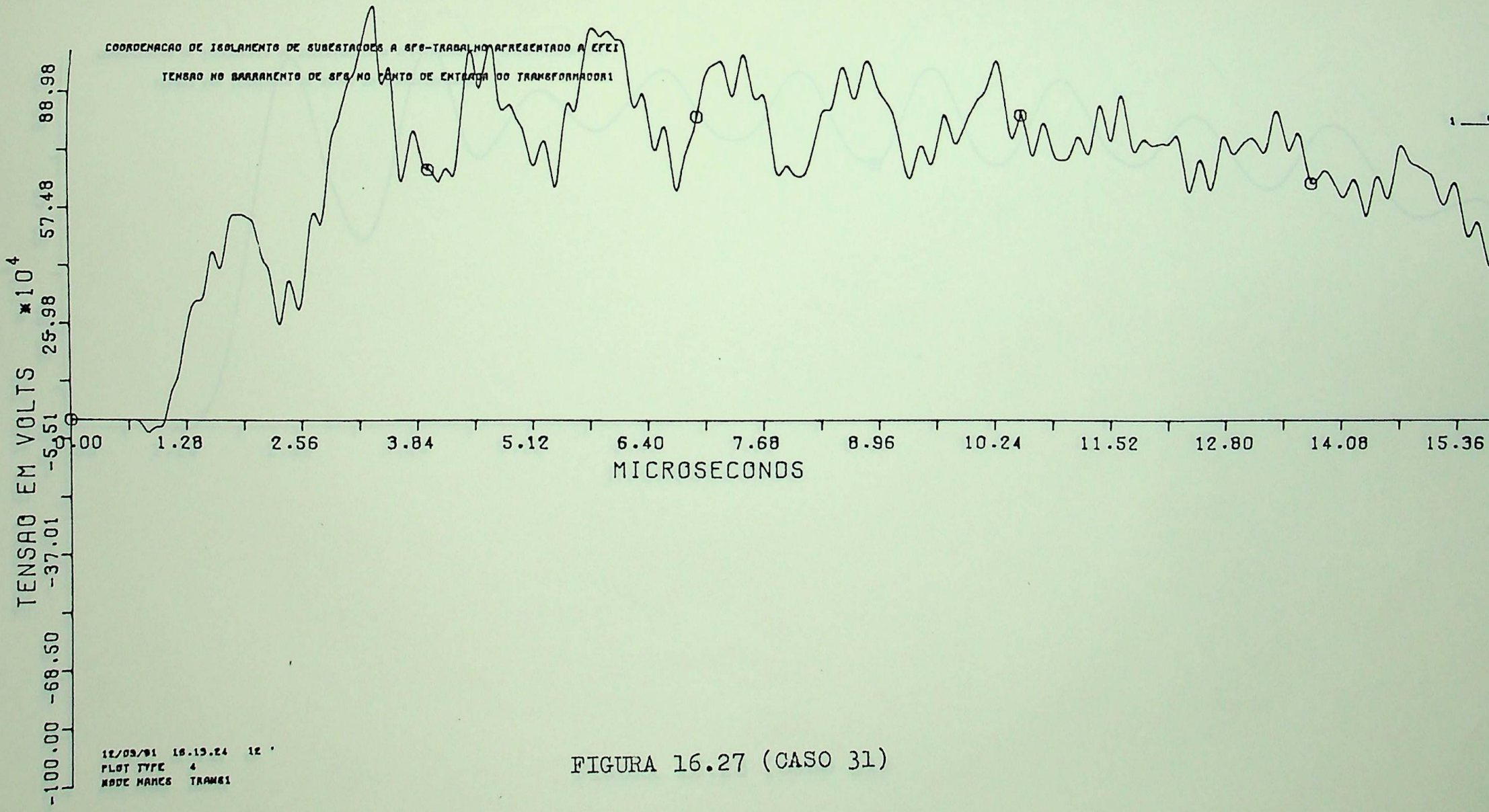


FIGURA 16.27 (CASO 31)

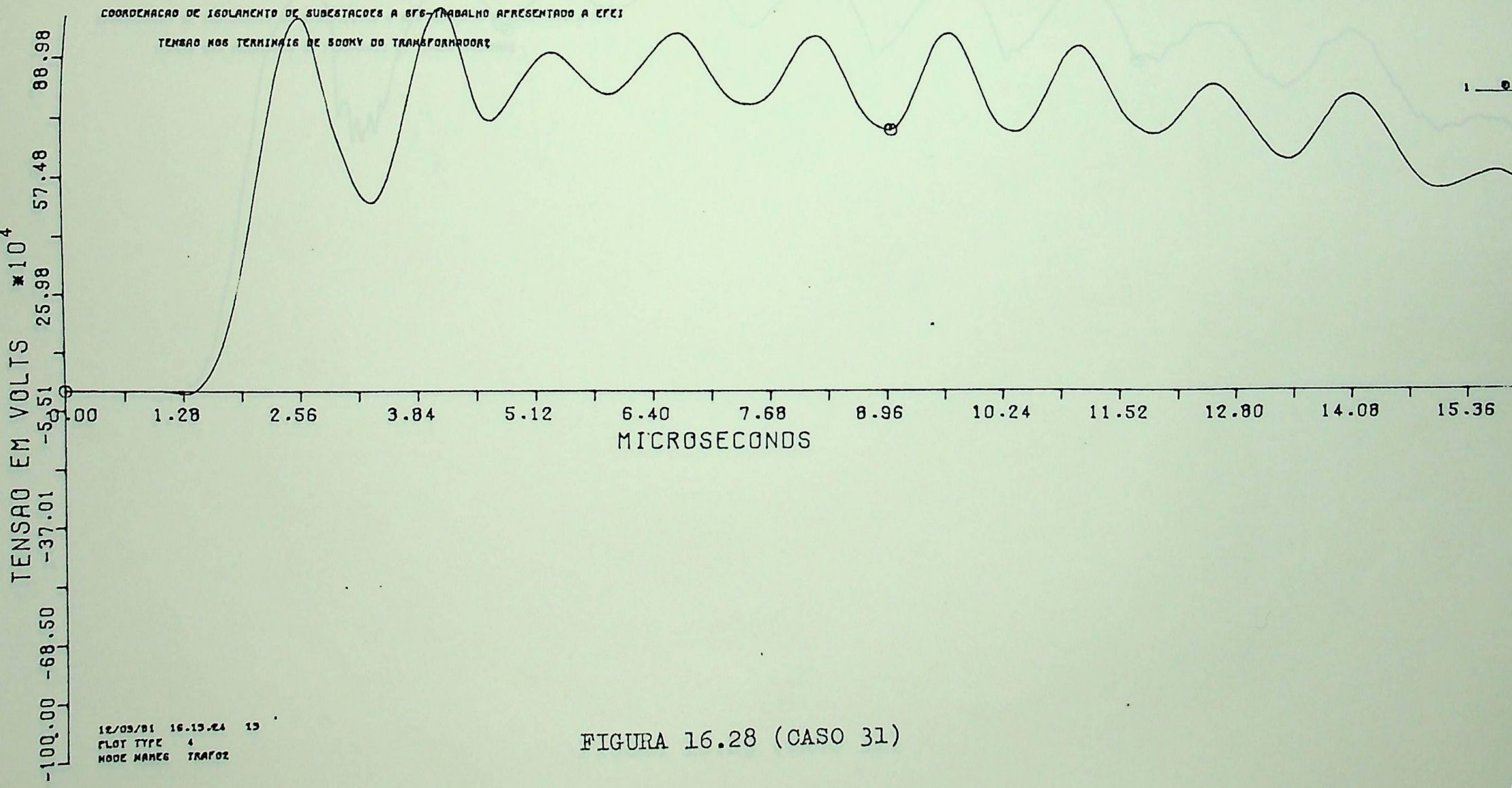


FIGURA 16.28 (CASO 31)

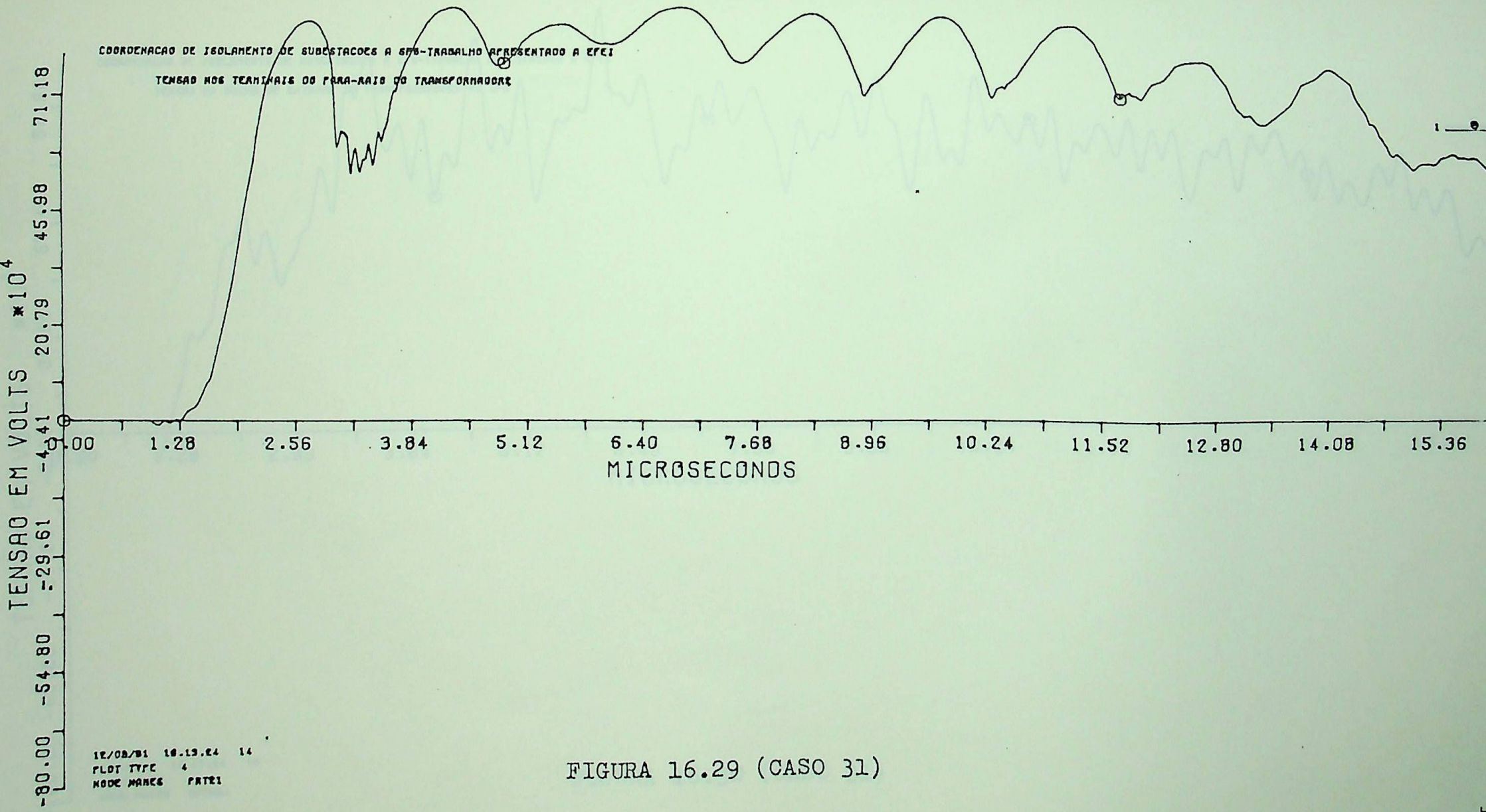


FIGURA 16.29 (CASO 31)

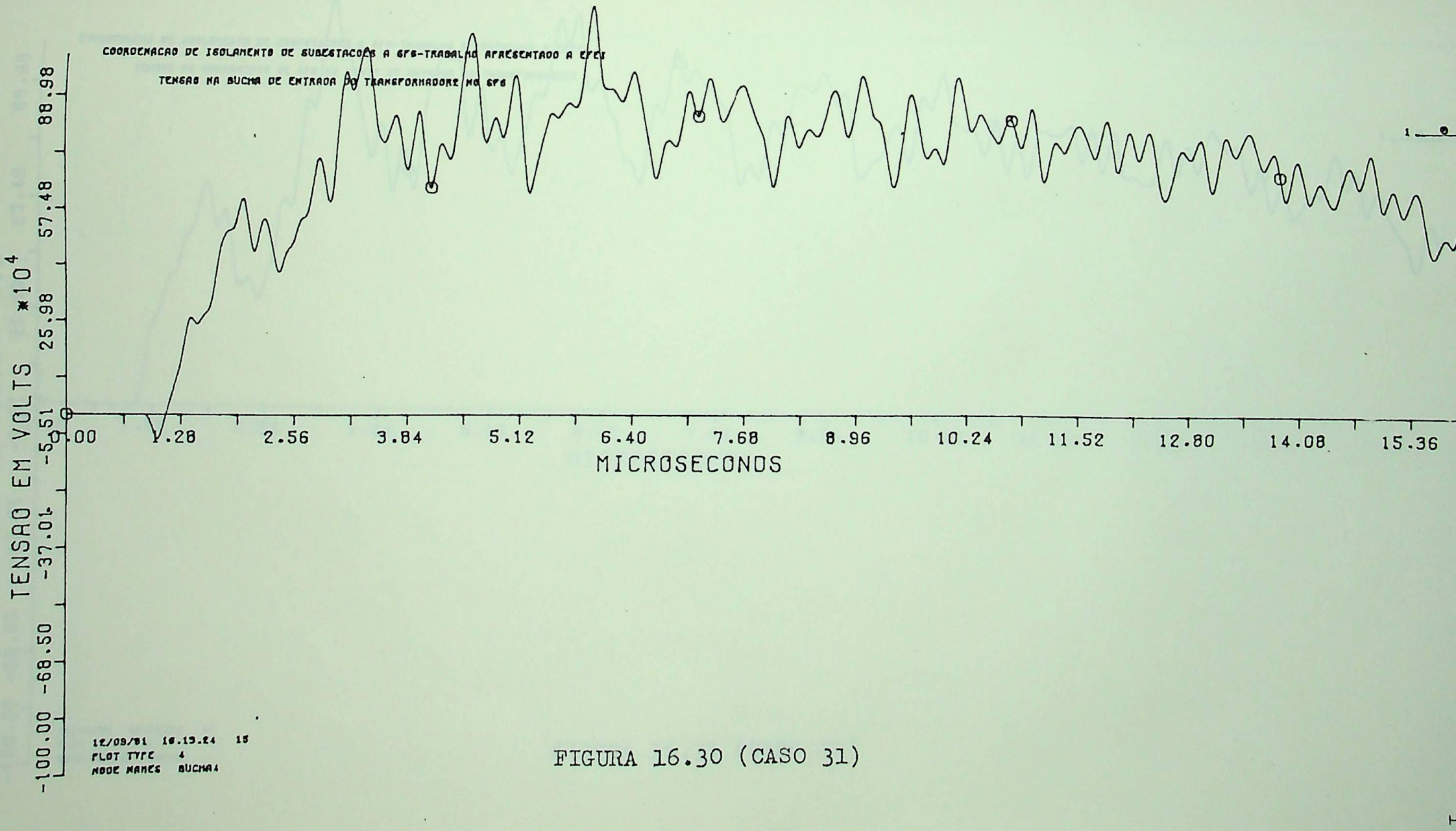


FIGURA 16.30 (CASO 31)

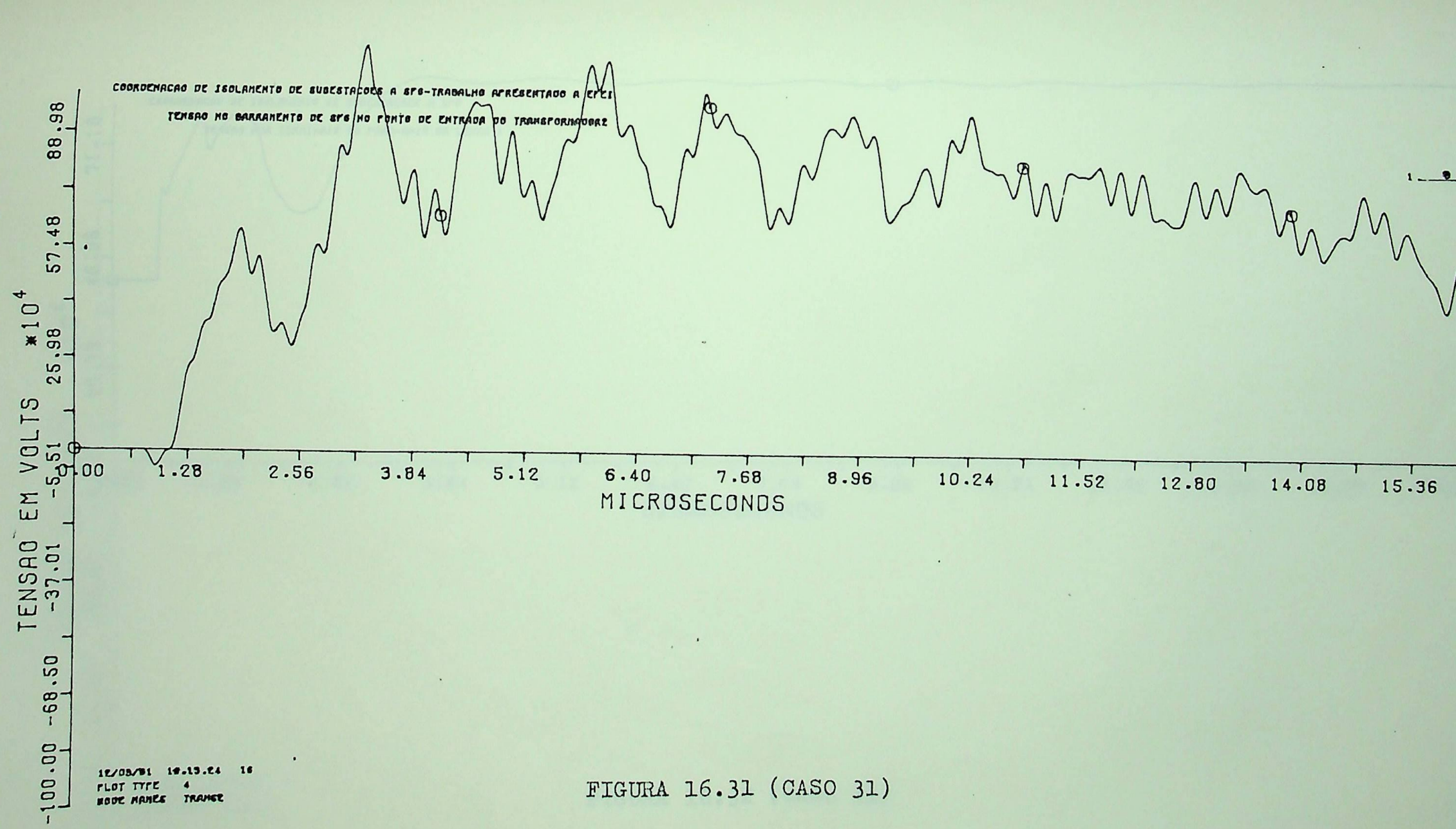


FIGURA 16.31 (CASO 31)

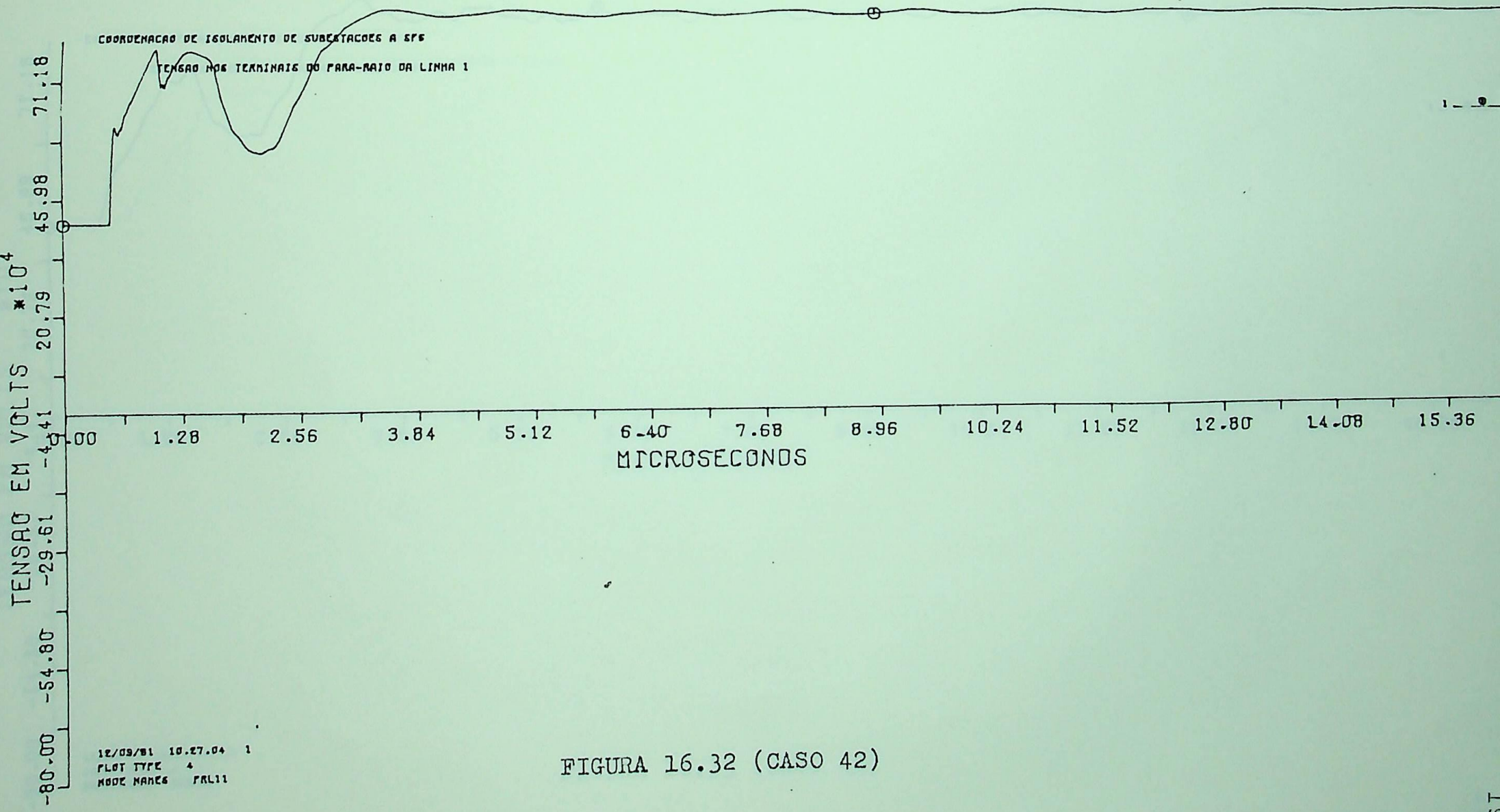


FIGURA 16.32 (CASO 42)

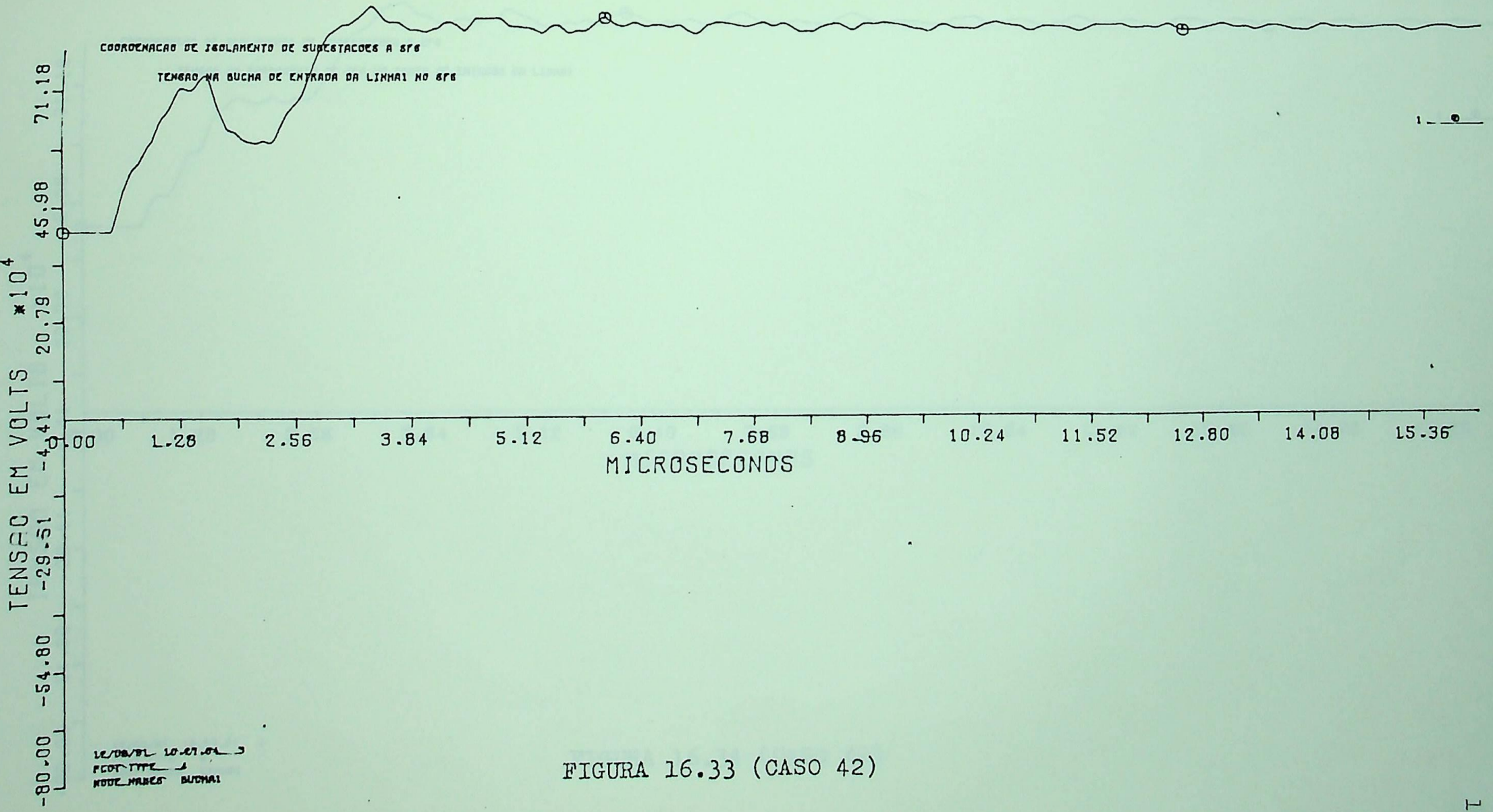


FIGURA 16.33 (CASO 42)

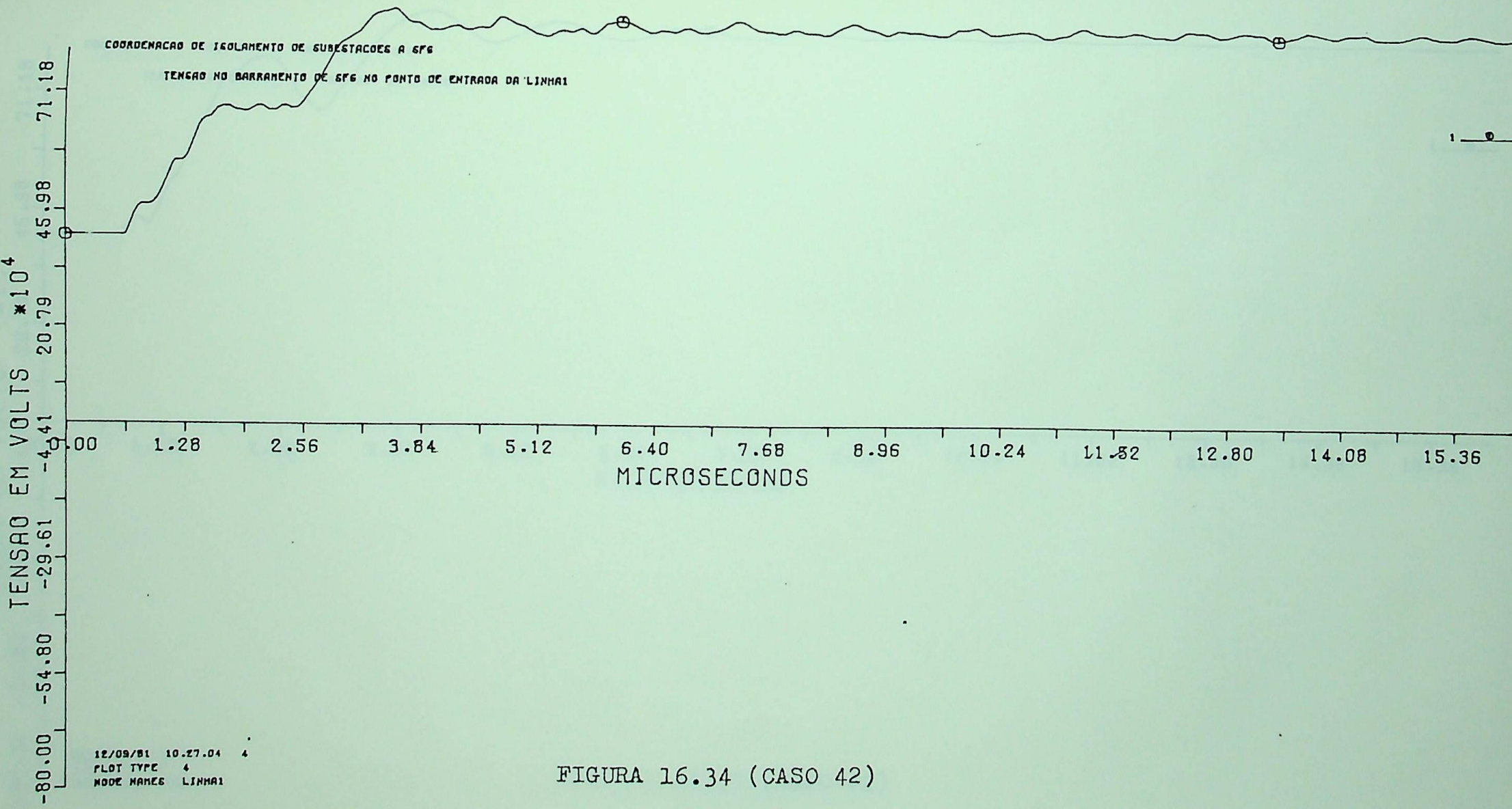


FIGURA 16.34 (CASO 42)

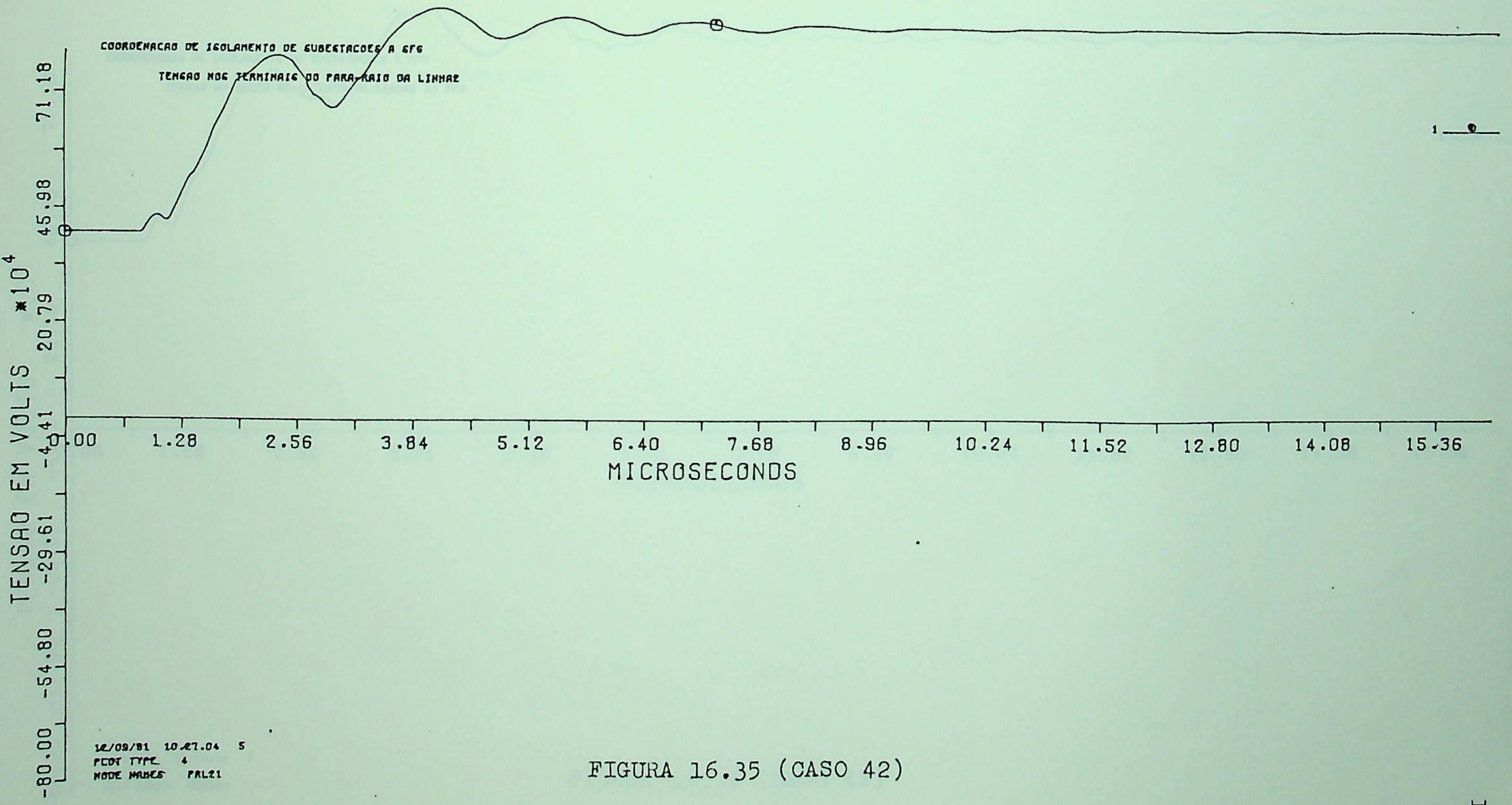


FIGURA 16.35 (CASO 42)

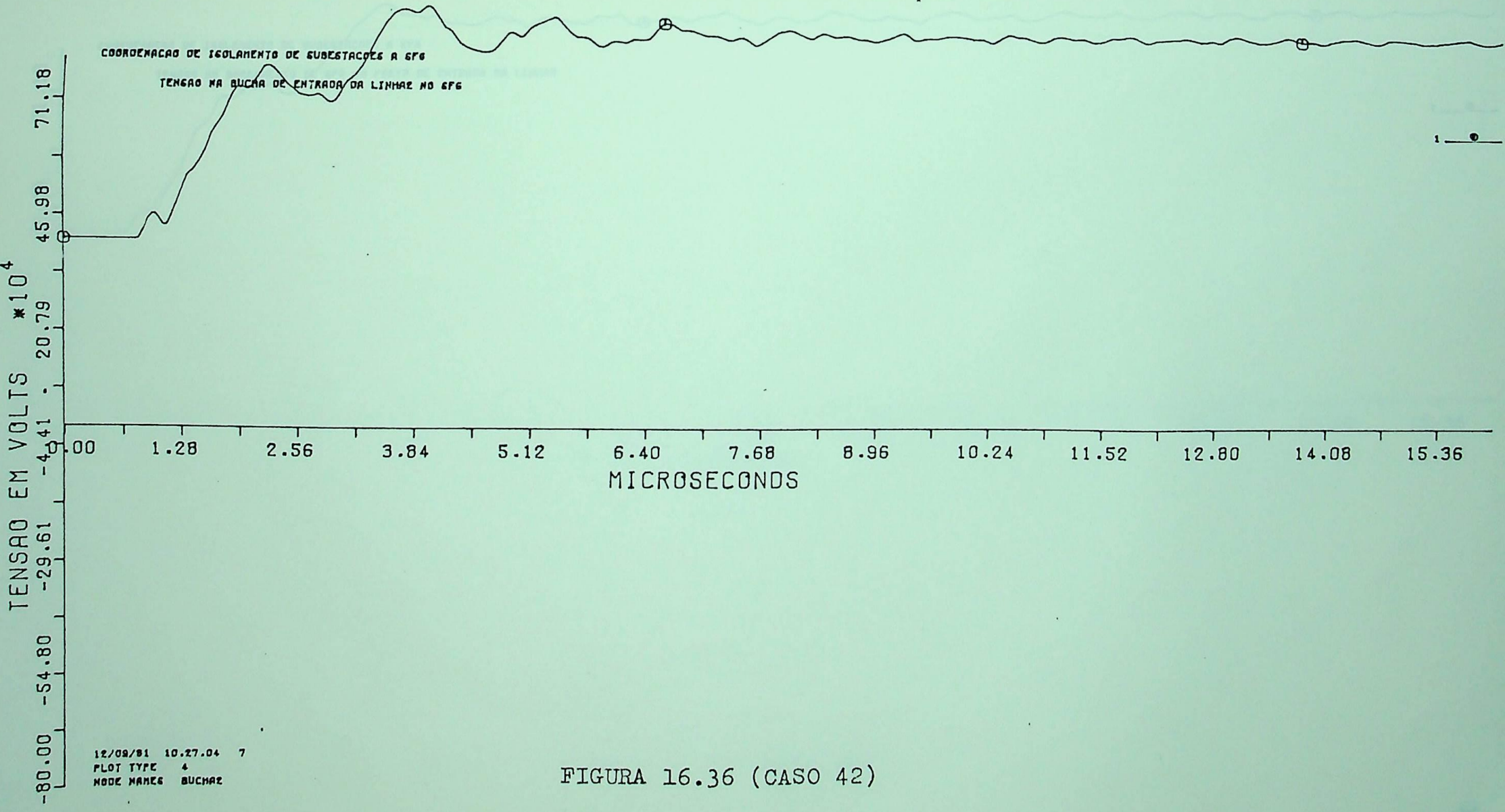


FIGURA 16.36 (CASO 42)

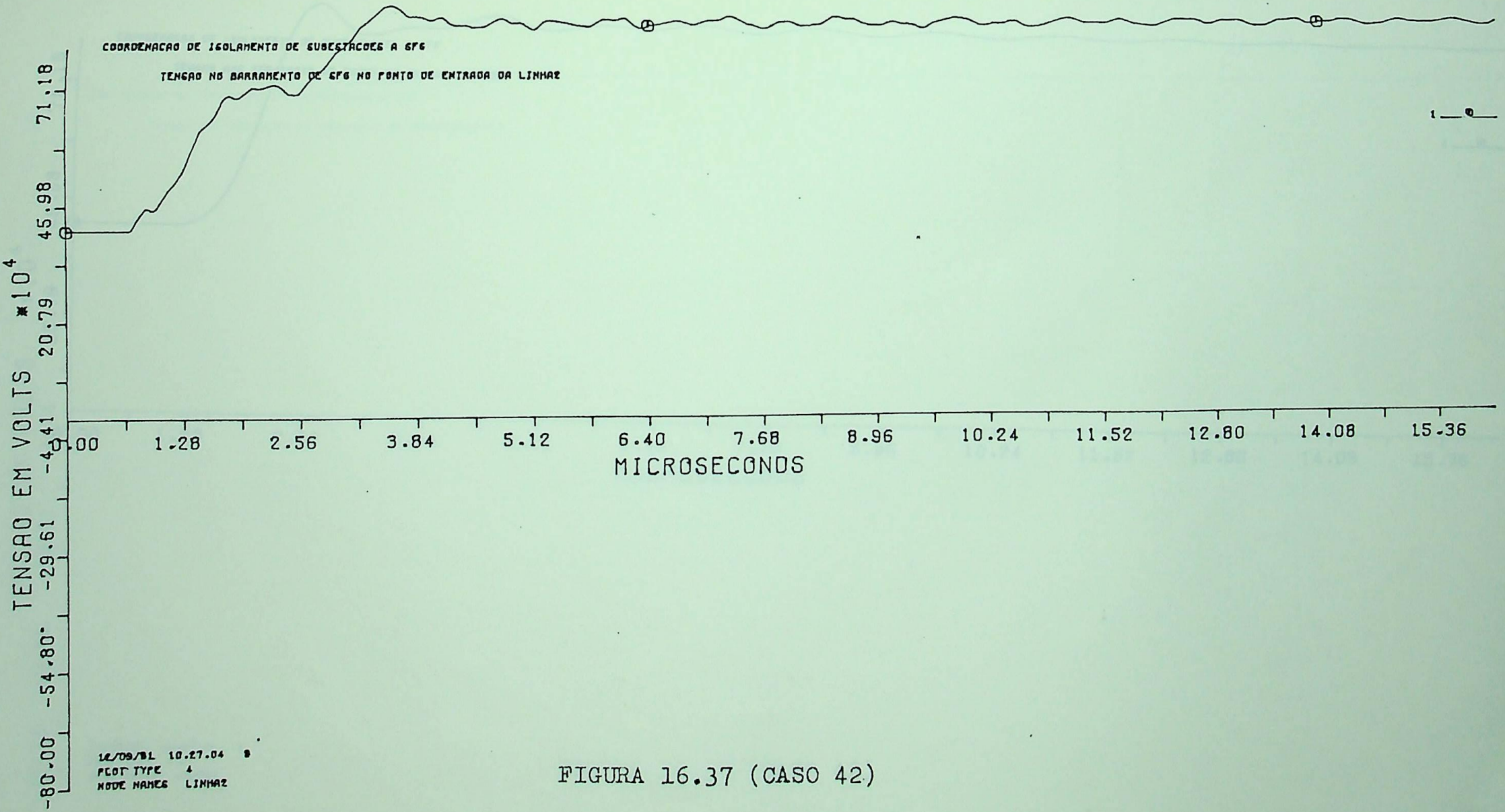


FIGURA 16.37 (CASO 42)

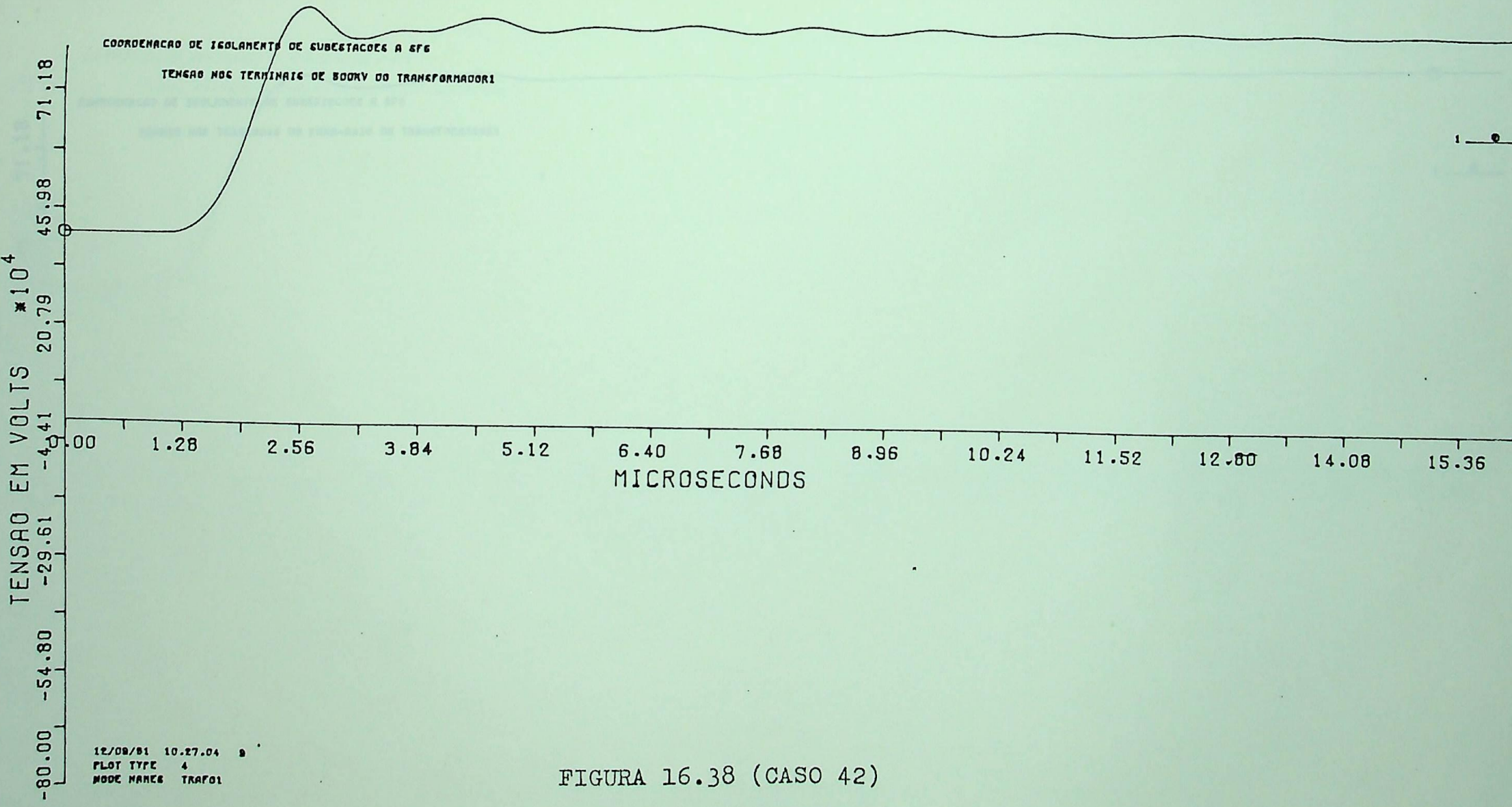


FIGURA 16.38 (CASO 42)

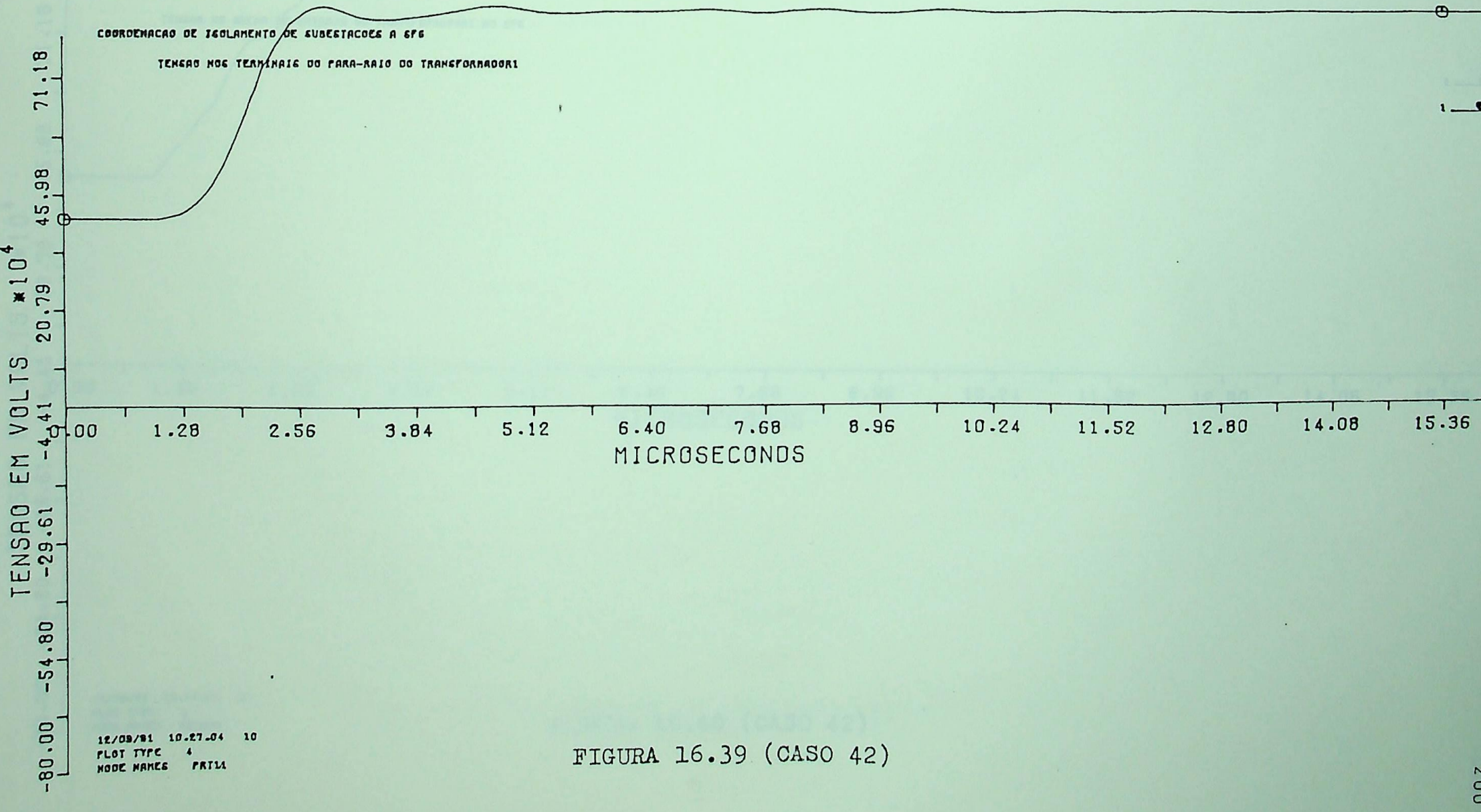


FIGURA 16.39 (CASO 42)

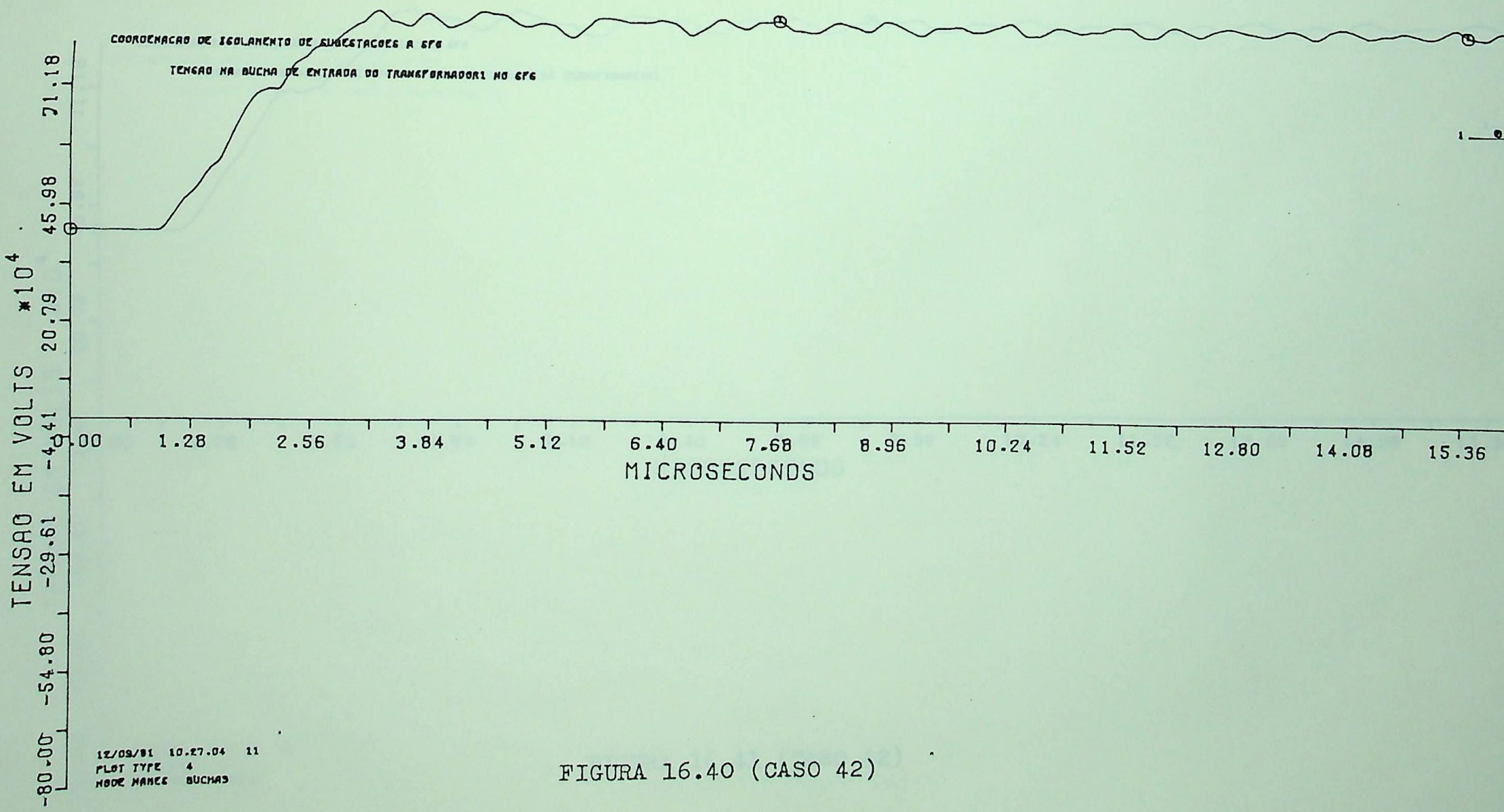


FIGURA 16.40 (CASO 42)

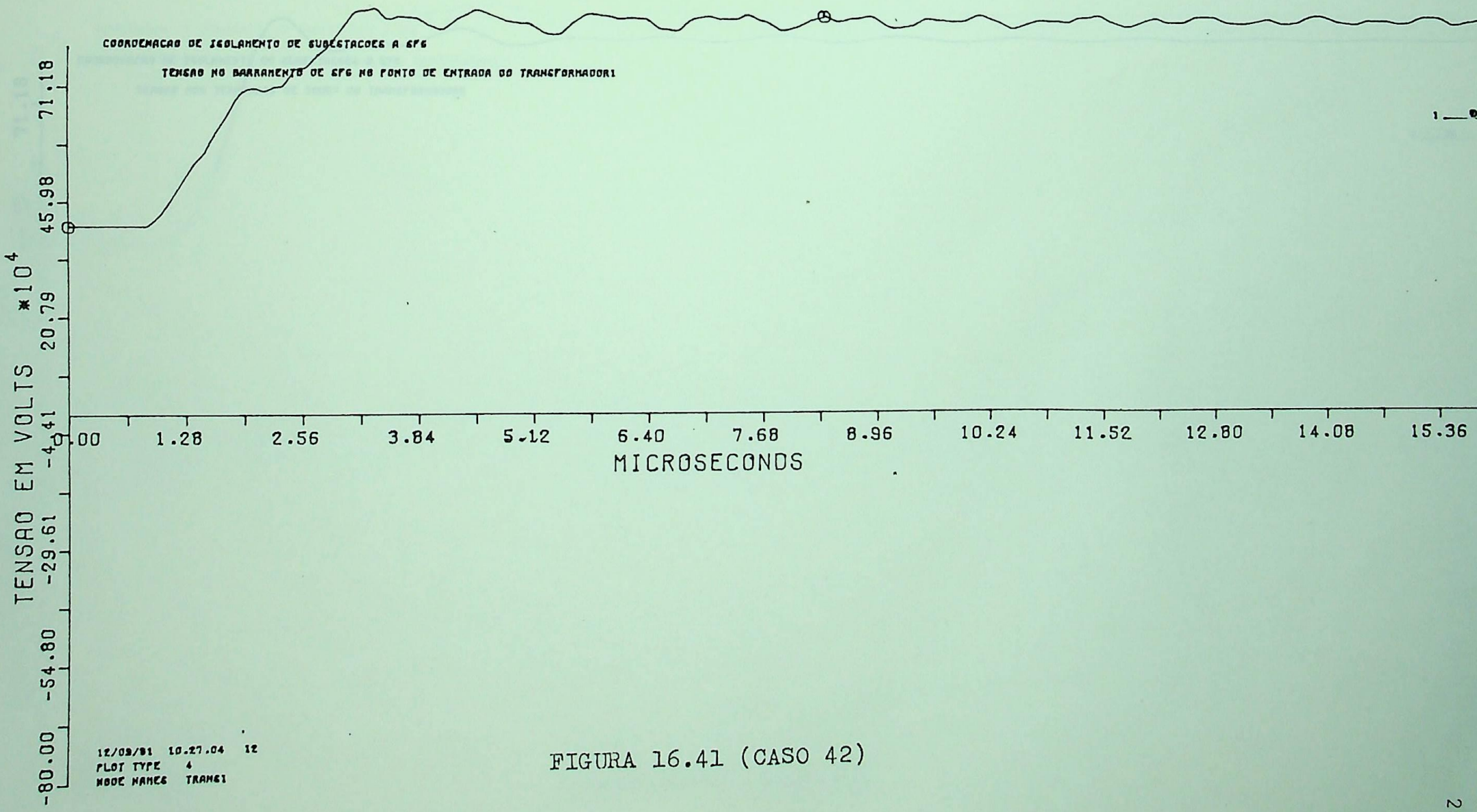


FIGURA 16.41 (CASO 42)

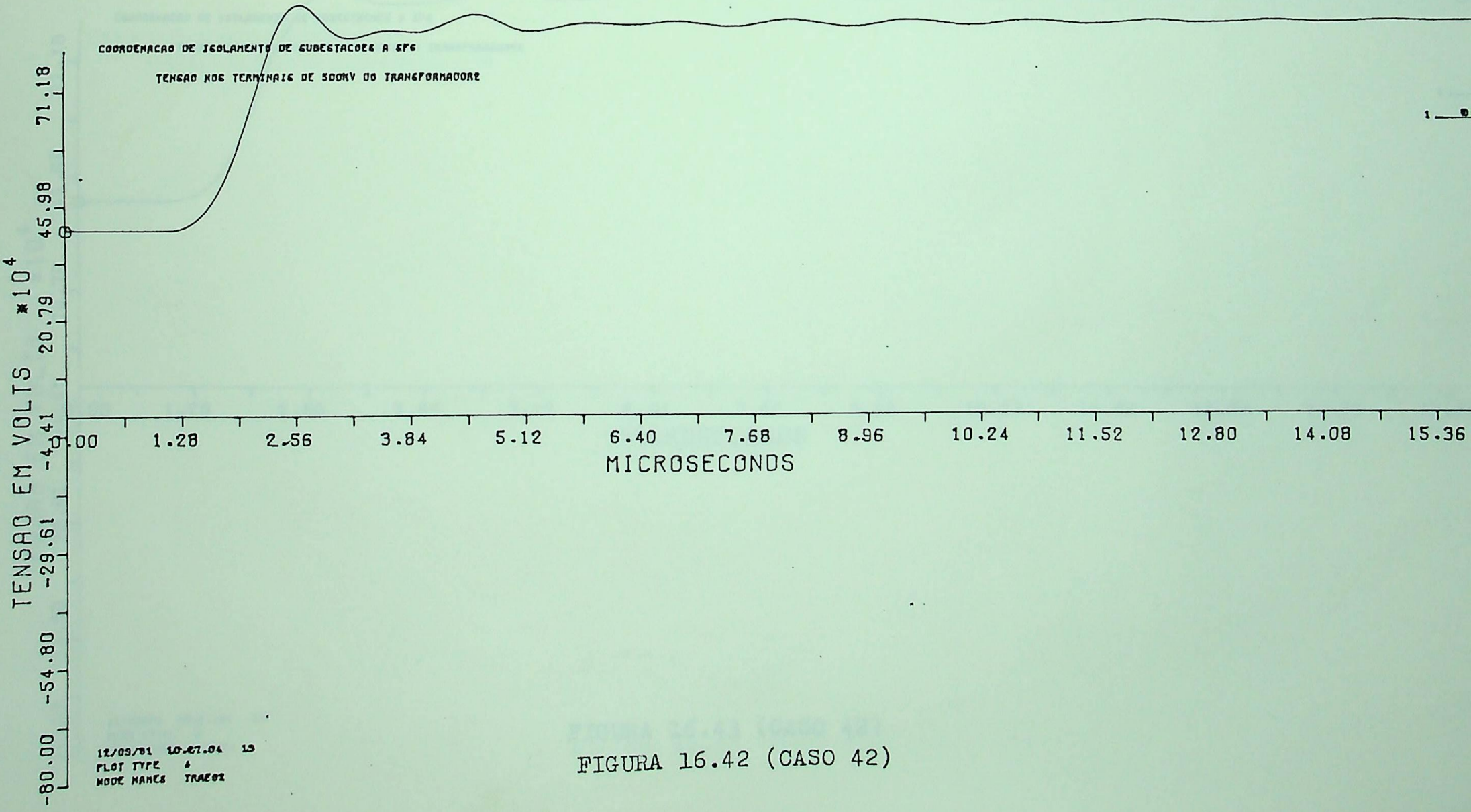


FIGURA 16.42 (CASO 42)

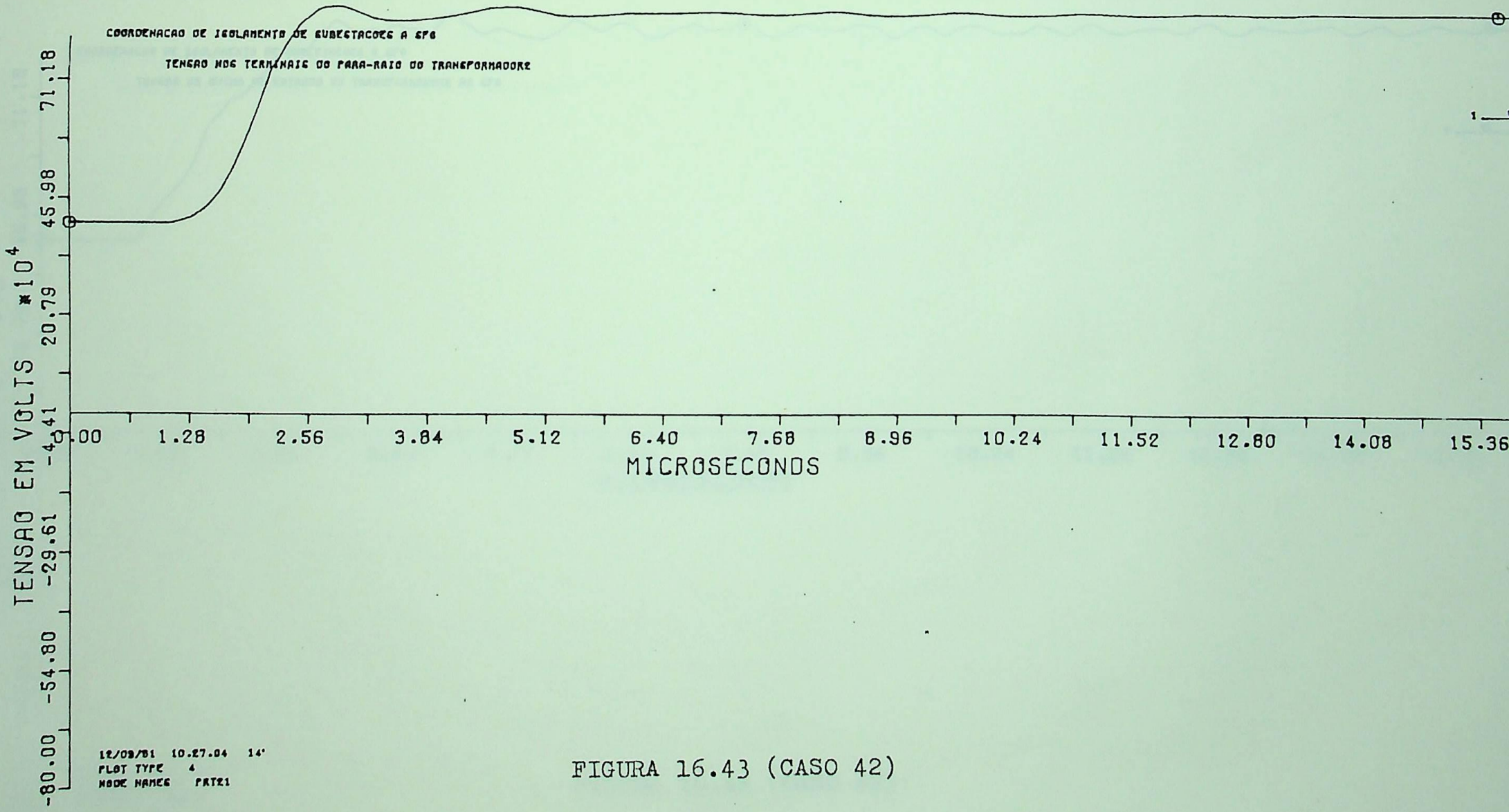


FIGURA 16.43 (CASO 42)

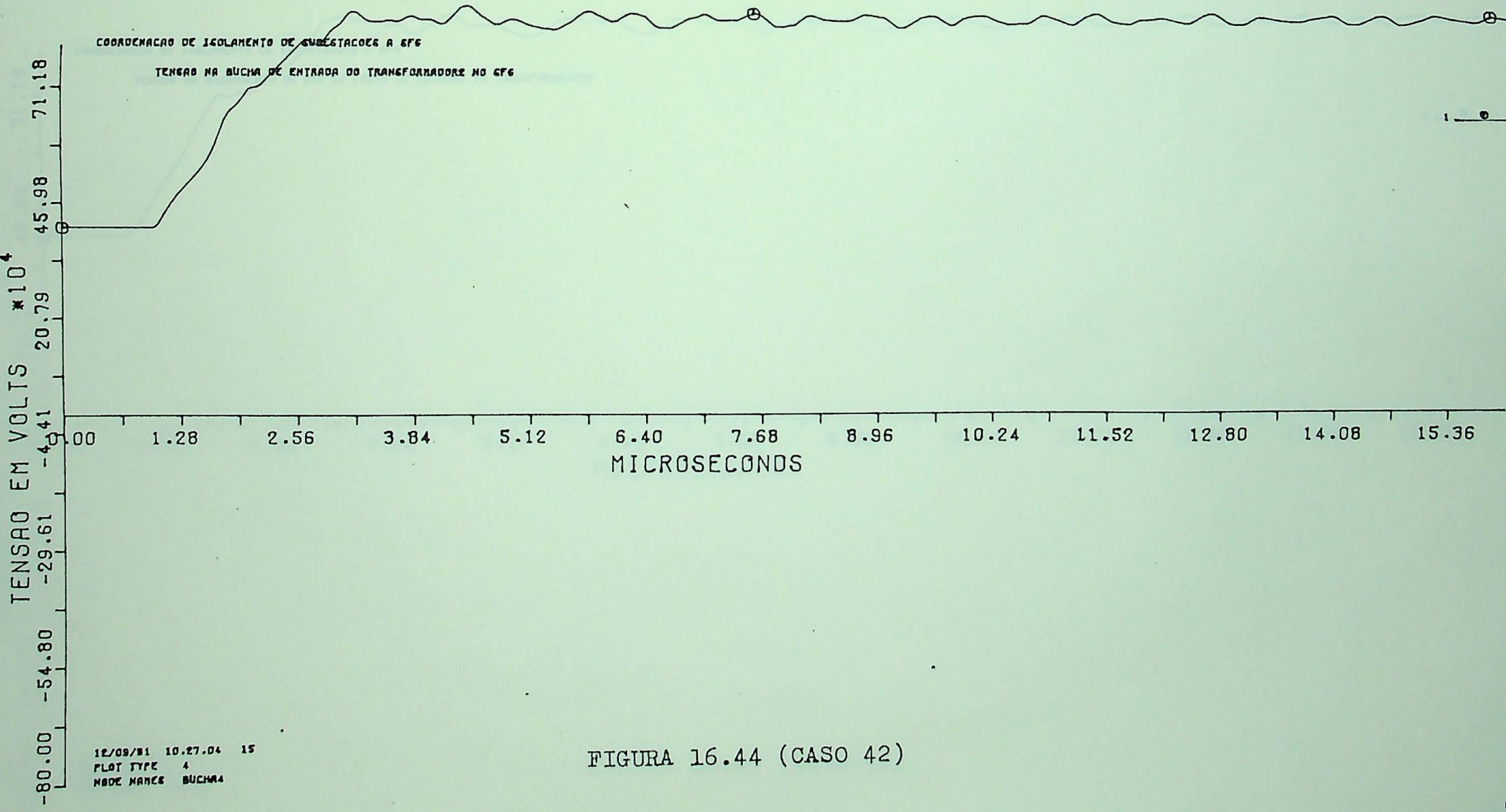


FIGURA 16.44 (CASO 42)

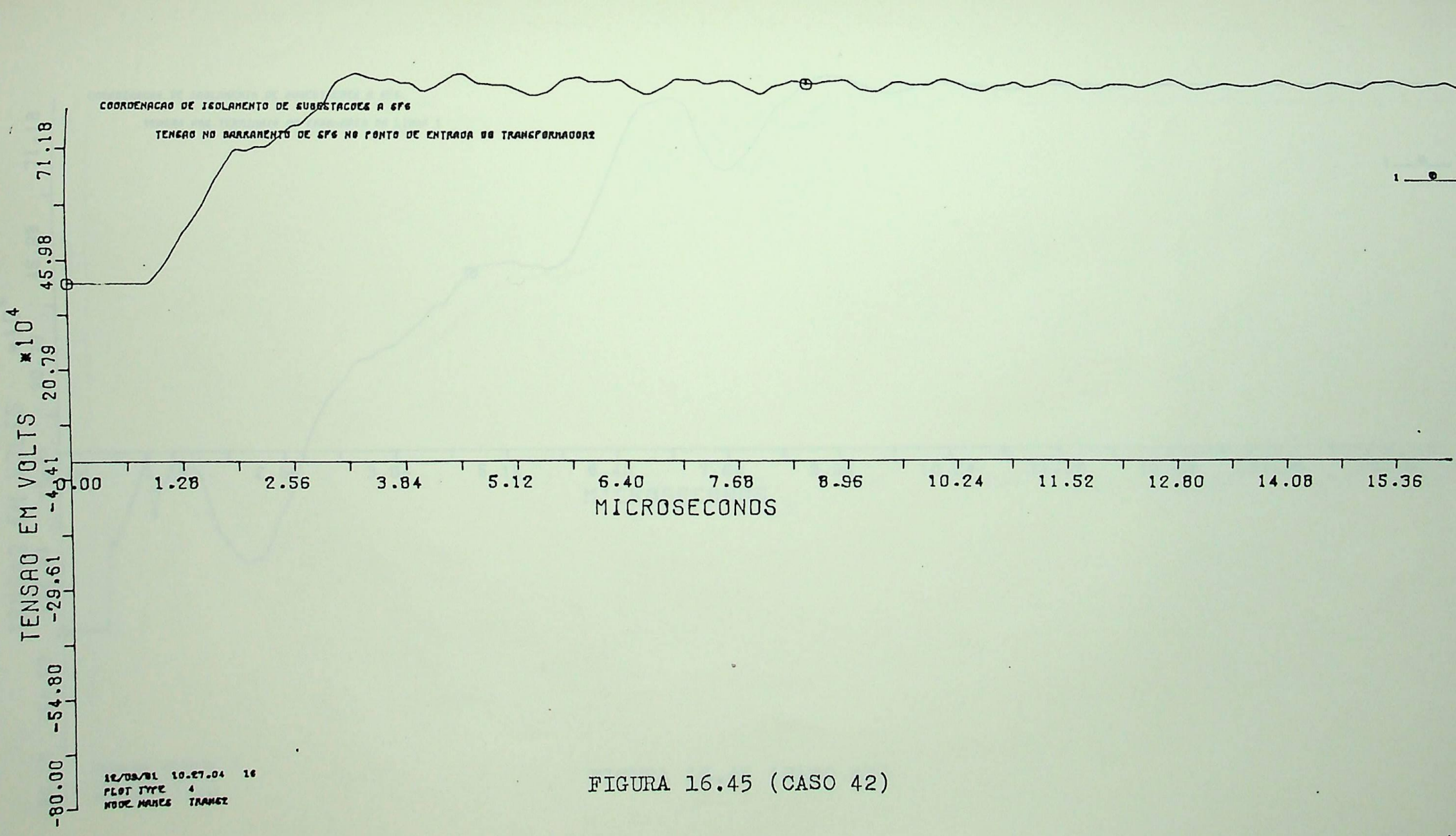


FIGURA 16.45 (CASO 42)

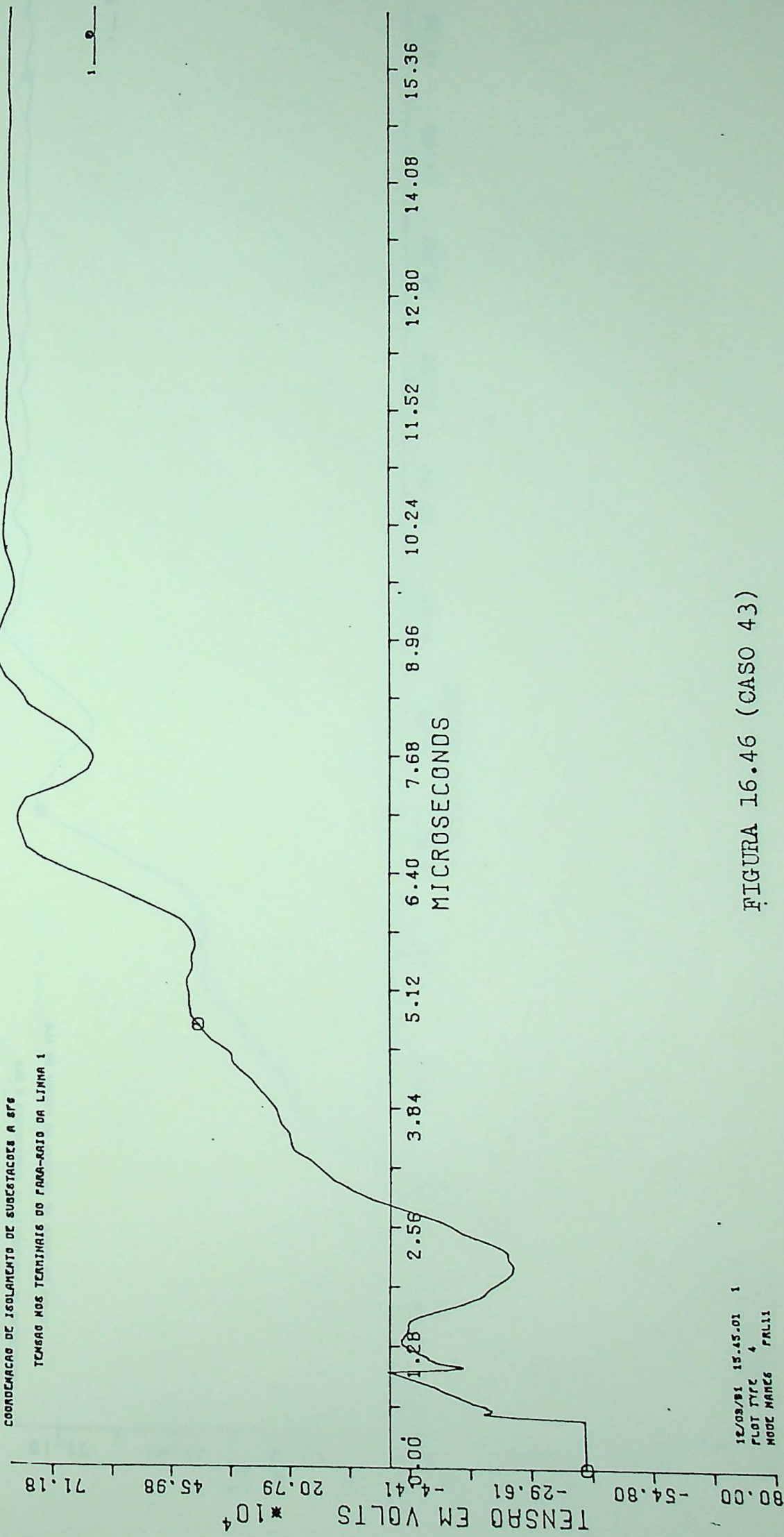


FIGURA 16.46 (CASO 43)

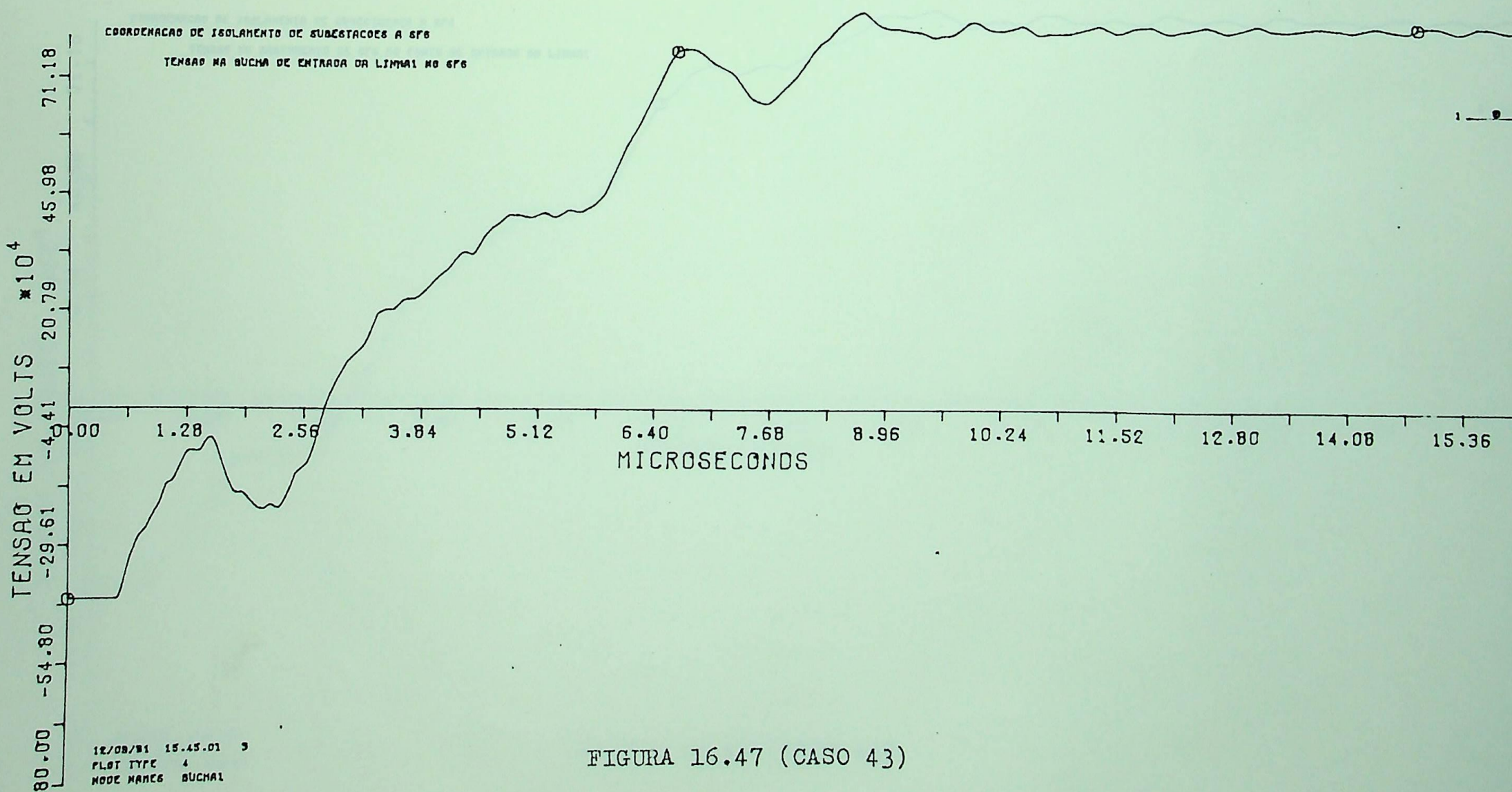


FIGURA 16.47 (CASO 43)

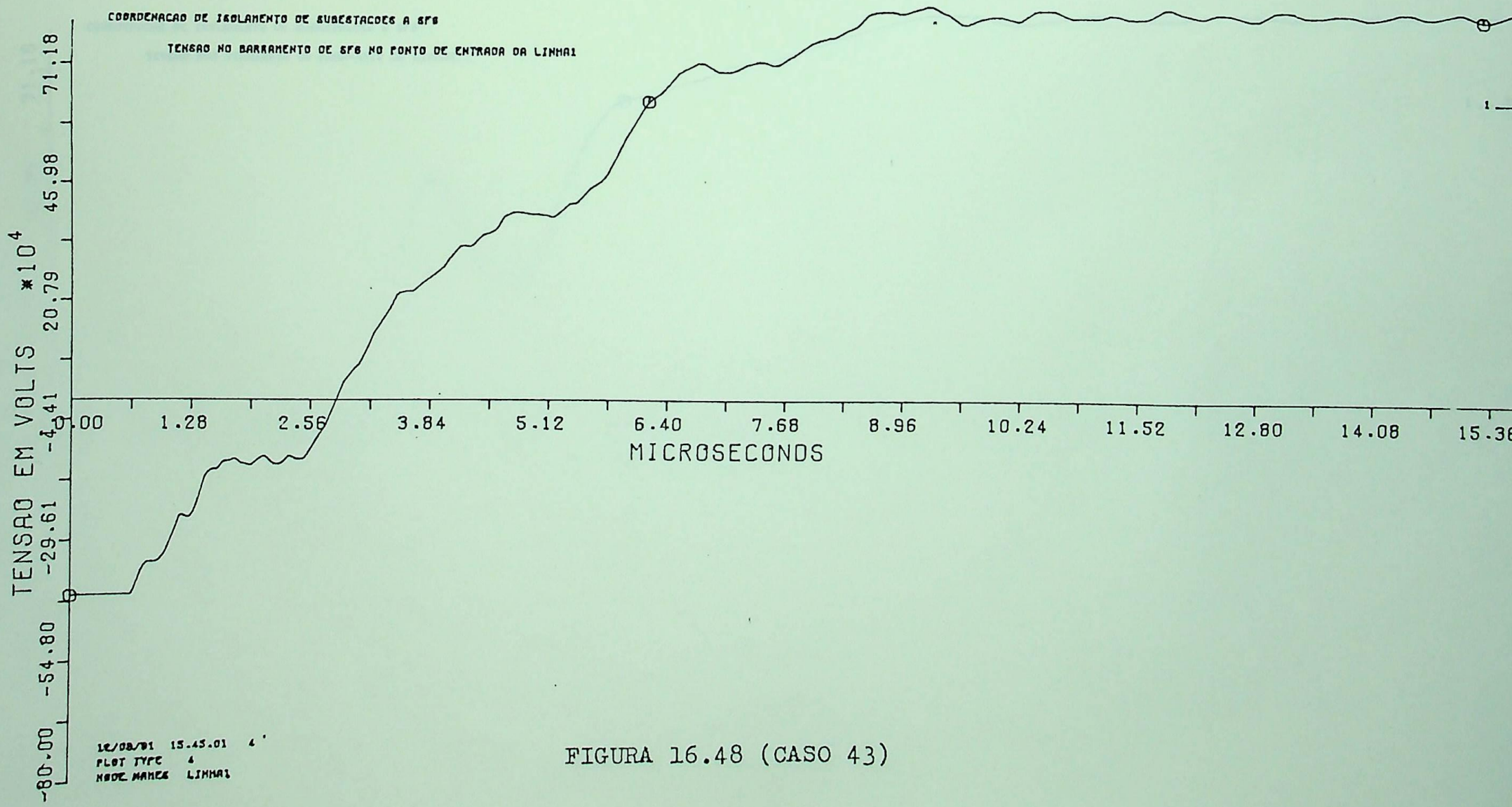


FIGURA 16.48 (CASO 43)

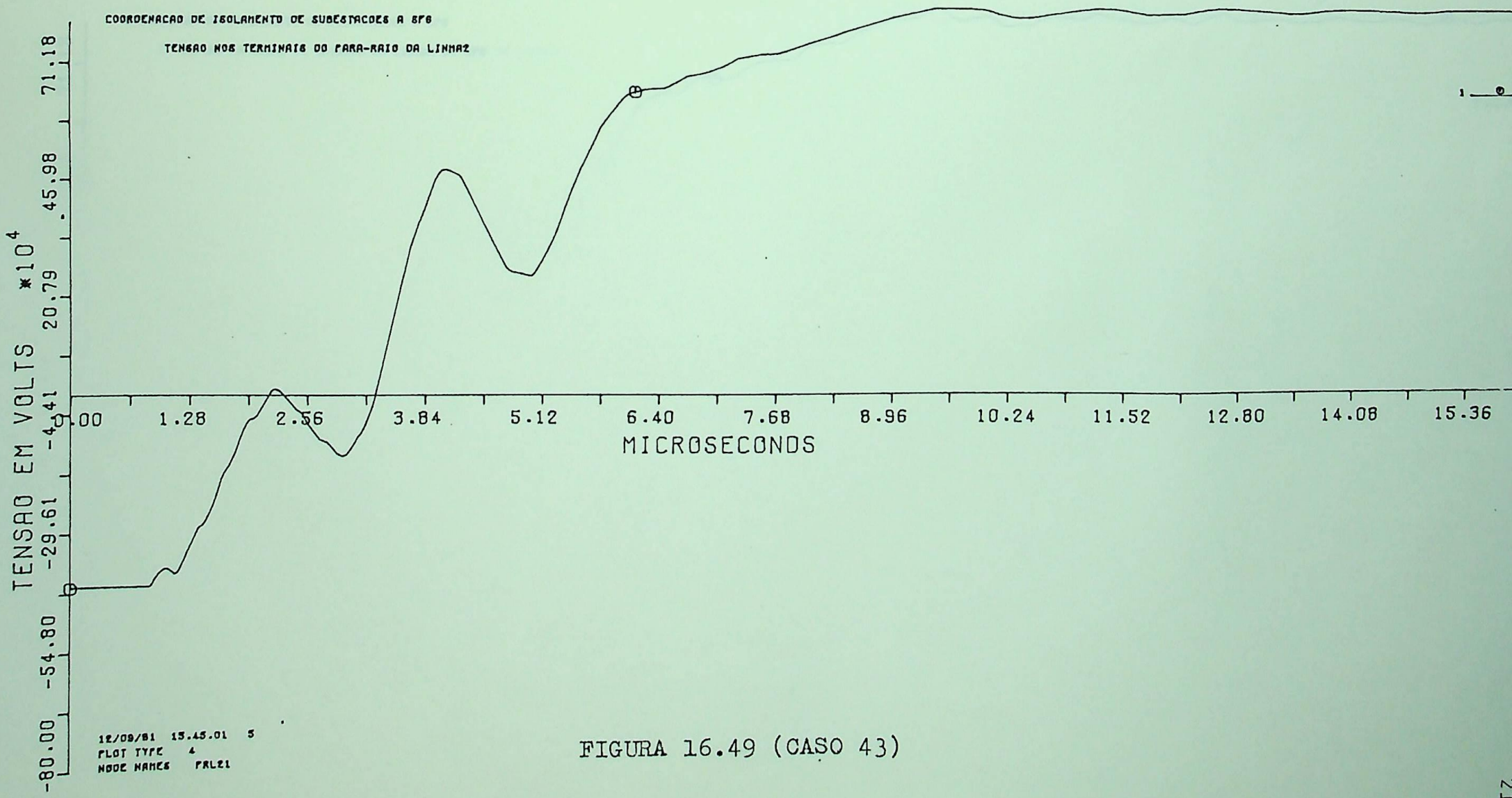


FIGURA 16.49 (CASO 43)

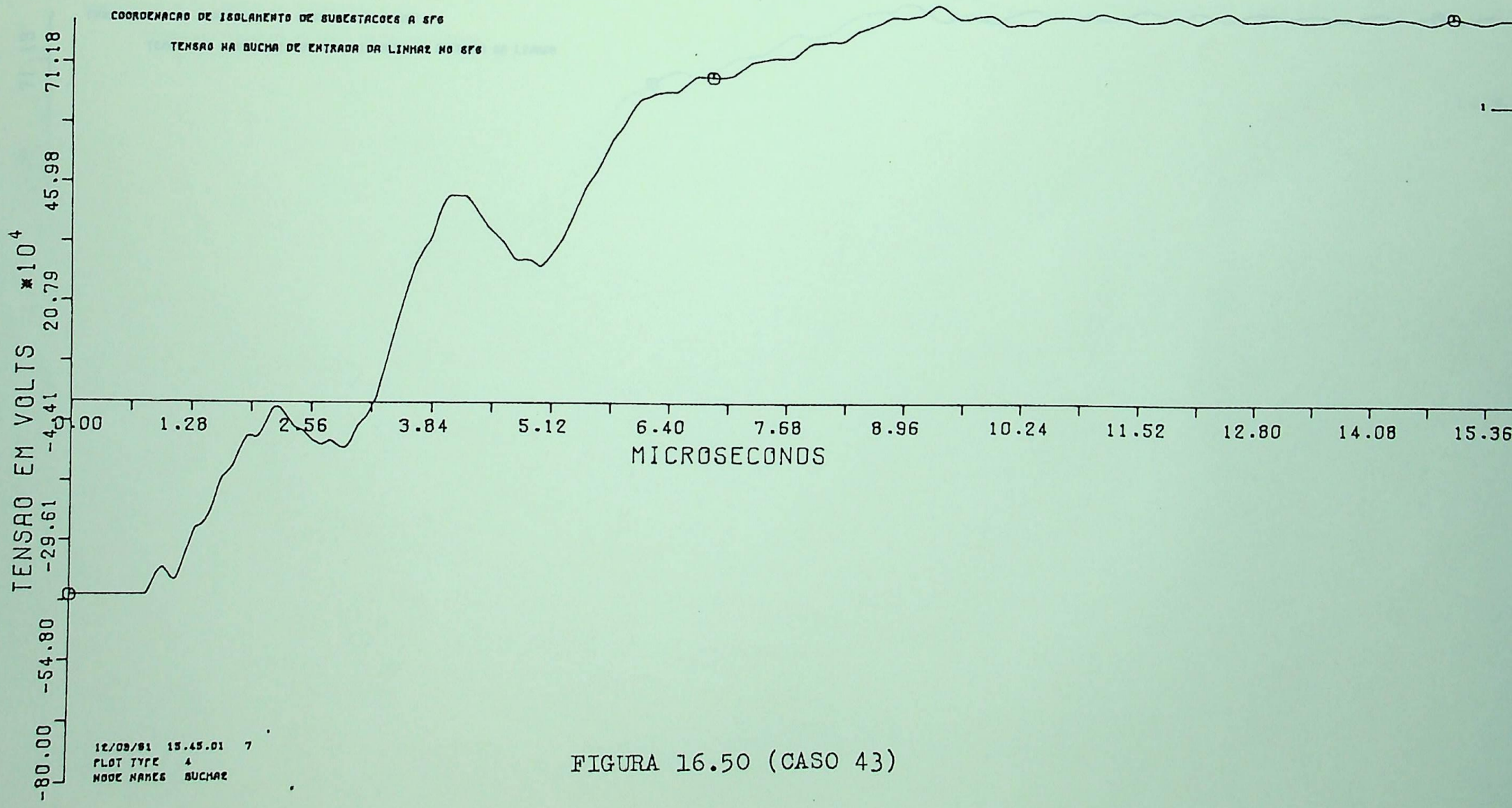


FIGURA 16.50 (CASO 43)

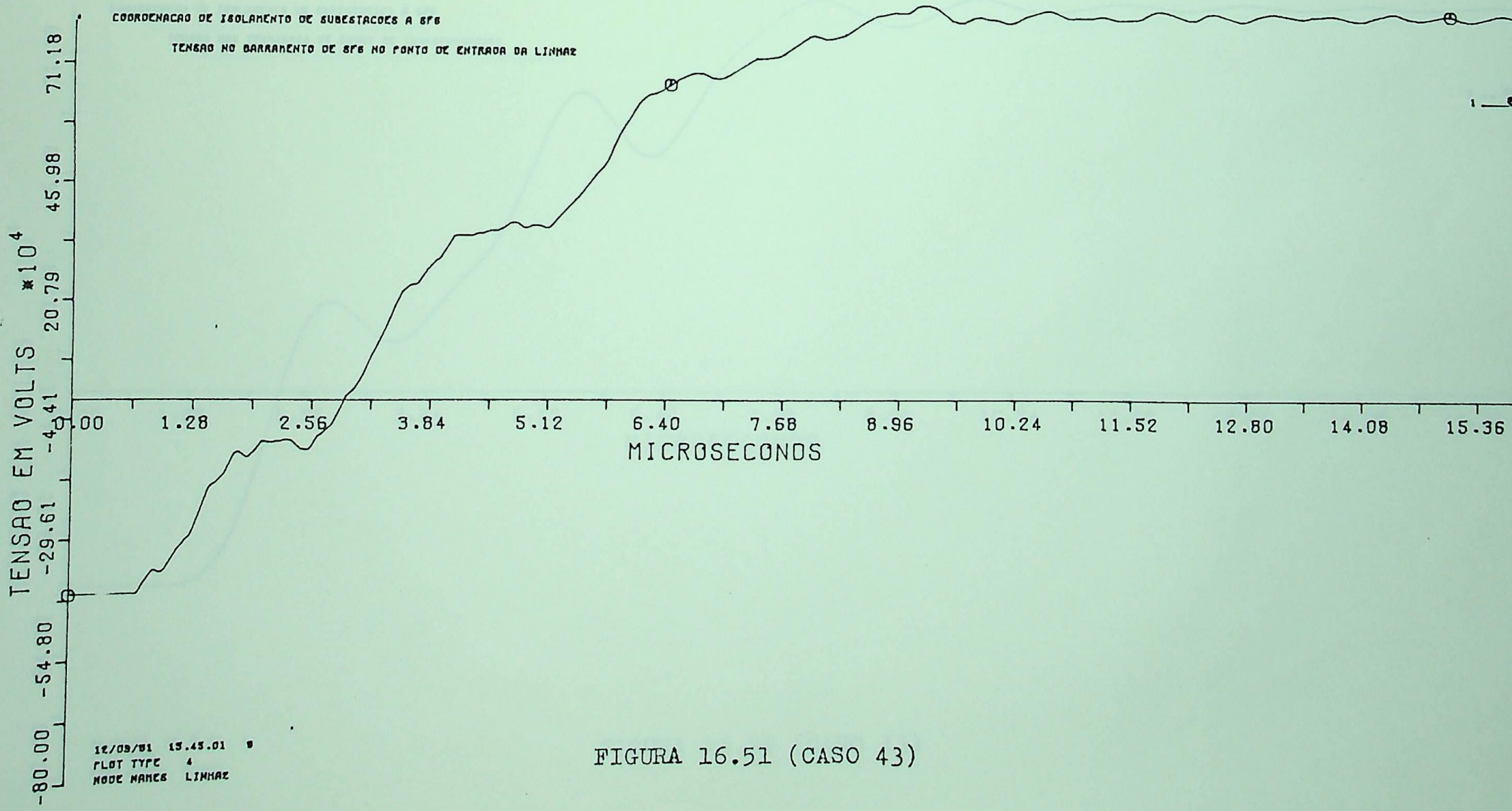


FIGURA 16.51 (CASO 43)

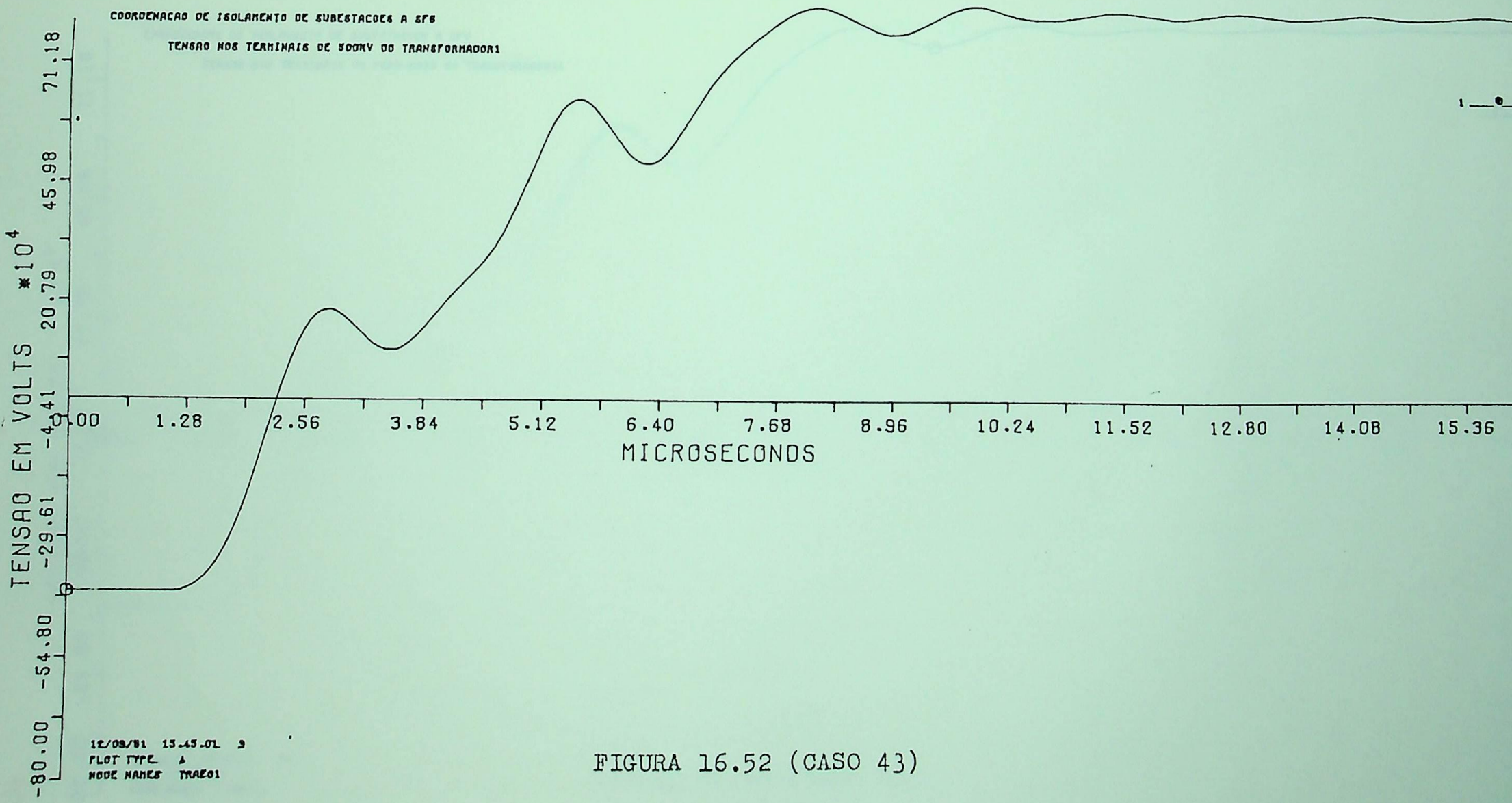


FIGURA 16.52 (CASO 43)

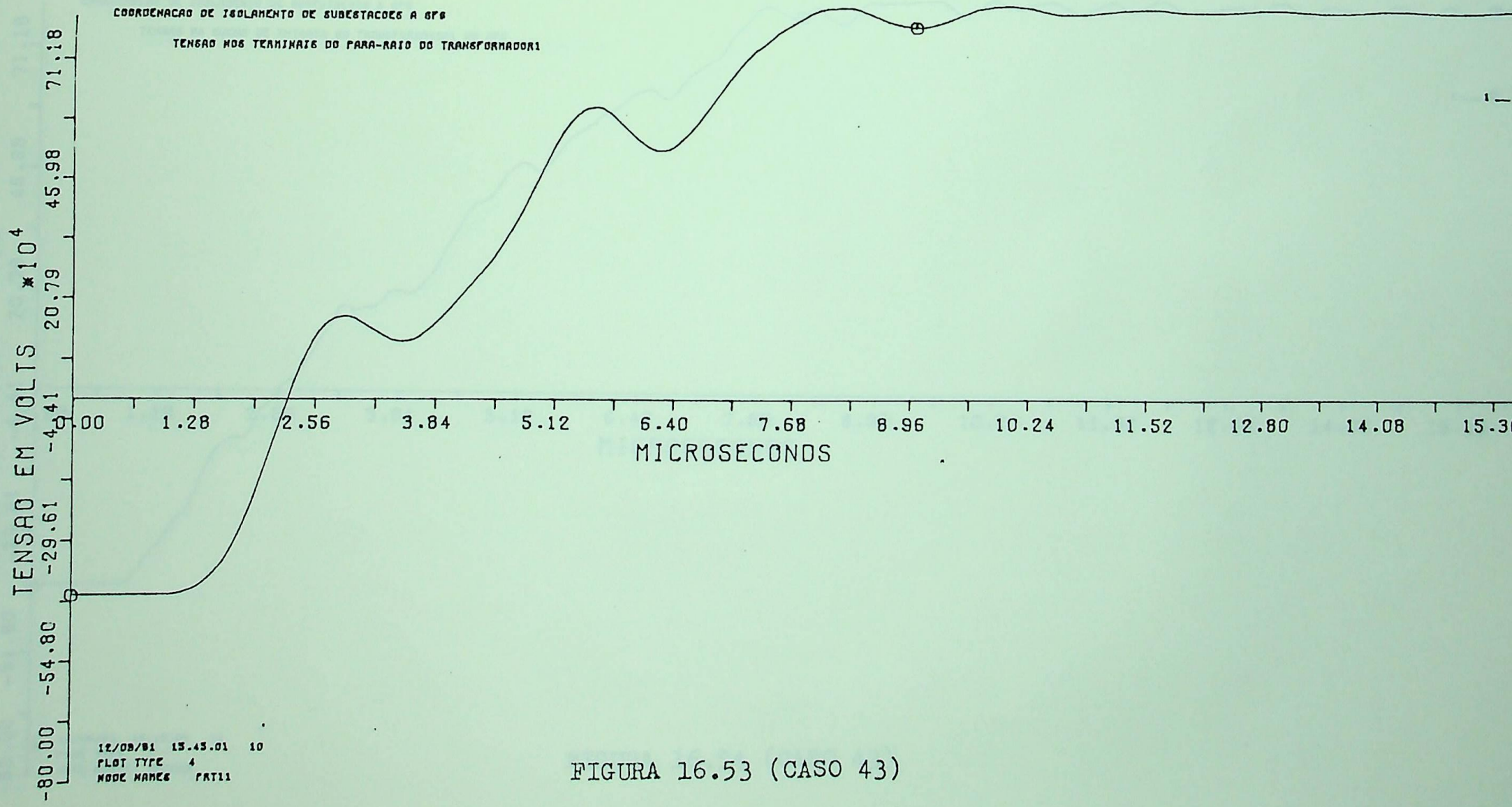


FIGURA 16.53 (CASO 43)

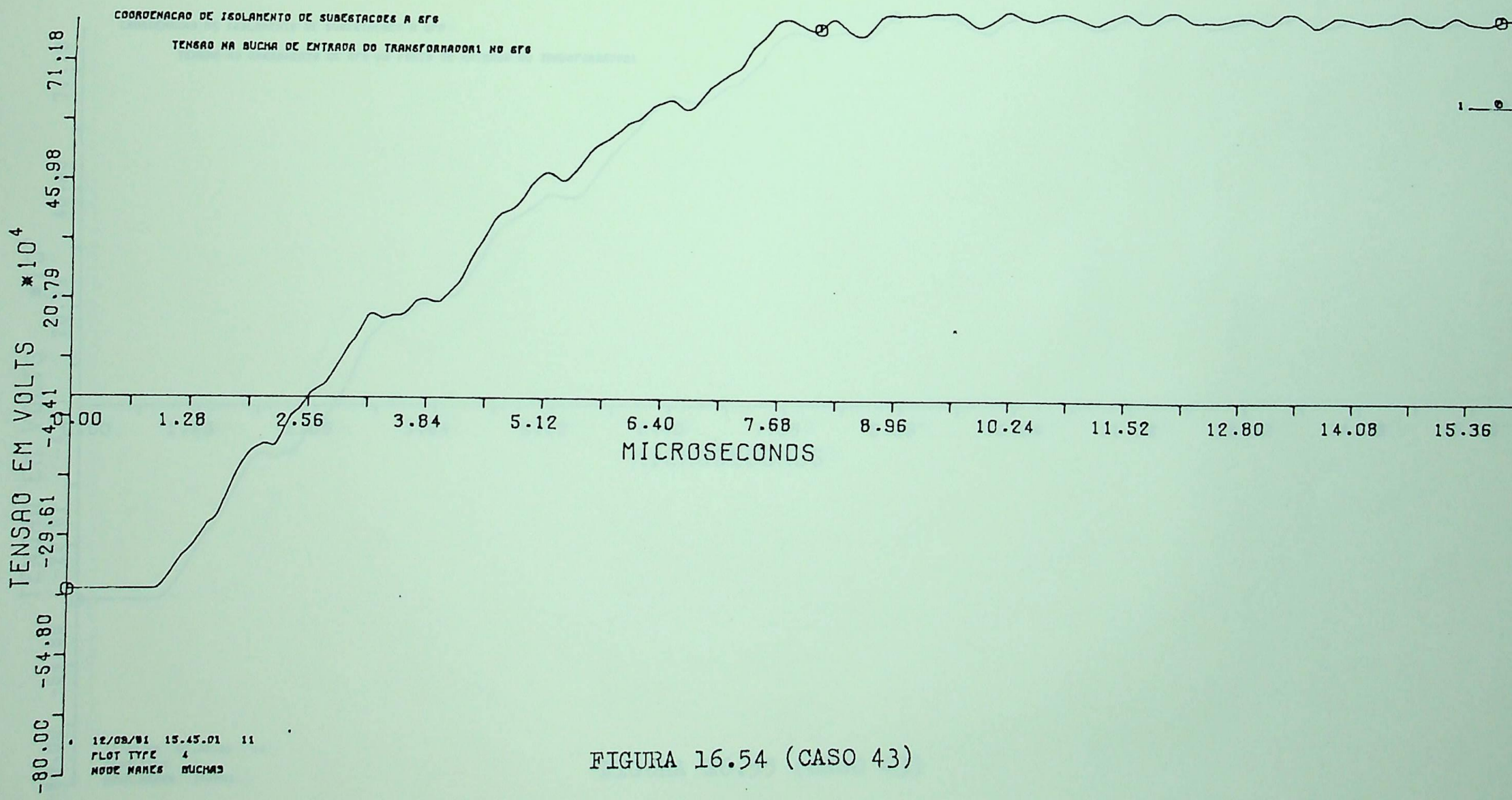


FIGURA 16.54 (CASO 43)

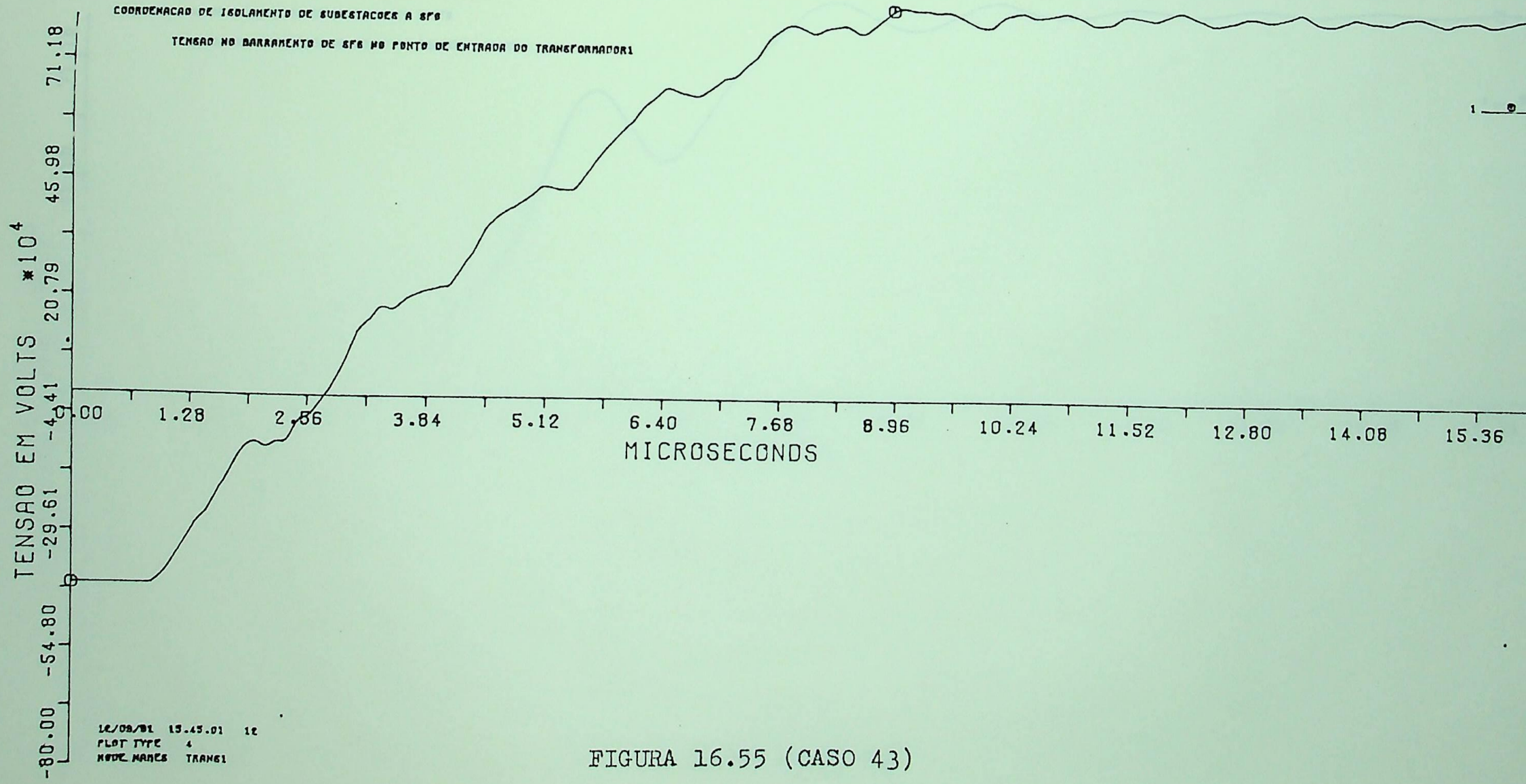


FIGURA 16.55 (CASO 43)

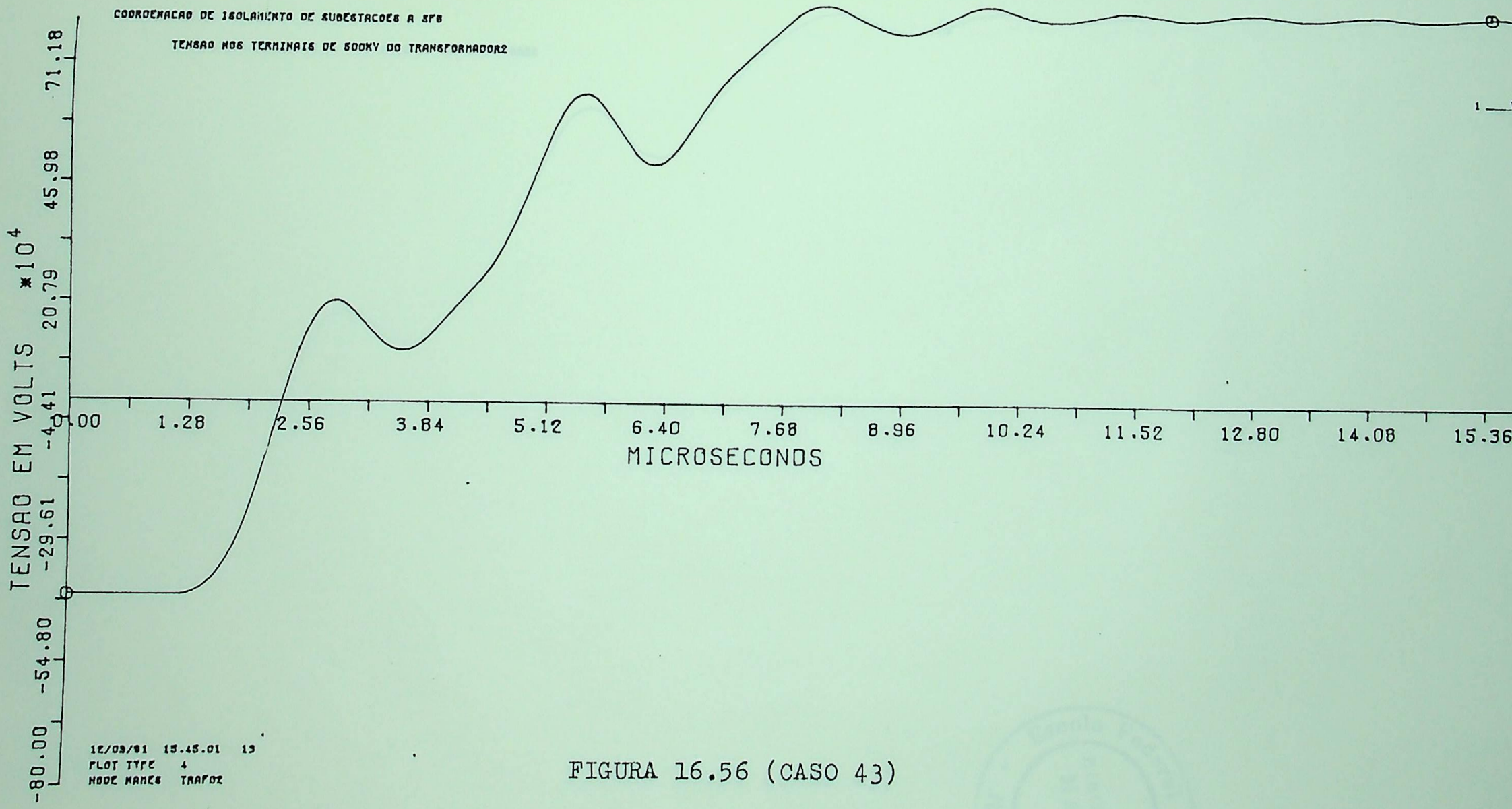


FIGURA 16.56 (CASO 43)

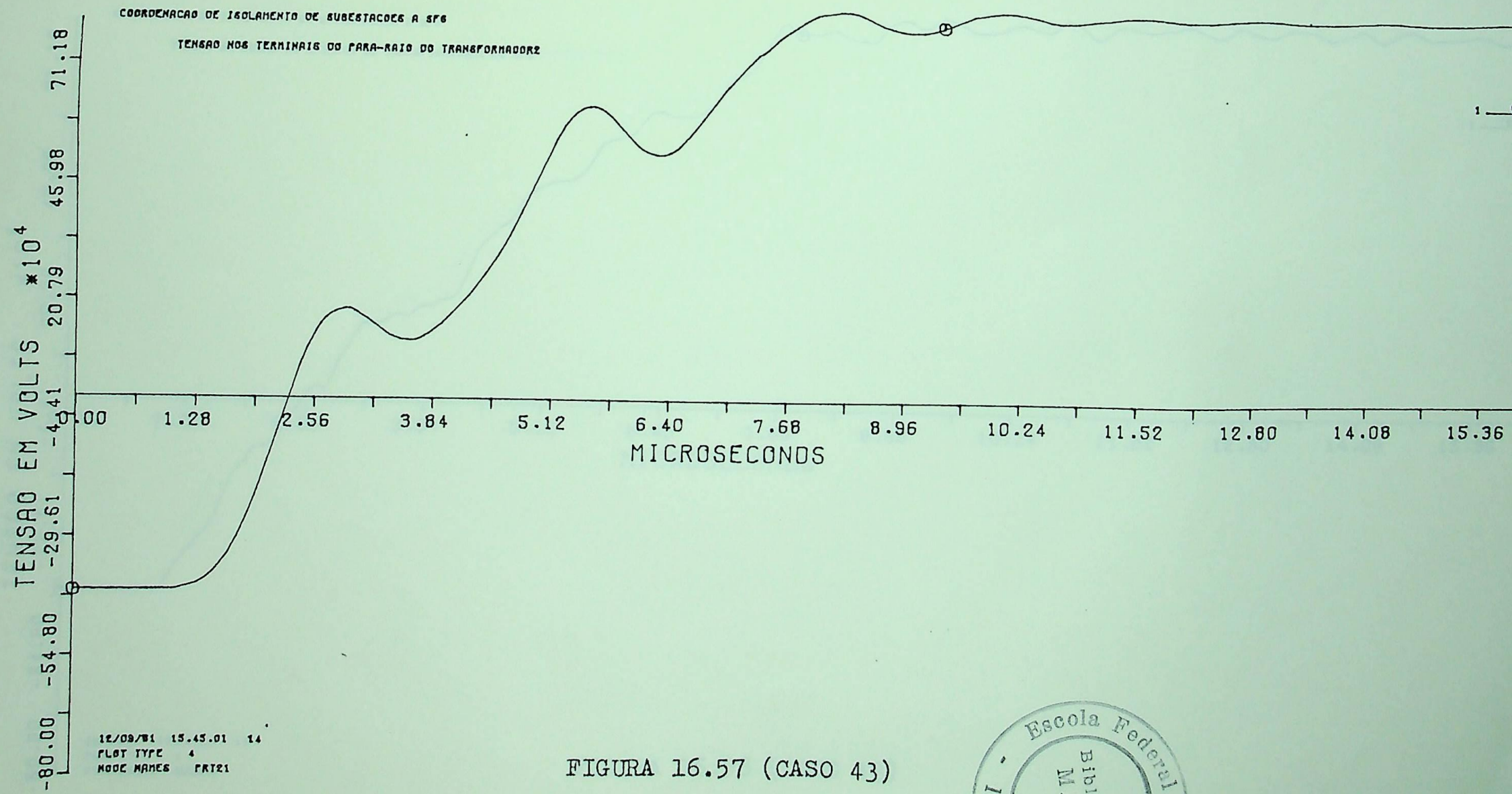


FIGURA 16.57 (CASO 43)

Escola Federal de Engenharia - Itajubá
Biblioteca MAUÁ

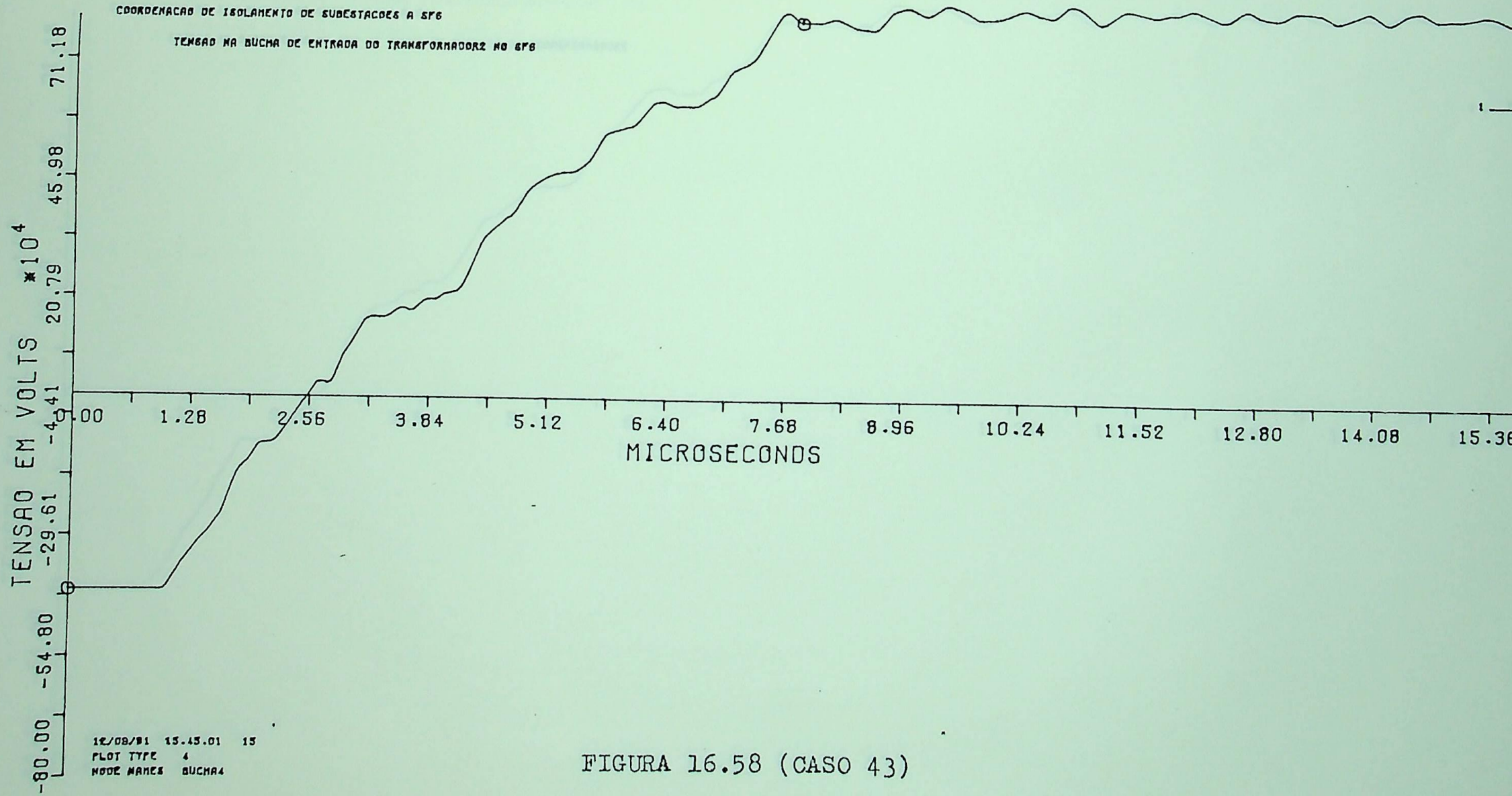


FIGURA 16.58 (CASO 43)

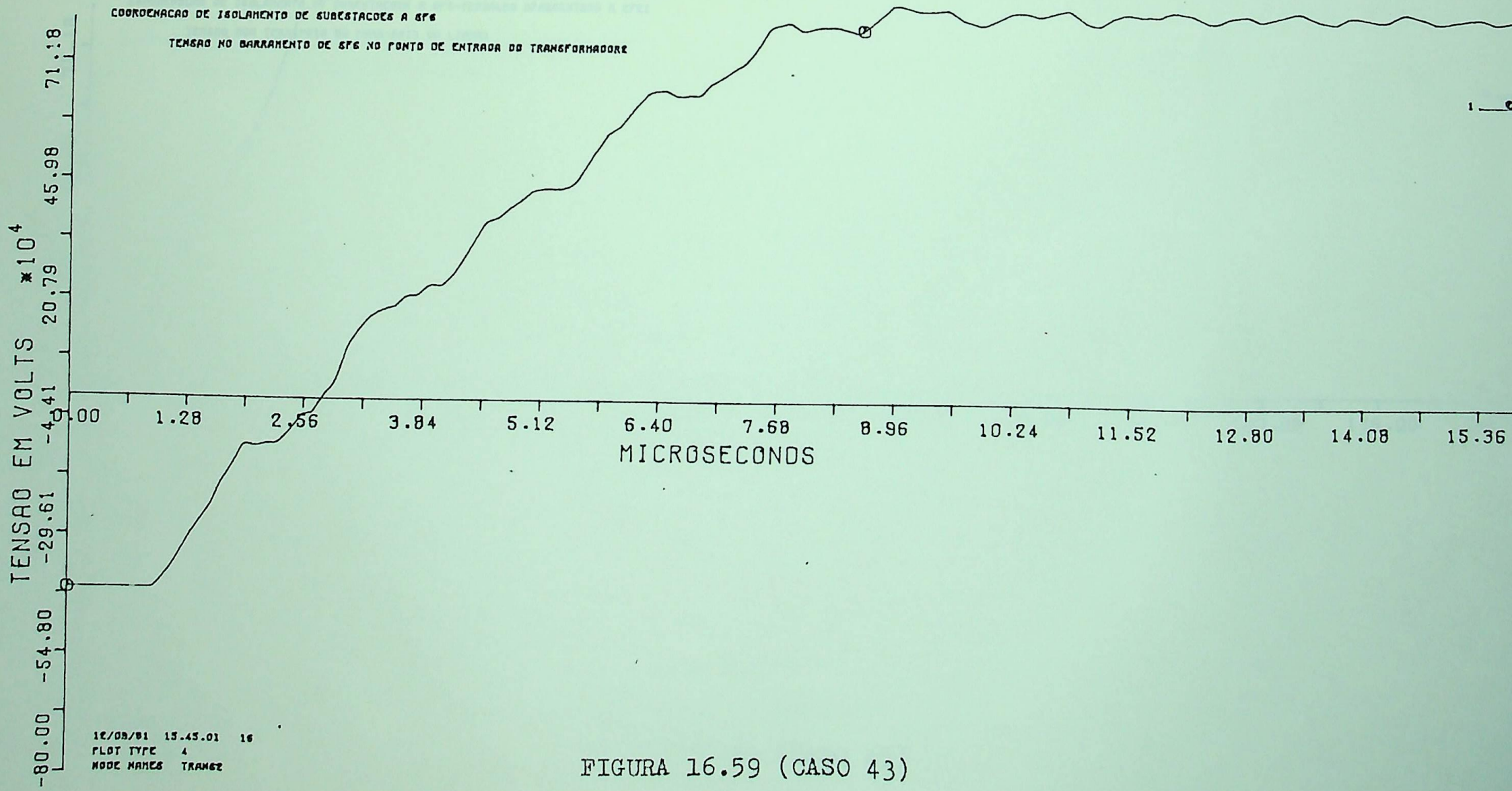


FIGURA 16.59 (CASO 43)

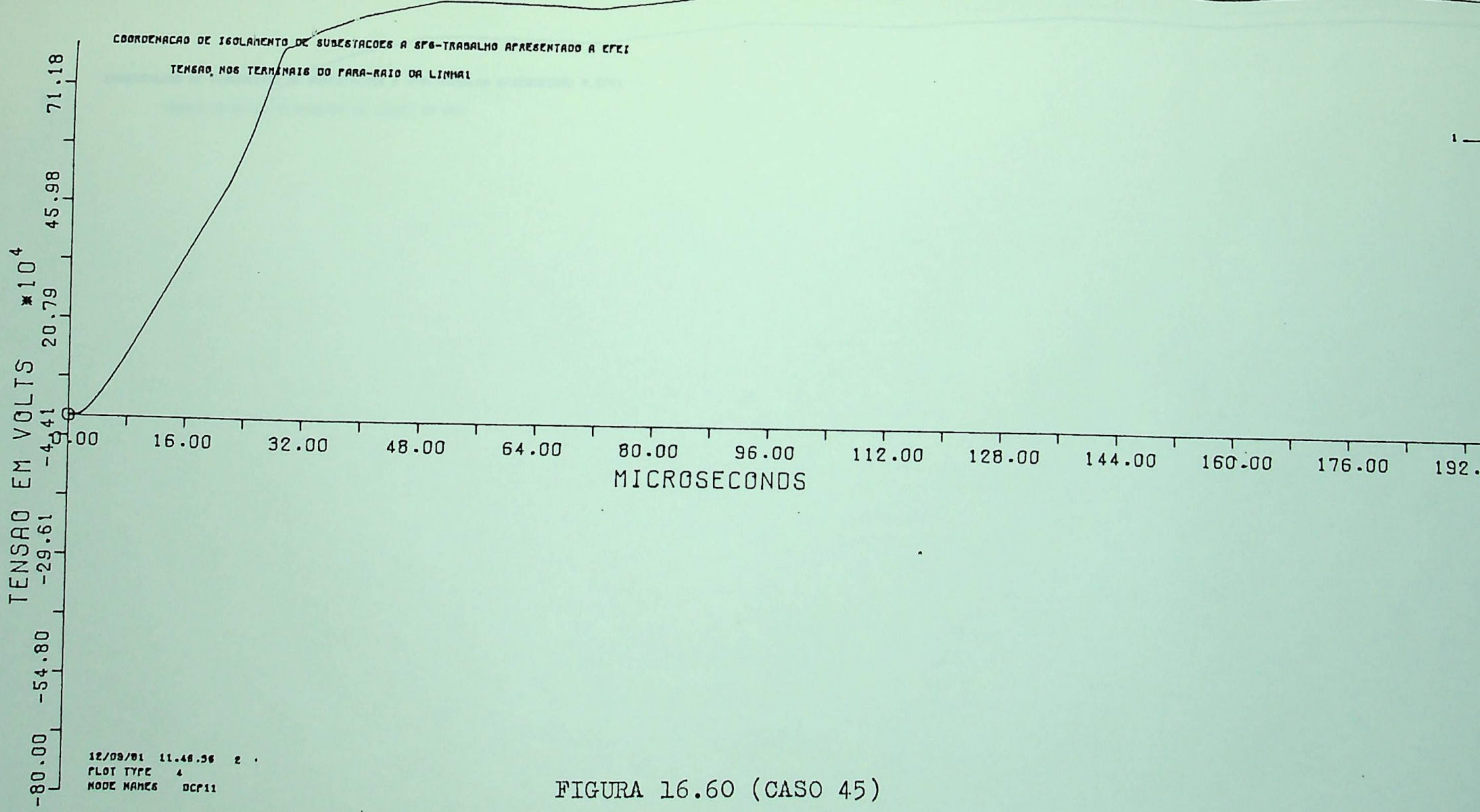


FIGURA 16.60 (CASO 45)

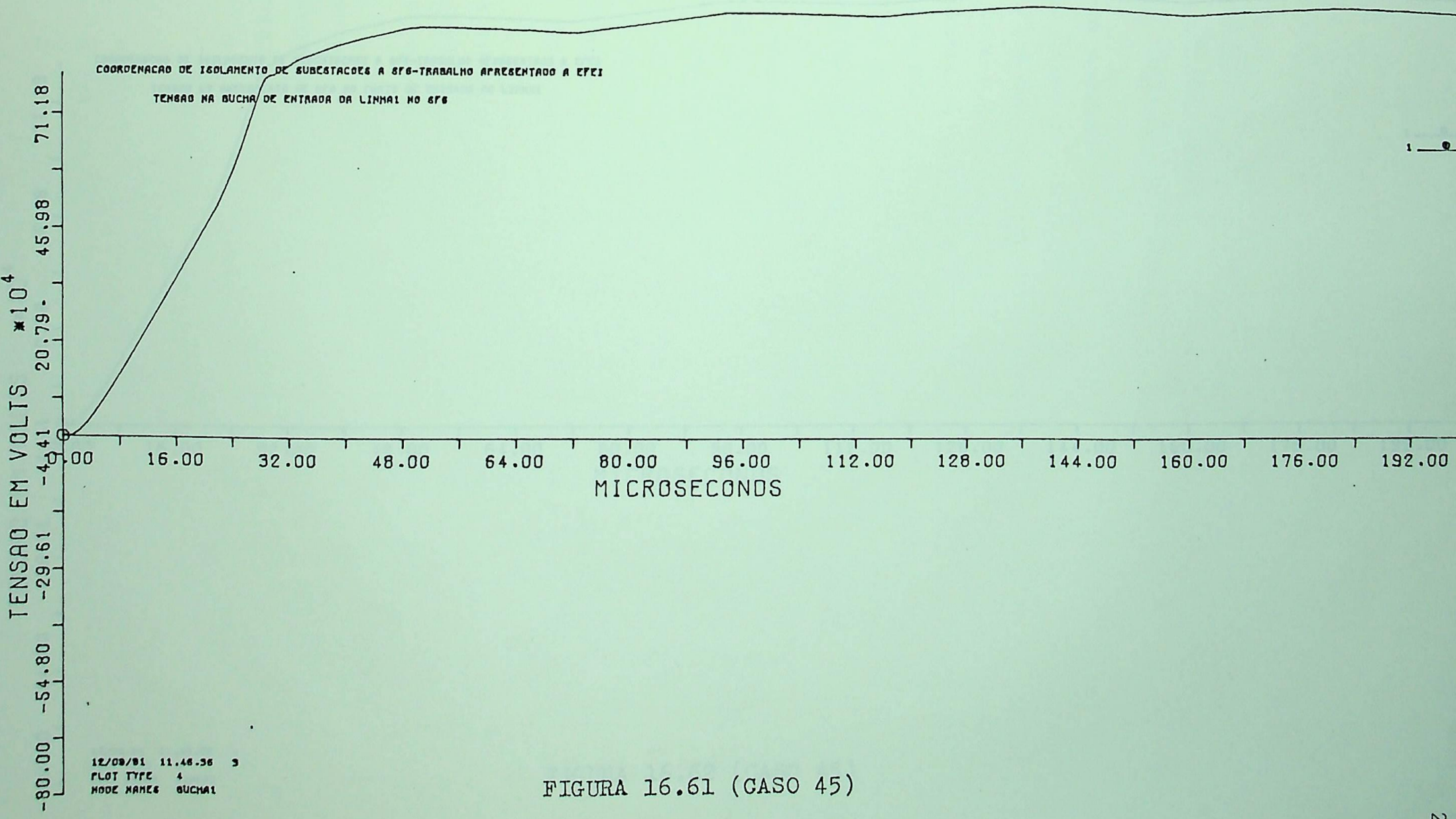


FIGURA 16.61 (CASO 45)

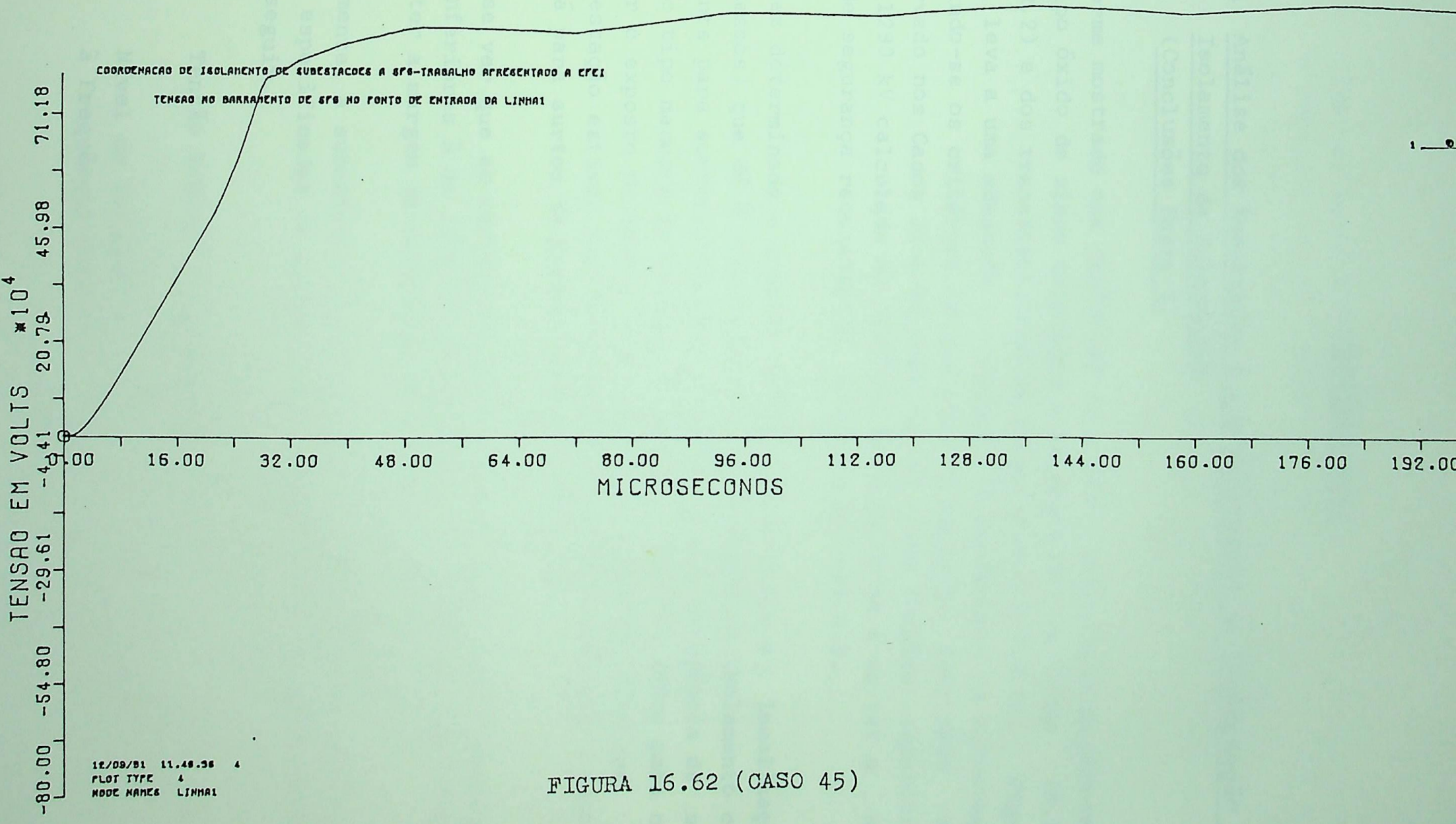


FIGURA 16.62 (CASO 45)

CAPÍTULO XVII

17.1. Análise dos Resultados e sua Utilização na Coordenação de Isolamento da Subestação (Conclusões Parte 2)

Conforme mostrado nos CAPÍTULOS XV e XVI a utilização de pára-raios do tipo óxido de zinco colocados a 4m dos DCP's de linha (P.R.1 e P.R.2) e dos transformadores de força (P.R.3 e P.R.4), Figura 13.1, leva a uma adequada coordenação de isolamento da subestação, seguindo-se os critérios estipulados na Parte 1. Isto pode ser observado nos Casos 25 a 43 onde não se teve tensões superiores à de 1290 kV calculada no CAPÍTULO XII, de forma a se ter a margem de segurança recomendável, descrita no item 6.2.

Uma vez determinado o arranjo de pára-raios (tipo e localização dos mesmos) que dá à subestação uma coordenação de isolamento conveniente para surtos atmosféricos, simulou-se a incidência de surtos do tipo manobra na mesma subestação. Isto foi feito para confirmar o exposto na teoria sobre o assunto onde foi dito que se a subestação estiver coordenada para surtos atmosféricos também estará para surtos de manobra (Casos: 44 e 45).

Pode-se ver que as tensões desenvolvidas ao longo da subestação são inferiores à de 1078 kV calculada no CAPÍTULO XII, de forma a se ter a margem de segurança descrita no item 6.2.

Finalmente, a subestação poderá ter suas características de isolamento especificadas de acordo com as normas ANSI, conforme mostrado a seguir.

Tensão Nominal = 525/550 kV

Nível de Isolamento
à Frequência Nominal = 615 kV

Nível de Isolamento
a Impulsos Atmosféricos = 1550 kV

Nível de Isolamento
a Impulsos de Manobra = 1240 kV

APÊNDICE I

PROGRAMA DIGITAL UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES [47,50,57,64]

1. INTRODUÇÃO

O programa digital utilizado nas simulações efetuadas neste trabalho foi o Electromagnetic Transients Program, da Bonneville Power Administration.

Neste anexo são descritas as características principais deste extenso programa digital. Maiores detalhes sobre os mesmos poderão ser vistos na referência [50]. Cabe observar que o esclarecimento completo do EMTP daria material suficiente para muitas dissertações.

O chamado programa de transitórios da BPA (EMTP) teve sua semente na tese de doutorado sobre simulação de transitórios eletromagnéticos, apresentada por Hermann W. Dommel, na Universidade de Munich, Alemanha, em 1964.

Este trabalho inicial foi continuado, sob o patrocínio, e na Bonneville Power Administration, nos Estados Unidos, onde H. Dommel passou a trabalhar. Atualmente, ele é professor da Universidade de British Columbia, no Canadá, mas a ampliação do programa EMTP continua sendo feita pela BPA.

Cabe observar que este programa é de livre distribuição aos interessados, sendo utilizado atualmente em escala mundial.

Pode ser solicitado por qualquer companhia pública ou particular, bem como instituições de ensino. No Brasil, a Divisão de Estudos de Equipamentos (DEEQ.L), de FURNAS - Centrais Elétricas S.A., atua como o órgão coordenador, responsável pela distribuição da versão IBM do EMTP, e de toda documentação referente ao mesmo.

Basicamente o EMTP se destina a estudos de transitórios eletromagnéticos, possuindo, além disso, recursos que permitem a realização de estudos em regime permanente, cálculo de parâmetros de linhas de transmissão e cabos subterrâneos, análise de sistemas de controle, modelagem dinâmica de máquinas síncronas e simulação de estações conversoras.

É escrito em FORTRAN e qualquer usuário pode propor alterações e/ou correções que depois de analisadas pela BPA poderão vir a fazer parte da versão oficial do programa.

Um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo, por isso, no EMTP são calculados valores a intervalos de tempos discretos. Esta discretização pode ser causadora de erros que, eventualmente, conduzirão a instabilidades numéricas. Por esta razão, por ser simples, numericamente estável e precisa o suficiente para os propósitos da prática, o EMTP usa a regra da integração trapezoidal para solução das equações diferenciais dos elementos concentrados.

Para solução do problema dos ramos com parâmetros distribuídos, a formulação utilizada no EMTP é baseada no método das características, também chamado de método de Bergeron.

O EMTP combina o método de Bergeron com a regra de integração trapezoidal em um algorítmo, além de incorporar também, com o intuito de torná-lo o mais rápido possível, técnicas de esparsidade e de otimização na eliminação das linhas e colunas das matrizes.

2. ELEMENTOS REPRESENTÁVEIS NO EMTP

2.1. Elementos Concentrados

Pode-se representar, sobre a forma de parâmetros concentrados, sem acoplamentos entre fases, resistências, indutâncias e capacitâncias. Estes elementos podem ser representados cada um isoladamente ou sob qualquer forma de combinação entre si.

2.2. Elementos R-L Acoplados

Elementos R-L com acoplamento mútuo entre fases, para qualquer número de fases podem ser representados. No caso de elementos R - L acoplado trifásico há no EMTP a opção de se utilizar diretamente os parâmetros de sequência positiva e zero.

2.3. π's Equivalentes Polifásicos

Um elemento do tipo π equivalente com acoplamento entre fases, para qualquer número de fases pode ser representado.

2.4. Transformadores

Pode-se representar transformadores monofásicos com vários enrolamentos.

Simula-se as impedâncias de dispersão de cada enrolamento, o ramo magnetizante com saturação, perdas no núcleo e a relação de transformação entre enrolamentos.

Naturalmente, a associação de transformadores monofásicos permite a representação de um transformador trifásico.

A última versão (M28) permite, também, a inclusão do ciclo de histeresis do transformador.

2.5. Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão transpostas são representadas por parâmetros distribuídos. No caso de linhas não transpostas deve ser tentada a representação por uma associação de π's equivalentes (2.3).

Pode-se ter também a variação dos parâmetros de sequência zero com a frequência.

2.6. Elementos Não-Lineares

Pode-se representar resistências e indutâncias não-lineares. As resistências são representadas através de pontos no plano tensão-corrente (V, i) e as indutâncias por pontos no plano fluxo-corrente (ψ, i).

Também pode-se representar resistências variáveis em função do tempo (R = f(t)).

2.7. Chaves

Podem ser representadas chaves de tempo controlado, chaves estatísticas, chaves sistemáticas, chaves controladas por tensão, ou por sinais, bem como chaves de medição.

2.8. Fontes

Diversos tipos de fontes podem ser representados no EMTP (em tensão ou corrente), a saber:

- rampa
- degrau
- senoidal
- fontes definidas ponto a ponto
- combinação dos diferentes tipos anteriores

2.9. Máquinas Síncronas

Pode-se representar a dinâmica das máquinas síncronas com base nas equações de Park. A parte mecânica pode ser devidamente representada, bem como os sistemas de controle de tensão e velocidade.

2.10. Modelos de Válvulas Conversoras (Diodos)

O EMTP simula chaves controladas por sinais provenientes do TACS (ver item 3.6), de modo que podem ser representados:

- diodos
- tiristores
- chaves que recebem um sinal de abrir ou fechar (relés, contatos, etc)

3. ROTINAS DE SUPORTE DO EMTP

3.1. Matriz de Impedância de Transformadores

Os transformadores podem ser representados através de matrizes fornecidas por uma rotina própria que utiliza como dados de entrada as tensões dos enrolamentos, a corrente de magnetização, as perdas e as impedâncias de curto-circuito.

3.2. Curva de Saturação

A simulação de elementos saturáveis (transformadores, reatores,etc) necessita-se de pontos de sua curva de saturação em unidades de fluxo e corrente que são obtidos por uma rotina especial chamada "Saturation". Os dados de entrada para esta rotina são os pontos da curva de saturação obtidos em ensaios com leitura de corrente e tensão.

3.3. Variação dos Parâmetros de Sequência Zero com a Frequência

3.4. Cálculo de Constantes de Linhas Aéreas

3.5. Cálculo de Constantes de Cabos Subterrâneos

3.6. Análise Transitória de Sistemas de Controle (TACS)

Esta rotina auxiliar permite a simulação de interações dinâmicas entre a rede elétrica e os sistemas de controle.

Os objetivos principais desta rotina são: a simulação de sistemas de controle de estações conversoras CC e a representação de sistemas de excitação de máquinas síncronas. Os sistemas de controle

podem ser descritos por diagramas de bloco no domínio da frequên - cia.

4. OBSERVAÇÕES GERAIS

Com todos os elementos representados por seus circuitos equivalentes o programa estabelece as equações nodais do sistema. O resultado é um conjunto de equações algébricas que descrevem o estado do sistema, em um determinado instante t com a seguinte forma:

$$[Y]\ [e(t)] = [i(t)] - [I] \qquad (1)$$

Onde:

[Y] - matriz de condutância nodal

[e (t)] - vetor coluna das tensões nodais no instante t

[i (t)] - vetor coluna das correntes nodais injetadas no instante t

[I] - vetor coluna formado pelas fontes de corrente equivalentes conhecidas

Caso só se tenha elementos lineares a matriz [Y] permanece inalterada enquanto não houver mudança na largura do intervalo de integração. Entretanto, caso existam ramos cujos parâmetros sejam não lineares ou variantes no tempo, esta matriz não é mais constantes mas sim alguns de seus elementos serão dependentes da corrente, tensão ou tempo. Nessa situação a equação (1) se torna:

$$[Y(e, i, t)]\ [e(t)] = [i(t)] - [I] \qquad (2)$$

Devendo ser resolvida iterativamente pelo método de Newton-Raphson.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

|1| - GUIMARÃES, Ademir C. e OLIVEIRA, José Carlos de - "Sobretensões nos Sistemas Elétricos", CESE/80 - Apostilha do Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos, Convênio ELETROBRÁS/EFEI, 1980.

|2| - GREENWOOD, Allan - "Electrical Transients in Power Systems", Willey-Interscience, 1971.

|3| - BEWLEY, L. V. - "Travelling Waves on Transmission Systems", Dover Publications, Inc., New York, 1963.

|4| - BICKFORD, J. P., MULLINEAUX, N. e REED, J.R. - "Computation of Power Systems Transients", Peter Peregrinus Ltd., IEE Monograph Series 18, 1980.

|5| - BROWN BOVERI - "Surges in High-Voltage Networks", Plenum Press, New York, 1980.

|6| - CHIPMAN, Robert A. - "Teoria e Problemas de Linhas de Transmissão", McGraw-Hill do Brasil, Ltda., 1972.

|7| - KNABLE, Alvin H. - "Electrical Power Systems Engineering - Problems and Solutions", McGraw-Hill Book Company, 1974.

|8| - HEDMAN, D. E. - "Teoria das Linhas de Transmissão I e II", Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência - Série P.T.I., Universidade Federal de Santa Maria, 1978.

|9| - HEDMAN, D. E. - "Coordenação de Isolamento", Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência - Série P.T.I., Universidade Federal de Santa Maria, 1979.

|10| - DIESENDORF, W. - "Insulation Coordination in High-Voltage Electric Power Systems", Butterworths, London, 1974.

|11| - WAHLSTROM, B., HOLMBORN, H. and SCHEI, A. - "Overvoltage Protection of Metal-Enclosed SF_6 - Substations - Insulation Coordination Philosophy and Surge Arrester Characteristics", CIGRE 33.03, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1976 Session, August 25 - September 2.

|12| - OLSEN, K., LANGE-ANDERSEN, D., ULRIKSEN, Th., HUSE, J. and SCHEI, A. - "Lightning Overvoltages in SF_6 - Installations - Risk of Failure Analysis", CIGRE 33.01, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1978 Session, August 30 - September 7.

|13| - PETTERSSQN, K., HOLMBORN, H., OLSSON, P. and LINDBERG, L. - "Overvoltage Protection of Metal Enclosed SF_6 Substations Considering Steep Surges", CIGRE 33.05, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1978 Session, August 25 - September 2.

|14| - BOECK, W. and PETTERSON, K. - "Fundamentals and Specific Data of Metal-Enclosed Substations for the Insulation Coordination", CIGRE 23.03, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1978 Session, August 30 - September 7.

15| - MORII, K. MATSUMURA, S., OKADA, T., USHIO, T., TOMINAGA, S. and INAMURA, S. - "Field Experience and Future Trends of 500 kV Gas-Insulated Metal-Clad Substations", CIGRE 23-02 , International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1978 Session, August 30 - September 7.

16| - KNORR, W., MÖLLER, K. and DIEDERICH, K. J. - "Voltage - Time Characteristics of Slightly Nonuniform Arrangements in SF_6 Using Linearly Rising and Oscillating Lightning Impulse Voltages", CIGRE 15.05, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1980 Session, August 27 - September 4.

|17| - GARY, C., DRAGAN, G. and CRITESCU, D. - "Attennuation of Travelling Waves Caused by Corona", CIGRE 33-13, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1978 Session - August 30 - September 7.

|18| - POPOLANSKY, F. - "Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents", CIGRE, ELECTRA Nº 22, pp 139 - 147.

|19| - BERGER, K., ANDERSON, R.B. and KRÖNINGER, H. - "Parameters of Lightning Flashes", CIGRE, ELECTRA Nº 41, pp. 23 - 37.

|20| - ANDERSON, R. B. and ERIKSSON, A. J. - "Lightning Parameters for Engineering Application", CIGRE 33, Colloquium and Study Committee Meeting Suceava, Roumania, 25-29 June, 1979.

|21| - HILLEMAN, Andrew R. - "Lightning Protection of Stations", CIGRE SC 33, Krakow, Poland, 17 - 22 - September 1973.

|22| - HILLEMAN, Andrew R. - "Lightning Protection of Stations" CIGRE SC 33, Montreal, Canada, June 16 - 18, 1975.

|23| - GANGER, B. and VIGREUX, J. - "May the GIS SF_6 be Considered as Self-restoring?", CIGRE, ELECTRA Nº 75, March, 1981, pp 31-39.

|24| - CARRARA, Guido - "General Report of Group 33 - Overvoltages and Insulation Coordination", CIGRE, ELECTRA Nº 49, December, 1976, pp 117-123.

|25| - "Overvoltages and Insulation Coordination" - CIGRE, Group 33 Colloquium, Trondheim, Norway, 1980.

|26| - ANDERL, Helfried W., WAGNER, Charles L. and DODDS, Thomas H. - "Insulation Coordination for Gas-Insulated Substations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-92, September/October 1973, pp 1622-1630.

27| - CRONIN, J. C., COLCLASER, R. G. and LEHMAN, R. F.- "Transient Lightning Protection Requirements for a 500 kV Gas-Insulated Substation", IEEE Paper Nº 77 197-7.

28| - OH-HARA, J., OH-HASHI, N., MURAKAMI, Y., KOJIMA, S. and MANJU, S. - "Line Entrance Protection of 500 kV Gas-Insulated Substations by SF_6 Spark Gaps", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, Nº 6, Nov./Dec. 1978 , pp 2425-2433.

29| - KOEPFINGER, J. L., BACVAROV, D. C. and ROCAMORA, R. G.- "The Surge Protection of an SF_6 Gas-Insulated Substation Supplied by Pipe-Type Cables", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, Nº 6, Nov./Dec. 1978, pp 2282-2290.

30| - CUK, N., NISHIKAWARA, K. K., McCRAE, G. G. and ADAMS, P. T. B. - "Specification and Application of SF_6 Gas-Insulated Switchgear - A Utility's Point of View", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, Nº 6 Nov./Dec. 1980, pp 2241-2250.

31| - HILEMAN, Andrew R., GUYKER, William C., POWELL, Ralph W. , RICHTER, Willian A. and DESALVO, Joseph M. - "Insulation Coordination in APS 500 kV Stations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, Nº 6, June 1967, pp 655-665.

32| - PHELPS, James D. M., PUGH, P. S. and BEEHLER, JAMES E. -"765 kV Station Insulation Coordination", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, Nº 9, September 1969, pp 1377-1382.

33| - BROWN, Gordon W. and THUNANDER, Steven - "Frequency of Distribution Arrester Discharge Currents Due to Direct Strokes", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, Nº 5, September/October 1976, pp 1571-1578.

34| - SARGENT, Michael A. and DARVENIZA, Mat - "Tower Surge Impedance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, Nº 5, May 1969, pp 680-687.

35| - BROWN, Gordon W. - "Lightning Performance - I - Shielding Failures Simplified" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, Nº 1, January - February 1978, pp 33-38.

36| - BROWN, Gordon W. and WHITEHEAD, Edwin R. - "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding Part II", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 88, Nº 5, May 1969, pp 617-626.

37| - ARMSTRONG, H. R. and WHITEHEAD, Edwin R. - "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, Nº 1 January 1968, pp 270-281.

38| - EDLINGER, A. - "500 kV SF_6 Switchgear Installation Grajau - Determination of Overvoltages under Adjacent Lightining Conditions", BROWN BOVERI, Report nº AGS-S 79/225, October 4, 1979.

39| - GENERAL ELECTRIC - "Allugard II Station Arrester - Second Generation of Allugard Protection 2,4 kV to 765 kV - Application Guide".

40| - GENERAL ELECTRIC - "Tranquell Station Surge Arresters - Application Guide".

41| - HOLMBORN, H. - "Coordenação de Isolamento e Arranjos dos Pára-raios das Subestações a SF_6", ASEA.

42| - BROWN BOVERI - "500 kV SF_6 GIS Grajau - Insulator Failure of April 6, 1979".

43| - PINHEIRO, Ricardo Pinto, NETO, João da Costa Patrão e TANNURI, José Galib - "Coordenação de Isolamento da Subestação em SF_6 da UHE de Tucuruí", V SNPTEE, Recife, Brasil.

44| - KASTRUP, Oscar, SILVA, Rulemar P. e COSENTINO, Aldo - "Subestações de 500 kV da ELETROSUL - Coordenação de Isolamento", VI SNPTEE, Rio de Janeiro, Brasil.

45| - ESMERALDO, Paulo Cesar V. - "Análise das Sobretensões Causadas por Descargas Atmosféricas na Subestação a SF_6 de Grajau - Parte I", Nota Técnica DSE.L.0034.81, FURNAS-Centrais Elétricas S.A.

46| - OLIVEIRA, José Carlos de e GUIMARÃES, Ademir C. - "Notas de Aulas do Curso de Sobretensões em Sistemas Elétricos", Curso de Pós-Graduação em Sistemas Elétricos, EFEI, 1980.

47| - Notas de Aula do Curso "Power Systems Analysis Using the Electromagnetic Transients Program", na Universidade de Wisconsin, 1979.

48| - IEEE TUTORIAL COURSE - "Surge Protection in Power Systems", Course Text 79 EH0144-6-PWR.

49| - USA and IEEE Standard for Lightning Arresters for Alternating - Current Power Circuits - ANSI C 62.1/IEEE Nº 28,1967.

50| - Electromagnetic Transients Program - EMTP User's Manual.

51| - Application Guide for Transient Recovery Voltage for A.C. High-Voltage Circuit-Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis - ANSI C37.0721, 1971.

52| - DEEQ.L (Divisão de Estudos de Equipamentos) - Informações conseguidas junto a fabricantes ejá utilizadas em estudos internos de FURNAS-Centrais Elétricas S.A.

3| - CARVALHO, Francisco M. Salgado e NORA DIAS, Luis Eduardo - "Sobretensões Provocadas pela Operação de Chaves Seccionadoras no Interior da Blindada de 500 kV, a SF_6, na Subestação de Grajau", Nota Técnica DSE.L.0032.81, FURNAS-Centrais Elétricas S.A.

4| - MATSUMURA, Susumu and NITTA, Tohei - "Surge Propagation in Gas-Insulation Substation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, Nº 6, June 1981, pp 3047-3054.

5| - ANDERSEN, Dag Lange and ULRIKSEN, T - "Lightning Overvoltages in SF_6 - Insulated Switchgear", Norwegian Water Resources and Electricity Board (NVE), Norway.

6| - ANDERSEN, Dag Lange and SPAEREN, Per - "Insulation Coordination and Experience with Metal-enclosed SF_6 Substation in Norway", Norwegian Water Resources and Electricity Board (NVE), Norway.

7| - IEEE TUTORIAL COURSE - "Digital Simulation of Electrical Transient Phenomena", Course Text 81 EH0173-5 PWR.

8| - SARGENT, Michael A. - "The Frequency Distribution of Current Magnitudes of Lightning Strokes to Tall Structures", T72 216-5, IEEE Winter Meeting, New York, N. Y., 1972.

9| - ERIKSSON, Roland and HOLMBORN, Hakan - "Insulation Coordination of Gas-Insulated Substations", International Symposium on Gaseous Dielectrics, Knoxville, Tennessee, U.S.A., March 6-8, 1978.

0| - IEC Publication 517 - "High-Voltage Metal-Enclosed Switchgear for Rated Voltage of 72,5 kV and above, First Edition, 1975.

1| - IEEE P 468-1/D2 - "Gas-Insulated Substations Standards - Recommended Practices and Guides", Prepared by Working Group 70.1 of the Substations Committee of IEEE, 1977.

- EPRI - "Transmission Line Reference Book - 345 kV and Above", Palo Alto, Califórnia, 1975.

- "Niveis de Isolamento a Impulso (BIL) dos Equipamentos e Localização de Pára-raios nas Subestações de 800 kV, do Sistema em Corrente Alternada, de Itaipu" - Grupo de Estudos MONASA-THEMAG-PTEL.

- PEREIRA, Marco Polo e GUIMARÃES, Eduardo Bueno - "Programa Digital de Transitórios Eletromagnéticos da BPA (EMTP)", Subcomitê de Engenharia de Sistemas Elétricos, CIER.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

DATA 08 / 87 / 1082
PROC.
PED.
Liv. CPG/0565.
NCr$ Doação

INVENTÁRIO
BIM - EFEI

DATA	Rubrica

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200333
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA