

## CAPÍTULO 8

### PROJETO E MONTAGEM DE UM PROTÓTIPO DE EXCITATRIZ ESTÁTICA

#### 8.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a implementação prática dos conceitos relacionados ao sistema de excitação estático através do projeto, montagem e testes de um protótipo de excitatriz estática para uma máquina síncrona do Laboratório de Máquinas Elétricas da PUC/RJ.

Este projeto é composto da ponte retificadora com respectivo transformador, regulador de tensão, circuito de disparo, proteção de sobretensões geradas internamente a ponte e circuito de partida. As demais proteções, os circuitos limitadores, o compensador de corrente reativa e o sinal adicional estabilizante não foram implementados devido a limitações de equipamentos e tempo disponível para a conclusão deste trabalho.

Inicialmente foram realizados testes para levantamento dos parâmetros da máquina. Estes testes estão baseados nas re-

ferências [7,8,9,13,14,15] e são apresentados no Apêndice I com os respectivos resultados.

## 8.2. CIRCUITO CONVERSOR

Como se trata de um conversor de baixa potência o circuito escolhido foi o retificador monofásico controlado de onda completa (circuito de dois pulsos).

A corrente de carga para o conversor foi determinada com base no método proposto pela referência [13], ou seja, inicialmente determina-se a tensão atrás da reatância de potier  $E_p$  através da seguinte expressão

$$E_p = \sqrt{(E_t \cos \phi + I_a \cdot R_s)^2 + (E_t \cdot \sin \phi + I_a X_p)^2} \quad (8.1)$$

onde

$X_p$  = reatância de potier, por unidade

$E_t$  = tensão terminal de armadura especificada, por unidade

$I_a$  = corrente de armadura especificada, por unidade

$R_s$  = resistência de seqüência positiva, por unidade

$\phi$  = ângulo de fator de potência

Em seguida determina-se a corrente de campo pela Equação

8.2.

$$I_{fl} = I_{fb} + \sqrt{(I_{fg} + I_{fbi} \sin \phi)^2 + (I_{fbi} \cos \phi)^2} \quad (8.2)$$

onde

$I_{fg}$  = corrente de campo na linha do entreferro para a tensão terminal especificada;

$I_{fbi}$  = corrente de campo correspondente a corrente de armadura especificada na curva de saturação de curto-circuito

$I_{fb}$  = a diferença entre a corrente de campo na curva de saturação em vazio e a corrente de campo na linha do entreferro, ambas para  $E_p$ .

Resolvendo estas equações para as condições nominais do gerador, obtêm-se a corrente de campo máxima de 5,32 A. Para o dimensionamento do transformador consideramos o valor de 6 amperes, atribuindo assim uma pequena margem de segurança.

Tendo como base a resistência do enrolamento de campo de 4,8  $\Omega$ , a tensão de campo de 1,0 por unidade, na linha do entreferro, equivale a 7,78 volts. Tomando como referência a corrente de campo na curva de saturação em vazio para tensão terminal nominal do gerador, a tensão de campo de 1,0 por unidade corresponde a 10,85 volts. A tensão de campo com tensão terminal e carga nominais é de 25,5 V.

Embora não houvesse uma condição específica para a determinação da tensão de teto, foi escolhido o valor mínimo de

2,0 p.u. e máximo de 4,0 p.u. tendo como base a tensão de campo para tensão terminal nominal com carga nominal, conforme analisado no Capítulo 4.

As grandezas para o conversor são calculadas de modo semelhante ao da ponte retificadora trifásica e as expressões que diferem para este circuito são dadas abaixo:

$$e_0 = E_{d0} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \cos(n \omega t - \theta_n) \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} E_{d0} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} E_s \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) = \\ &= \frac{2 \sqrt{2}}{\pi} \cdot E_s \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$c_n = [a_n^2 + b_n^2]^{1/2} \quad (8.5)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n} \quad (8.6)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e_0 \sin(n \cdot \omega \cdot t) \cdot d(\omega t) \quad (8.7)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e_0 \cos(n \cdot \omega \cdot t) \cdot d(\omega t) \quad (8.8)$$

$$E_r = \left[ \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} [\sqrt{2} \cdot E_s \cdot \sin(\omega t)]^2 \cdot d(\omega t) \right]^{1/2} = E_s \quad (8.9)$$

$$E_{ri} = [E_r^1 - E_{d0}^2]^{1/2} \quad (8.10)$$

$$I_k = \frac{I_d}{2} \quad (8.11)$$

$$I_{rk} = \frac{I_d}{\sqrt{2}} \quad (8.12)$$

$$I_a = I_d \quad (8.13)$$

$$P_s = I_d \cdot E_s = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot E_{d0} \cdot I_d \quad (8.14)$$

$$P_s = 1,11 P_0 \quad (8.15)$$

$$i_a = \frac{4}{\pi} I_d \left[ \cos w t + \frac{1}{3} \cos 3 w t + \right. \\ \left. + \frac{1}{5} \cos 5 w t + \dots \right] \quad (8.16)$$

$$E_x = 0,318 \cdot X_c \cdot I_d \quad (8.17)$$

A potência necessária do transformador considerando as tensões de 2,0 a 4,0 p.u. e uma variação de  $\pm 15\%$  em torno de tensão nominal do gerador  $\bar{e}$  de

$$P_s = 1,11 \times 1,15 \times 2,0 \times 25,5 \times 6 = 390,6 \text{ W}$$

$$P_s = 1,11 \times 1,15 \times 4,0 \times 25,5 \times 6 = 781,2 \text{ W}$$

Foi utilizado um transformador disponível no laboratório

com capacidade de suprir estas potências. Seus dados estão relacionados no Apêndice II. A tensão eficaz no secundário (80 V) produz uma tensão de teto máxima (sem perdas) de

$$E_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot E_s = 72 \text{ V} \quad \text{ou} \quad 2,82 \text{ p.u.}$$

Este valor é razoável e está na faixa de 2,0 a 4,0 p.u.

A componente fundamental da corrente eficaz no enrolamento secundário é

$$I_{ir} = \frac{4}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 5,32 = 4,79 \text{ A}$$

As componentes de 3, 5, 7, ... harmônicos têm amplitude de 1/3, 1/5, 1/7, ... da fundamental, respectivamente.

O tiristor deve suportar uma tensão reversa repetitiva, considerando um fator de segurança de 3,0, de

$$E_{kmax} = \sqrt{2} \cdot 72,3 \cdot 3 = 306,7 \text{ V}$$

Para esta tensão não é necessário a ligação de tiristores em série.

A corrente média máxima de regime permanente por tiristor é de

$$I_k = \frac{I_d}{2} = 2,66 \text{ A}$$

Tendo em vista se tratar de um projeto para um gerador de baixa potência, a filosofia adotada foi a de dimensionamento do

conversor para suportar continuamente a corrente de teto. Isto simplifica razoavelmente o projeto pelo fato de se evitar redundância ou mesmo proteção de tiristores. Deste modo procurou-se dimensionar a corrente média por tiristor com suficiente margem térmica. Assim, considerando a tensão terminal máxima do gerador de 1,15 p.u. a corrente que cada tiristor deve suportar sem exceder a 70% de sua capacidade térmica é

$$I_k = 2,66 \times 2,82 \times 1,15 = 8,63 \text{ A}$$

O tiristor disponível, no laboratório, que suporta as condições especificadas acima é o SKT 16/04c. Este tiristor foi utilizado no projeto e as suas características estão relacionadas no Apêndice III.

Utilizou-se apenas o amortecedor de linha pelo fato de praticamente não haver indutância entre as conexões dos tiristores. Calculou-se a indutância de comutação com base na reatância de curto-circuito do transformador de excitação, resultando em  $L_c = 1,36 \text{ mH}$ . O procedimento de cálculo da resistência e do capacitor teve como base a referência [43]. O valor de  $-di/dt$  calculado é de

$$-\frac{di}{dt} = \frac{1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot E_s}{L_{cc}} \approx 0,1 \text{ A}/\mu\text{s}$$

A curva que relaciona a corrente média do tiristor ( $I_d$ , a variação de corrente ( $-di/dt$ ) e a carga de recuperação ( $Q_{rr}$ ), fornecida pelo fabricante (Apêndice III), não abrange o valor calculado para  $di/dt$ . Utilizou-se, o menor valor fornecido (4 C) que pode ser considerado conservativo. Com estes valores deter

minou-se a corrente de pico no amortecedor através da Equação 8.16.

$$I_p = \sqrt{2 \cdot Q_{rr} \cdot (-di/dt)} = 0,632$$

Foram também considerados o  $dv/dt$  máximo de 100 V/ $\mu$ s (metade do máximo permitido) e o fator de amortecimento ( $\xi$ ) de 0,65. Estes dados resultaram em  $R = 130$  e  $C = 0,016$  F.

### 8.3. CIRCUITO DE DISPARO

O método de disparo utilizado foi o de cruzamento por rampa. Foram aproveitadas as facilidades do circuito integrado TCA780 e o desacoplamento galvânico da transmissão de pulsos para o tiristor foi implementado com acopladores óticos 4N40, diretamente conectados aos tiristores. O uso destes acopladores foi possível por se tratar de um conversor com baixa tensão e baixa corrente para disparo dos tiristores (100 mA). Isto simplificou substancialmente o circuito de disparo, obtendo-se pulsos longos sem a necessidade da modulação. Os ângulos de disparo máximo e mínimo são garantidos através da limitação da tensão de controle dentro de uma faixa prefixada (5 a 90%) da rampa de sincronização. Para isto, assumiu-se que a frequência da tensão de sincronização permanece constante, e com isto tem-se a amplitude da rampa constante. Entretanto, o circuito utilizando, o TCA780, permite um controle auxiliar para manter a amplitude da rampa constante caso haja variações acentuadas de



freqüência. O problema de deriva no circuito de controle não se mostrou crítico. O Apêndice IV mostra o diagrama do circuito de controle.

#### 8.4. REGULADOR DE TENSÃO

O regulador é composto dos circuitos de medição e comparação e de um controlador PI.

A transdução da tensão terminal é efetivada por meio de três transformadores monofásicos com ligação Y- $\Delta$ , retificação de 6 pulsos e um filtro passa baixa de primeira ordem (Apêndice IV). A constante de tempo de filtragem estabelecida é de 20 ms, que proporciona um fator de redução de 45 (- 33 dB) para o sexto harmônico e 1,18 (- 1,4 dB) para a freqüência de 5 Hz.

O controlador PI foi dimensionado para uma constante de tempo de integração de 1,5 s, valor duas vezes superior a constante de tempo do enrolamento de campo (0,75). O ganho pode variar de 5 a 150 p.u./p.u. Os circuitos estão no Apêndice IV.

#### 8.5. TESTES DE DESEMPENHO

Para verificação do desempenho do protótipo foram realizados testes de pequenas e grandes perturbações, que são os seguintes:

- Resposta ao degrau na referência do regulador de tensão;

- Aplicação e rejeição de carga indutiva;
- Aplicação e rejeição de carga capacitiva;
- Curto-circuito súbito nos terminais do gerador;
- Teste de partida da excitação;
- Teste de desenergização.

Estes testes foram registrados com um oscilógrafo de precisão com velocidade do papel de 5 cm/s e são analisados nos itens que seguem.

### 8.5.1. TESTES DE RESPOSTA AO DEGRAU

A função deste teste foi a de verificar o desempenho do sistema de excitação para diversos ganhos do regulador de tensão.

O teste consiste da aplicação de um degrau negativo de 20% na referência do regulador de tensão e após o tempo de acomodação este degrau é retirado. Este método é usual em ensaios de comissionamento e ajuste de parâmetros. As grandezas registradas foram tensão de campo e de armadura.

Os valores dos ganhos ajustados são dados aproximados em virtude da não-linearidade do circuito de disparo (estima-se uma variação de  $\pm 20\%$ ).

As Figuras 8.1 e 8.2 mostram o resultado da aplicação do degrau e a sua retirada, respectivamente, com o ganho de 5 p.u./p.u. A resposta pode ser considerada lenta (1,0 s) tendo em vista a constante de tempo de enrolamento de campo do gerador.

Nas Figuras 8.3 e 8.4 estão os resultados para ganhos de 40 e 140 p.u./p.u. respectivamente. O tempo de resposta foi melhorado substancialmente em ambos os casos, sendo aproximadamente semelhantes.

Convém observar que não ocorreu ultrapassagem, mesmo com o maior ganho ajustado. Isto porque com as constantes de tempo do sistema de excitação relativamente baixas seria necessário um ganho superior, para que o modo de excitação da malha do regulador se tornasse pouco amortecido.

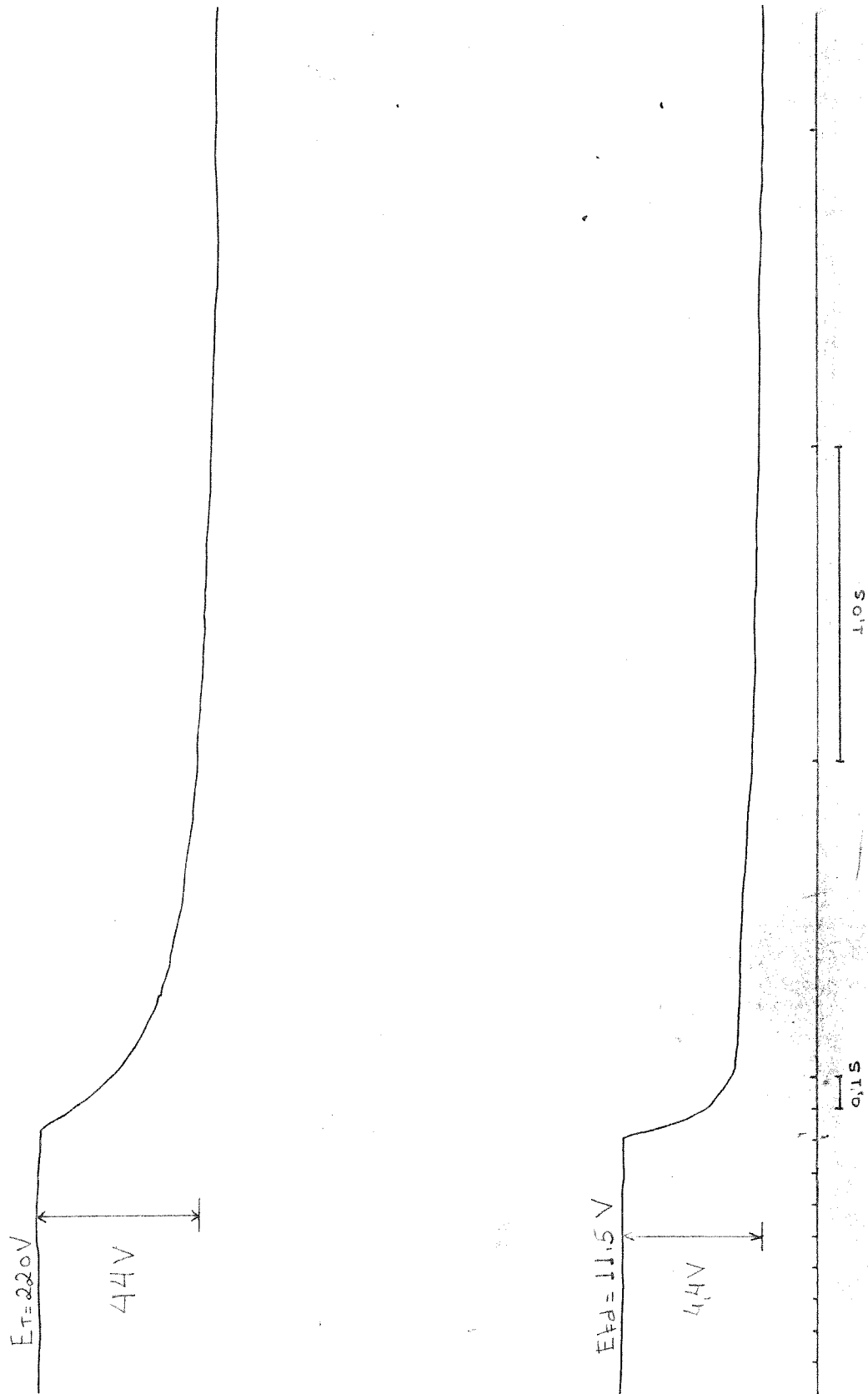


Figura 8.1 - Resposta ao degrau para um ganho de 5 p.u./p.u.

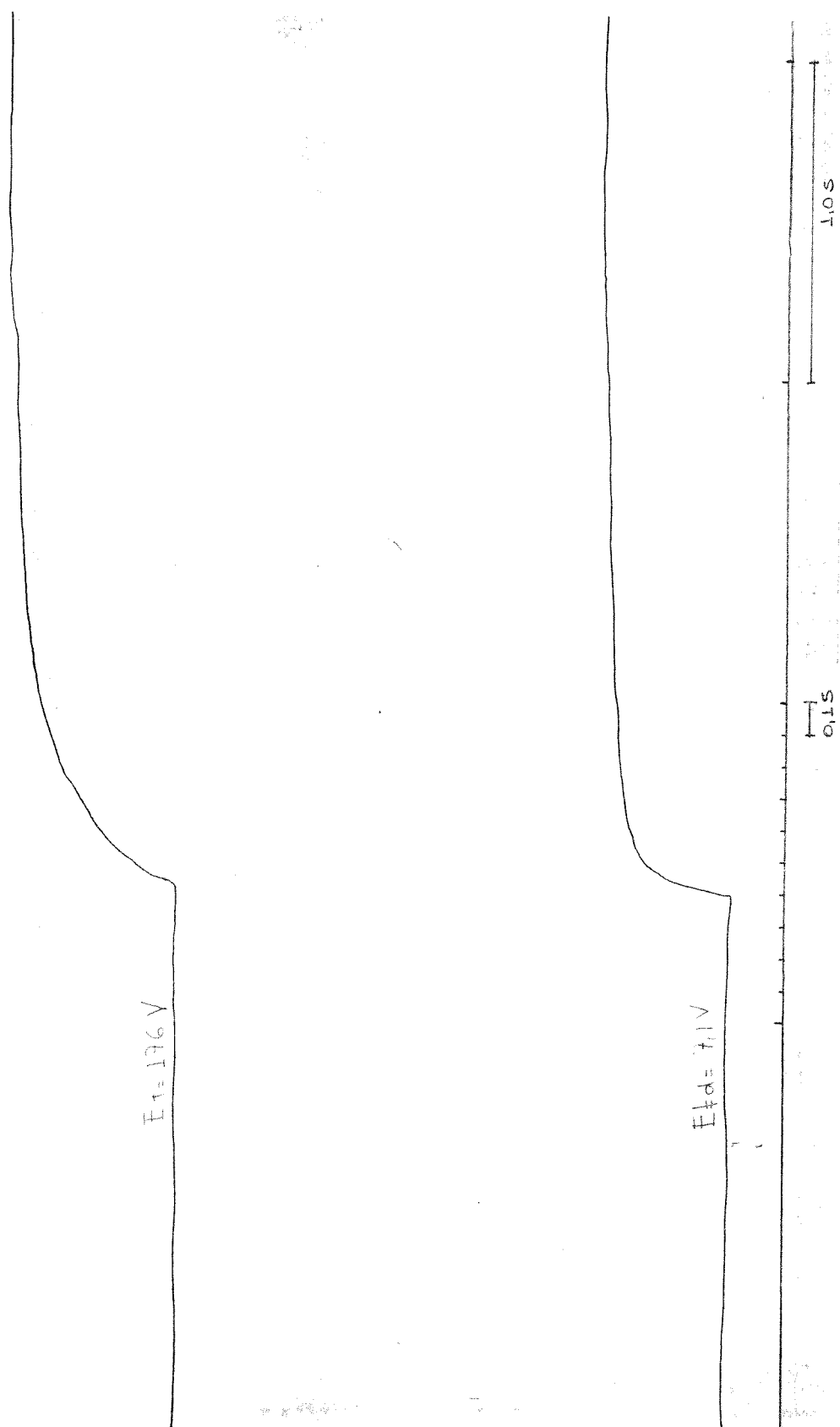


Figura 8.2 - Retorno a condição nominal com o ganho de 5 p.u./p.u.

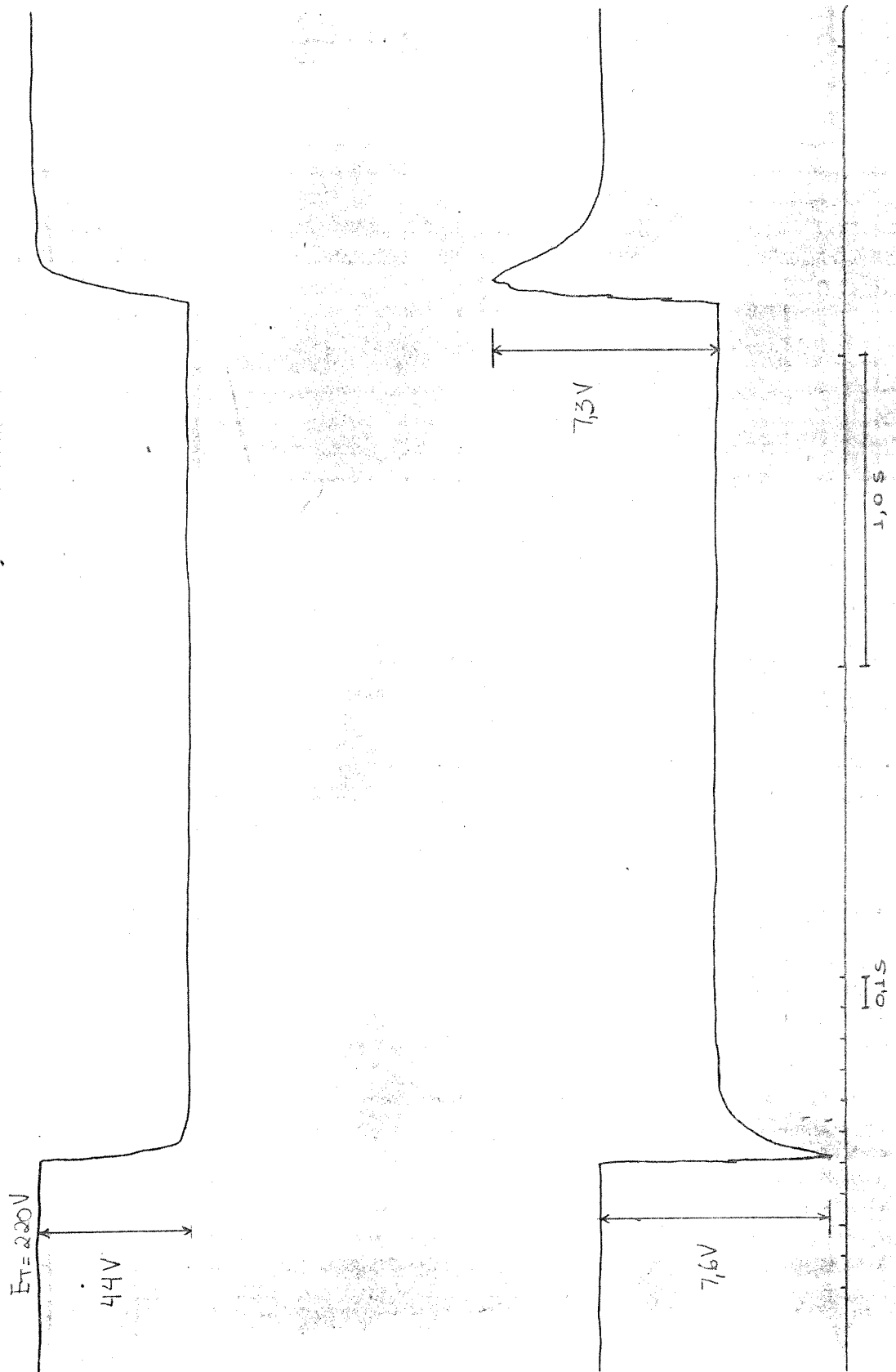


Figura 8.3 - Resposta ao degrau com o ganho de 40 p.u./p.u.

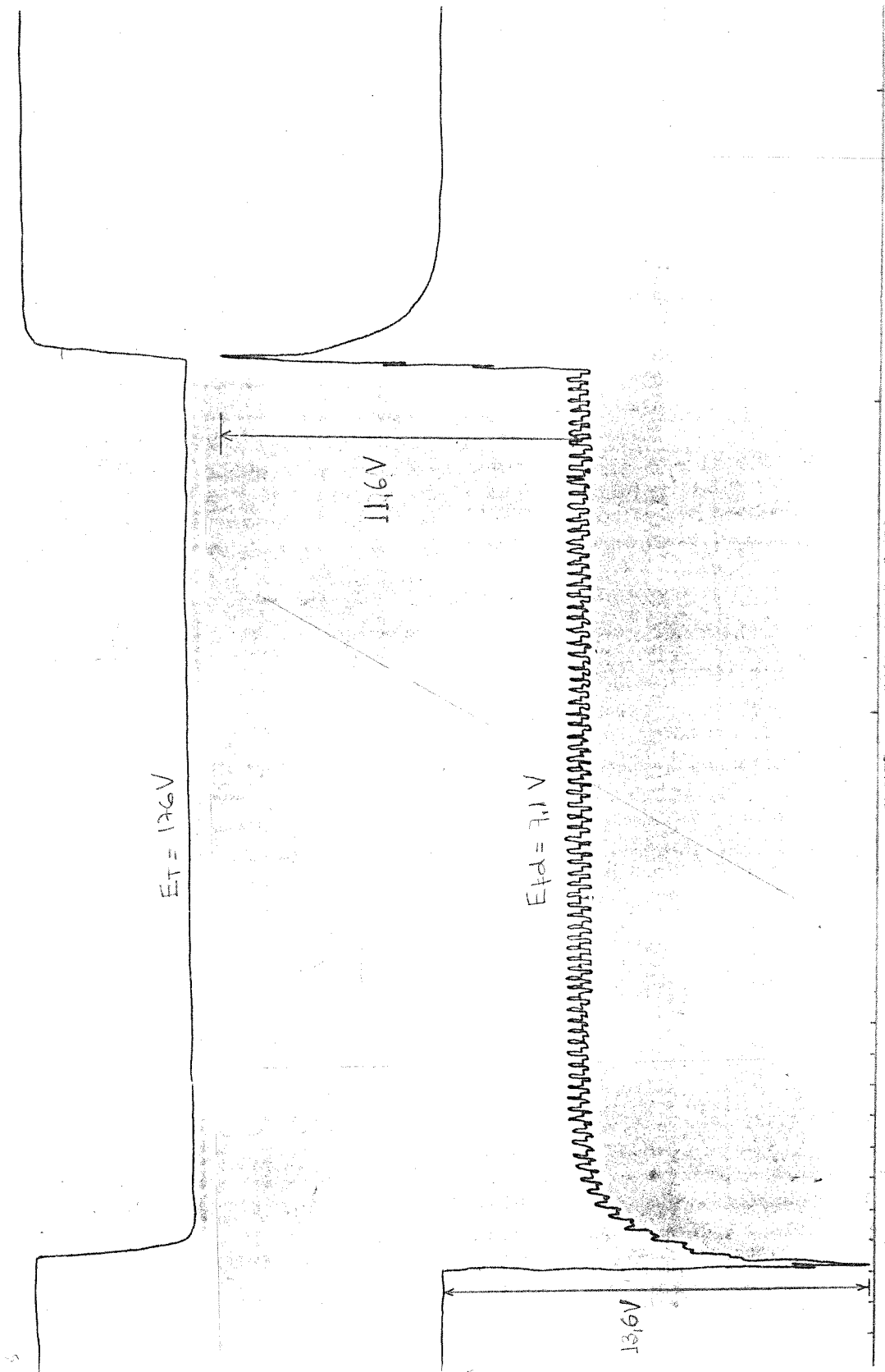


Figura 8.4 - Resposta ao degrau com o ganho de 140 p.u./p.u.

### 8.5.2. APLICAÇÃO E REJEIÇÃO DE CARGA INDUTIVA

Neste teste procurou-se verificar o desempenho do sistema de excitação a partir da variação inicial e do tempo de recuperação de tensão do gerador para a aplicação e rejeição de uma carga indutiva que solicita-se a corrente nominal de campo (5,4 A). A corrente de armadura chegou a 9 A (0,68 p.u.) em regime permanente.

Nas Figuras 8.5 e 8.6 estão os resultados da aplicação e rejeição respectivamente, com o ganho do regulador ajustado para 40 p.u./p.u. Observa-se na Figura 8.5 uma queda de tensão inicial de 24% aproximadamente e um tempo relativamente longo para a recuperação de tensão (2 s). O resultado da rejeição é menos crítico já que a elevação de tensão foi de 12%.

Com o ganho ajustado para 140 p.u./p.u. o desempenho melhorou substancialmente na aplicação da carga, Figura 8.7, a queda de tensão foi inferior a 10% com tempo de recuperação de 0,1 s aproximadamente. Na rejeição a elevação de tensão, Figura 8.8, foi de 6% (13,2). Também é interessante notar que, na aplicação da carga, não ocorreu redução da tensão de campo como na Figura 8.5.



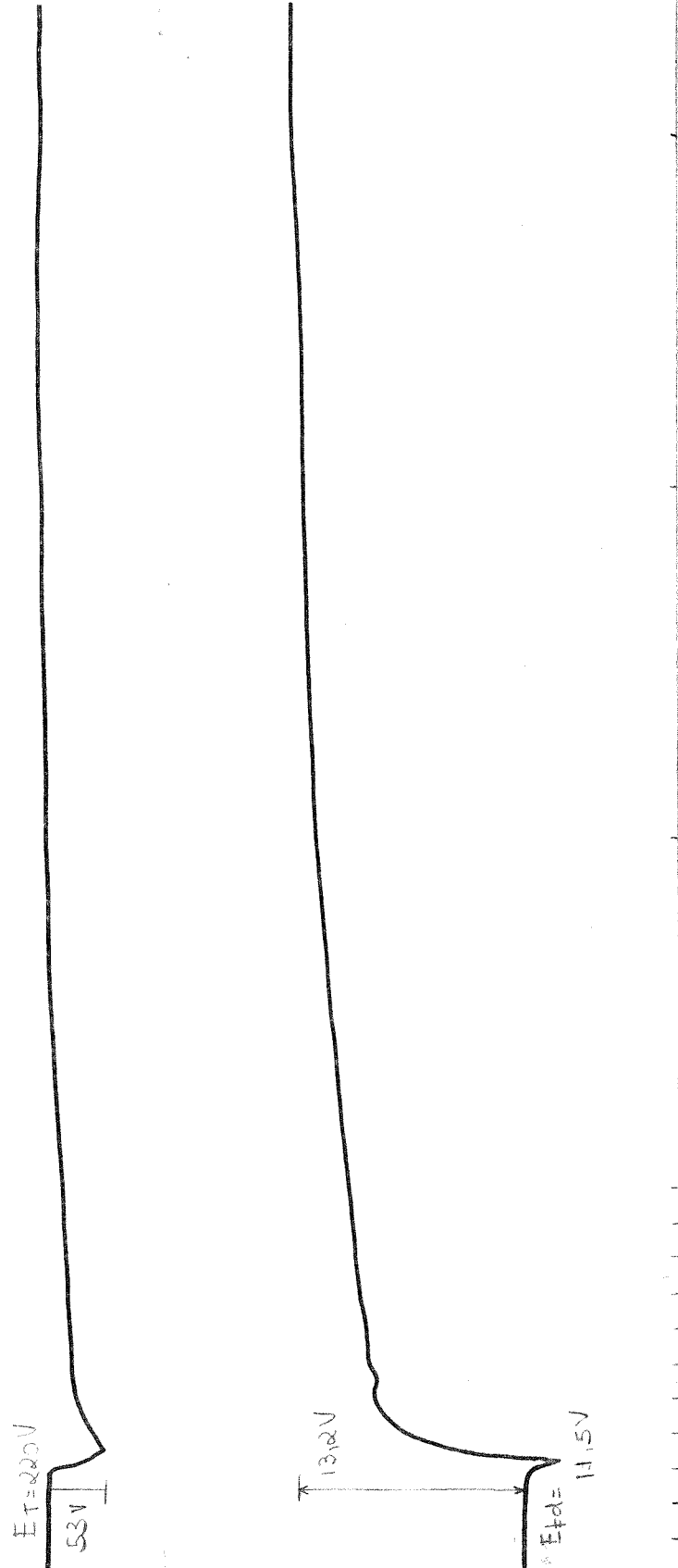


Figura 8.5 - Aplicação de carga indutiva com o ganho de 40 p.u./p.u.

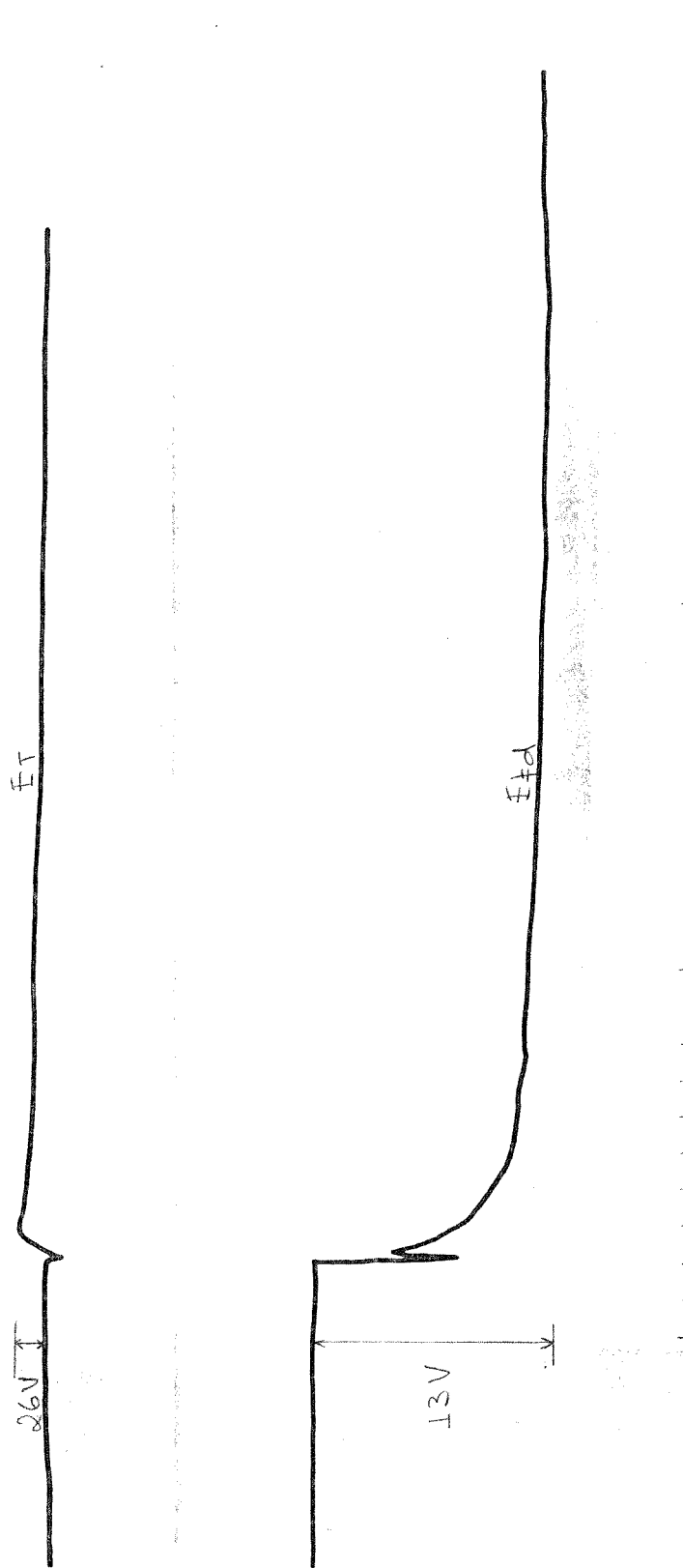


Figura 8.6 - Rejeição de carga indutiva com o ganho de 40 p.u./p.u.

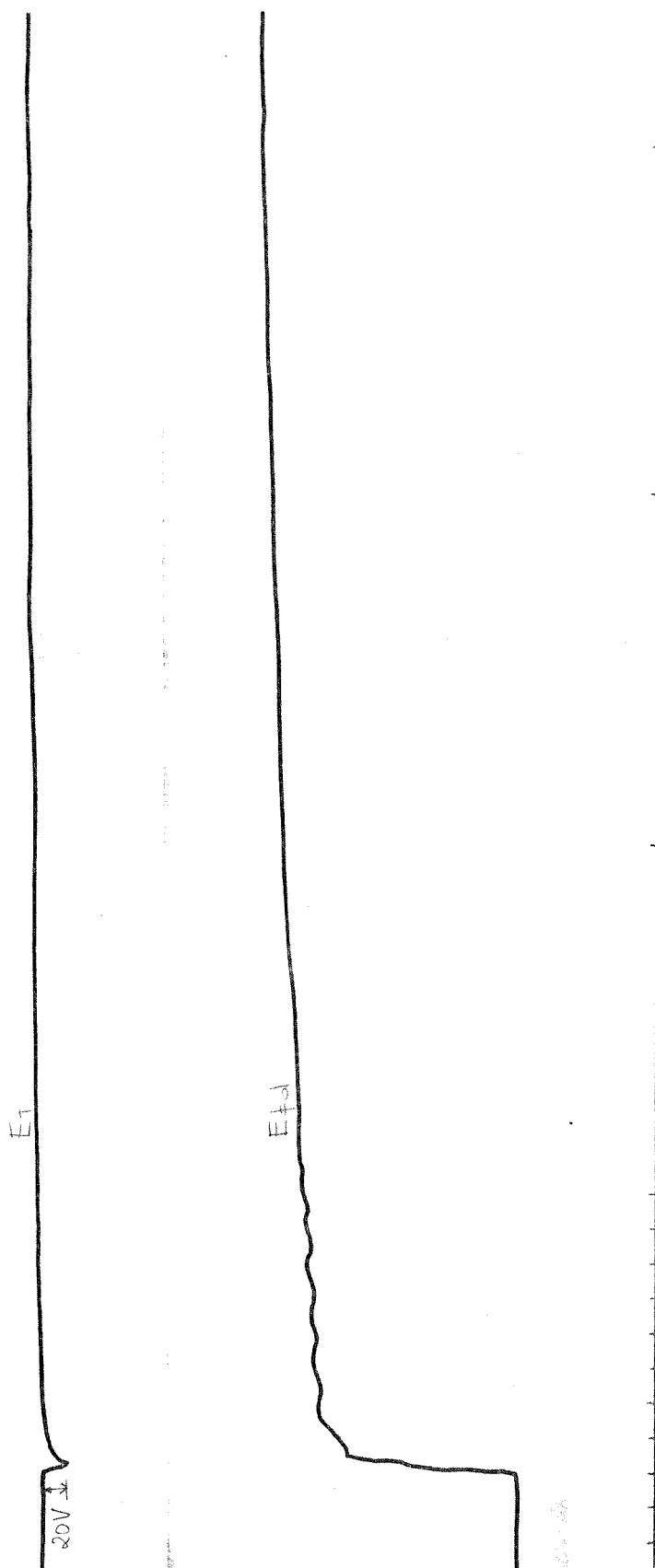


Figura 8.7 - Aplicação de carga indutiva com o ganho de 140 p.u./p.u.



100

### 8.5.3. APLICAÇÃO E REJEIÇÃO DE CARGA CAPACITIVA

Agora o interesse é verificar o comportamento do sistema de excitação na região capacitiva (operação subexcitada). A reatância de carga foi escolhida para que o valor final da corrente de campo fosse aproximadamente zero. A corrente de armadura de regime permanente ficou em 7,2 A (0,55 p.u.).

O registro da Figura 8.9 mostra o resultado para um ganho de 40 p.u./p.u. Após uma queda de tensão inicial (12%) causada pela corrente de armadura, o gerador sofre uma elevação de tensão de 5,3 V (24%) com recuperação lenta (superior a 3 s). Na rejeição, Figura 8.10, a queda é de 30% (66 V) e a recuperação também é lenta.

Com o ganho em 140 p.u./p.u., Figura 8.11 e 8.12, o desempenho foi melhor em relação a variação de tensão e ao tempo de recuperação. Entretanto, ocorreram oscilações na tensão terminal com frequência elevada, por um período de 200 ms. É interessante observar que a tensão de campo neste intervalo se tornou negativa e a ponte pode ter operado com descontinuidade de corrente, causando estas oscilações. Este comportamento pode ser motivo de um estudo específico.

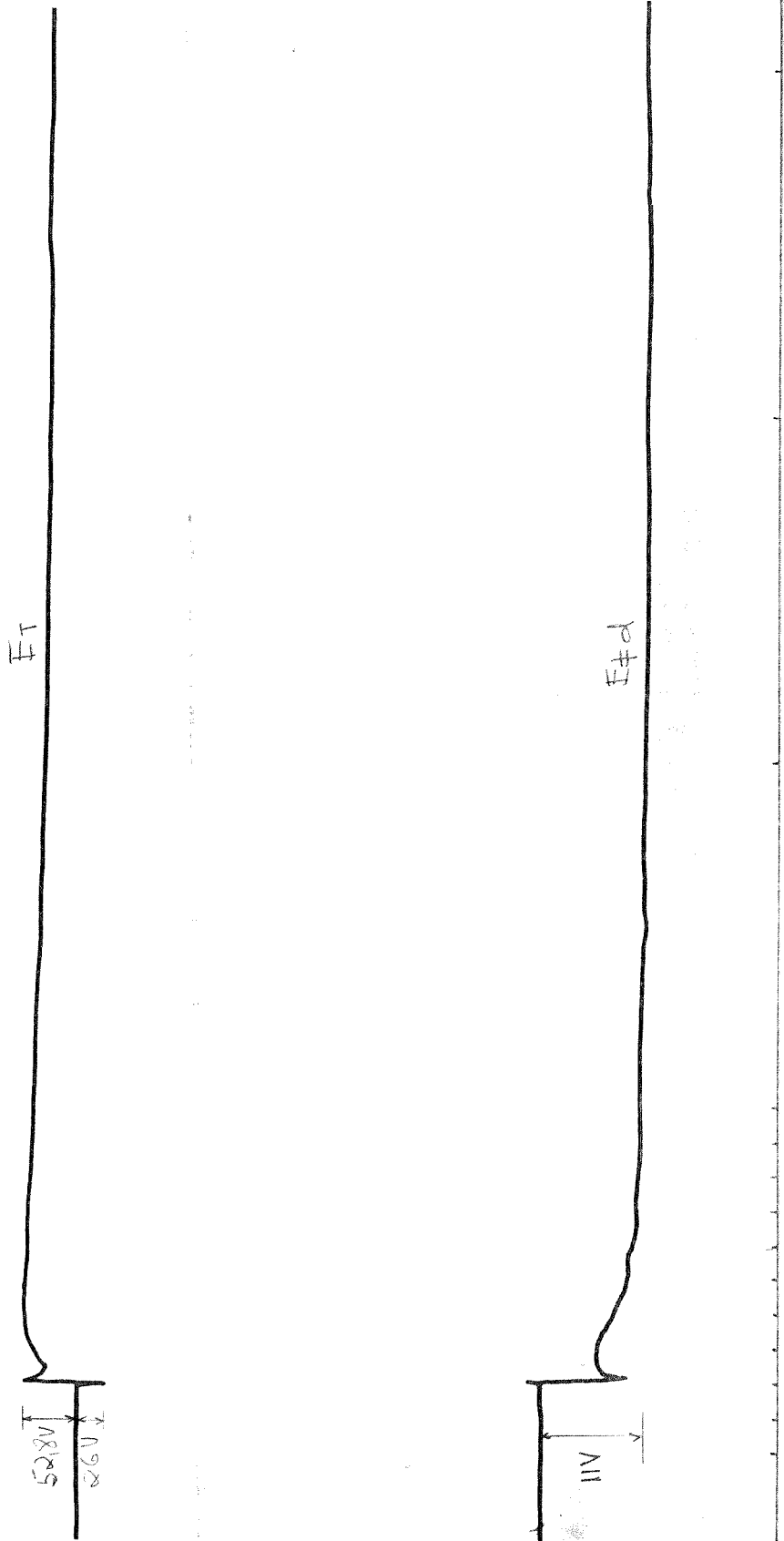


Figura 8.9 - Aplicação de carga capacitiva com o ganho de 40 p.u./p.u.

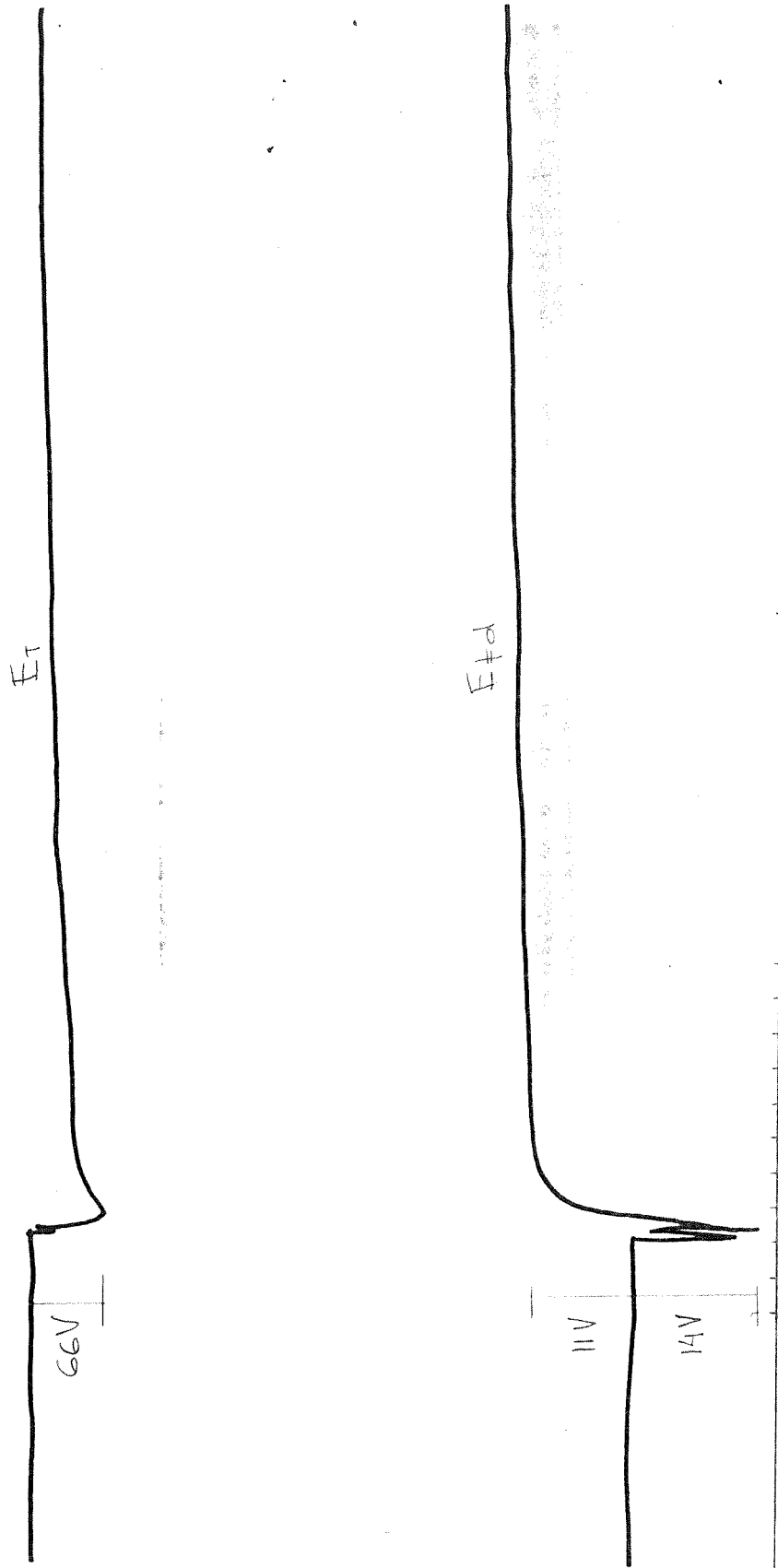


Figura 8.10 - Rejeição de carga capacitiva com o ganho de 40 p.u./p.u.

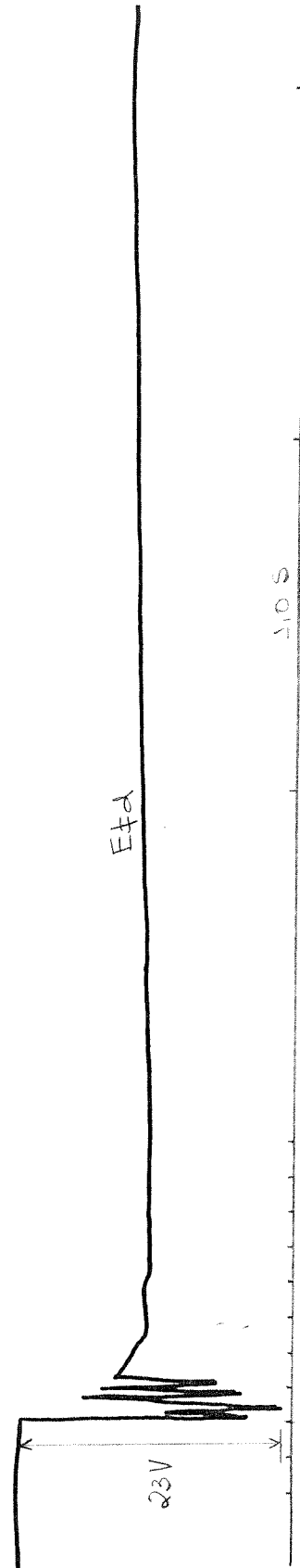


Figura 8.11 - Aplicação de carga capacitiva com o ganho de 140 p.u./p.u.



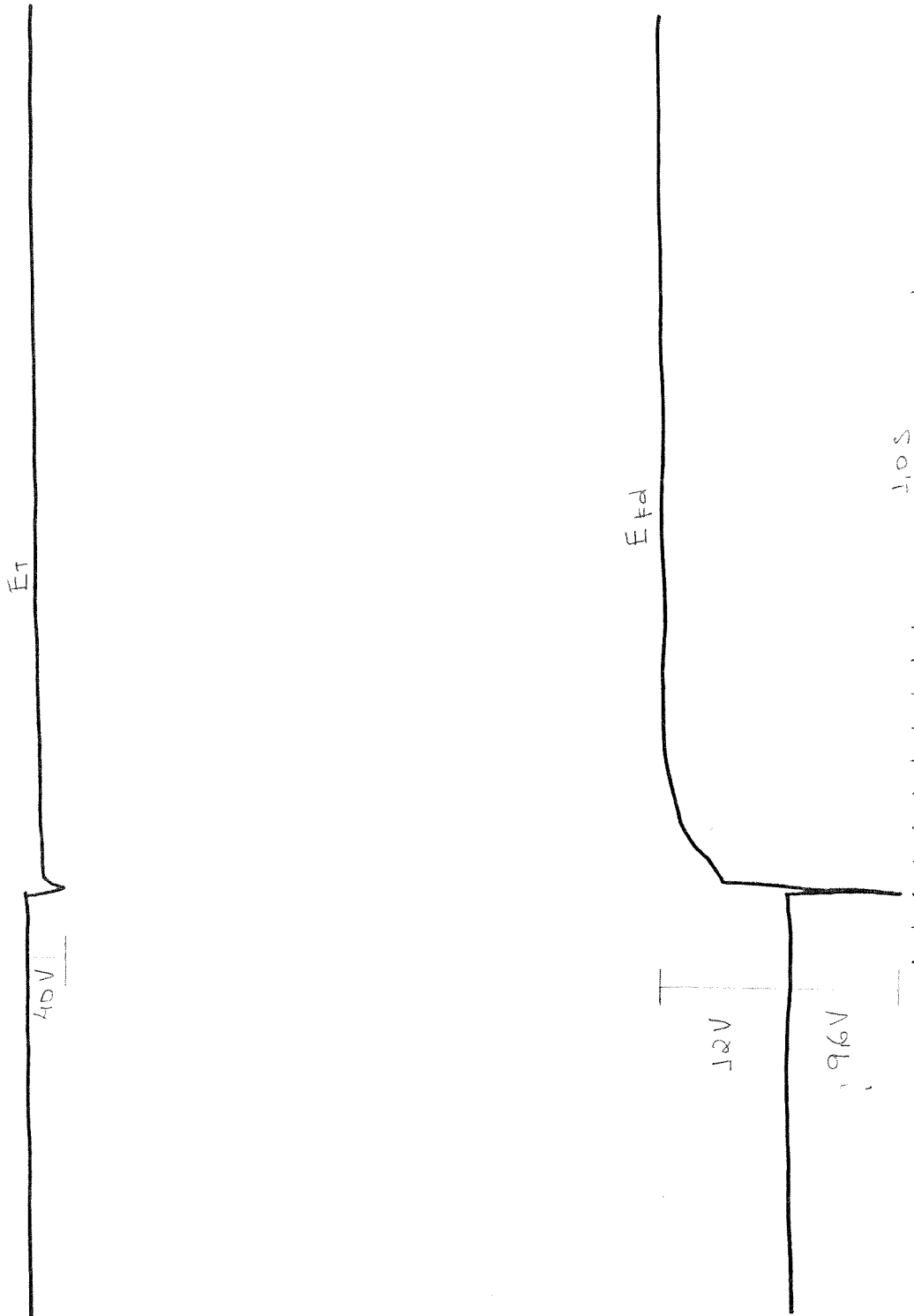


Figura 8.12 - Rejeição de carga capacitiva com o ganho de 140 p.u./p.u.

#### 8.5.4. TESTES DE CURTO-CIRCUITO

Este teste teve como objetivo avaliar aproximadamente o tempo em que uma proteção de curto-circuito para este gerador deve atuar para que seja possível a recuperação de tensão, já que este é o problema crítico do sistema auto-excitado.

A Figura 8.13 mostra dois curto-circuitos consecutivos com a máquina operando inicialmente em vazio. Foi registrado, além das tensões de campo e de estator, a corrente de campo. A duração das faltas foi de 150 ms aproximadamente e observa-se que a tensão é recuperada em 300 ms após a abertura da falta.

No registro da Figura 8.14 o curto foi mantido por 200 ms e não foi possível a recuperação de tensão. Portanto, conclui-se que a proteção deva atuar, ajustada para a corrente de curto, em um tempo inferior. Para efeito de comparação também foi registrado um curto de duração de 150 ms.

Um registro de interesse na Figura 8.13 é o comportamento da corrente de campo que atinge a 5 vezes o seu valor nominal. Esta condição deve ser considerada no dimensionamento do conversor conforme comentado no Capítulo 4.

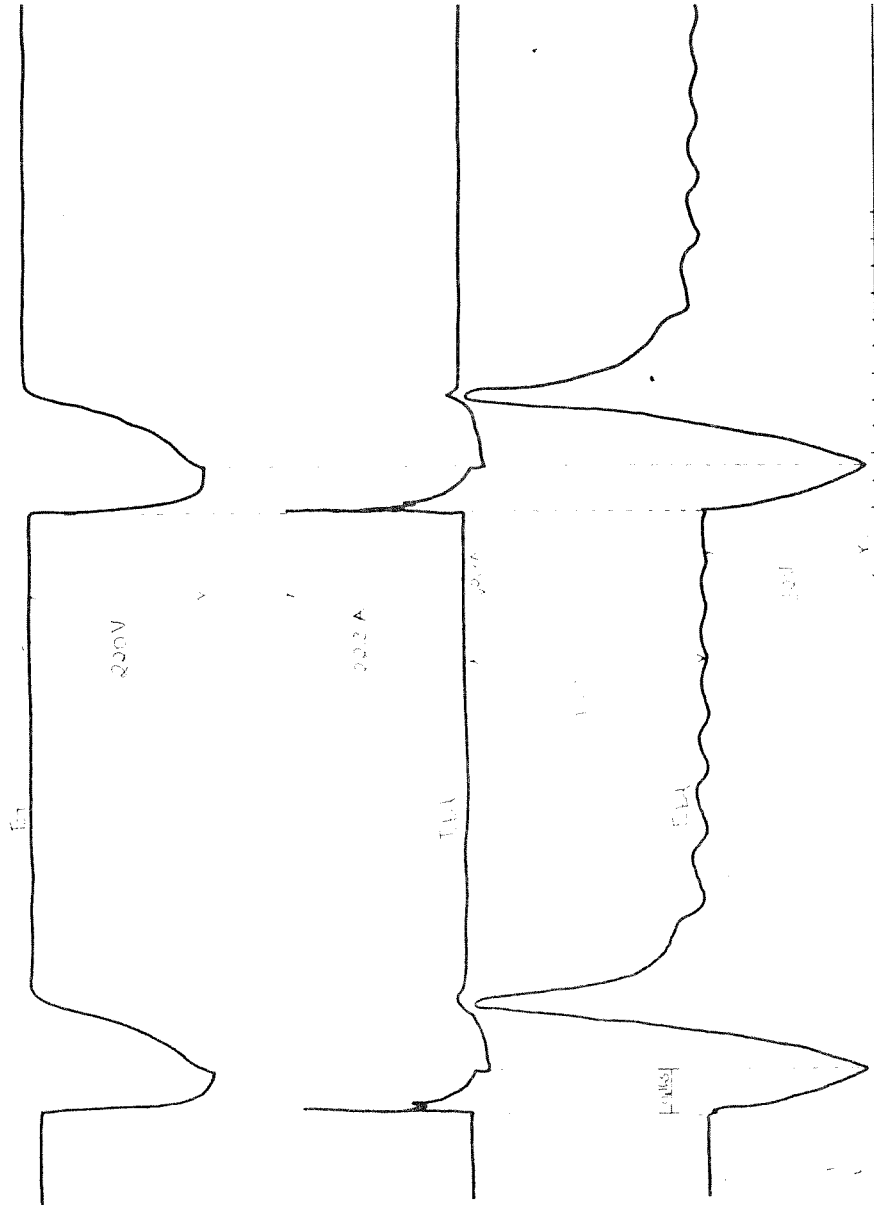


Figura 8.13 - Curto-circuito duplo com duração de  $150\text{ ms}$  cada

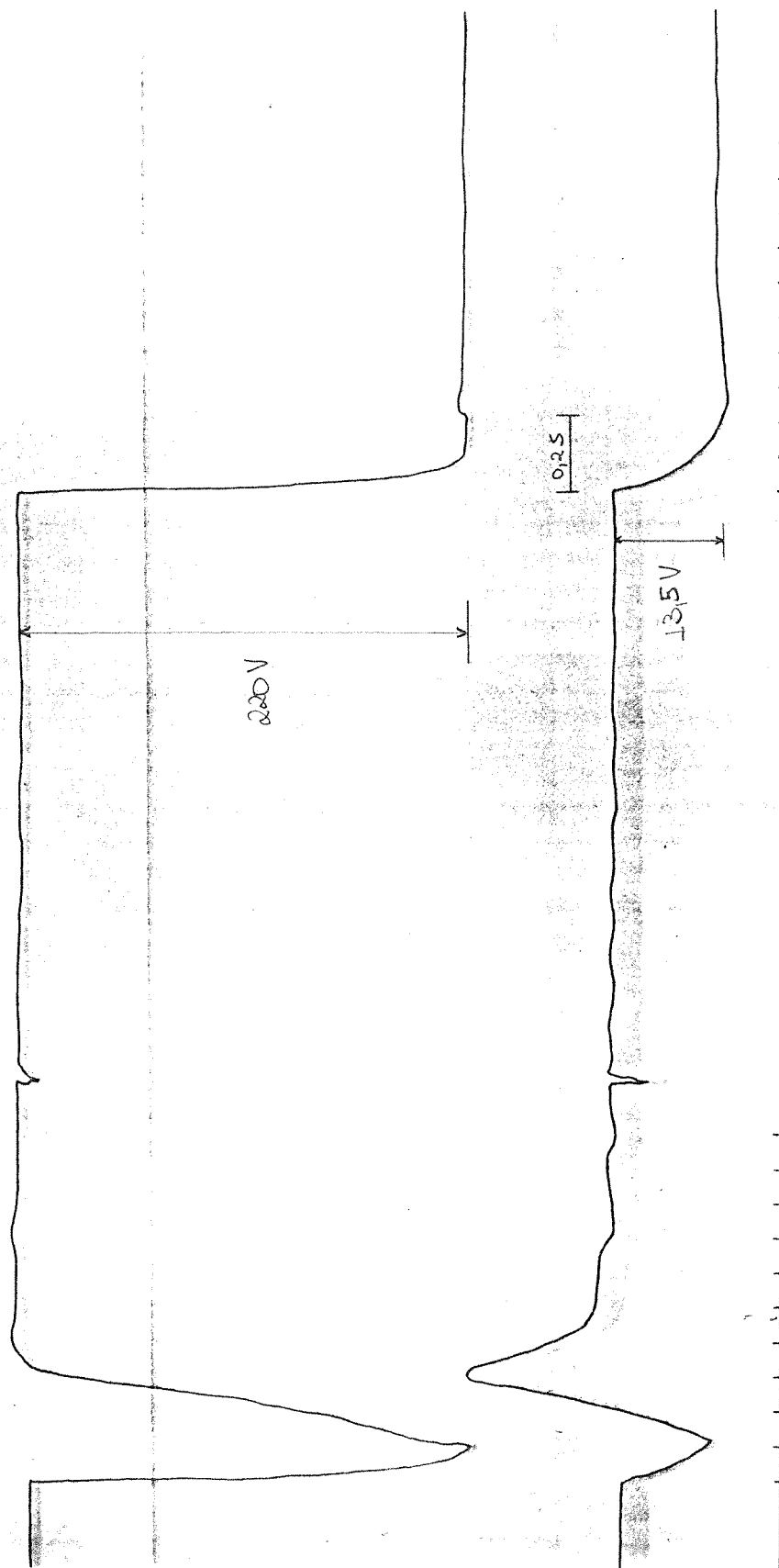


Figura 8.14 - Curto-circuito com duração de 150 e 200 ms

### 8.5.5. TESTES DE ENERGIZAÇÃO INICIAL DO CAMPO E DESENERGIZAÇÃO

A energização inicial do campo foi implementada aproveitando-se o magnetismo residual do gerador, para isto uma ponte de diodos é conectada em paralelo ao retificador controlado e desconectada assim que seja possível a operação do regulador.

A Figura 8.15 mostra esta operação. O controle de retirada da ponte de diodos foi executado manualmente. O que resultou em uma sobretensão de aproximadamente 20%. Com a automação deste processo é possível obter uma resposta sem sobretensão. Isto também pode ser otimizado desconectando-se o integrador para desvios relativamente grandes da tensão terminal em relação ao seu valor nominal.

A desenergização do gerador foi efetuada através do regulador por se tratar de uma máquina de pequeno porte, não se justificando equipamento especial em razão do custo. Deste modo suprimiu-se a excitação pelo bloqueio dos pulsos do gerador. O resultado está no oscilograma da Figura 8.16. Observa-se um decaimento da tensão terminal com constante do tempo aproximadamente igual a  $T'_{d0}$  (Apêndice I).



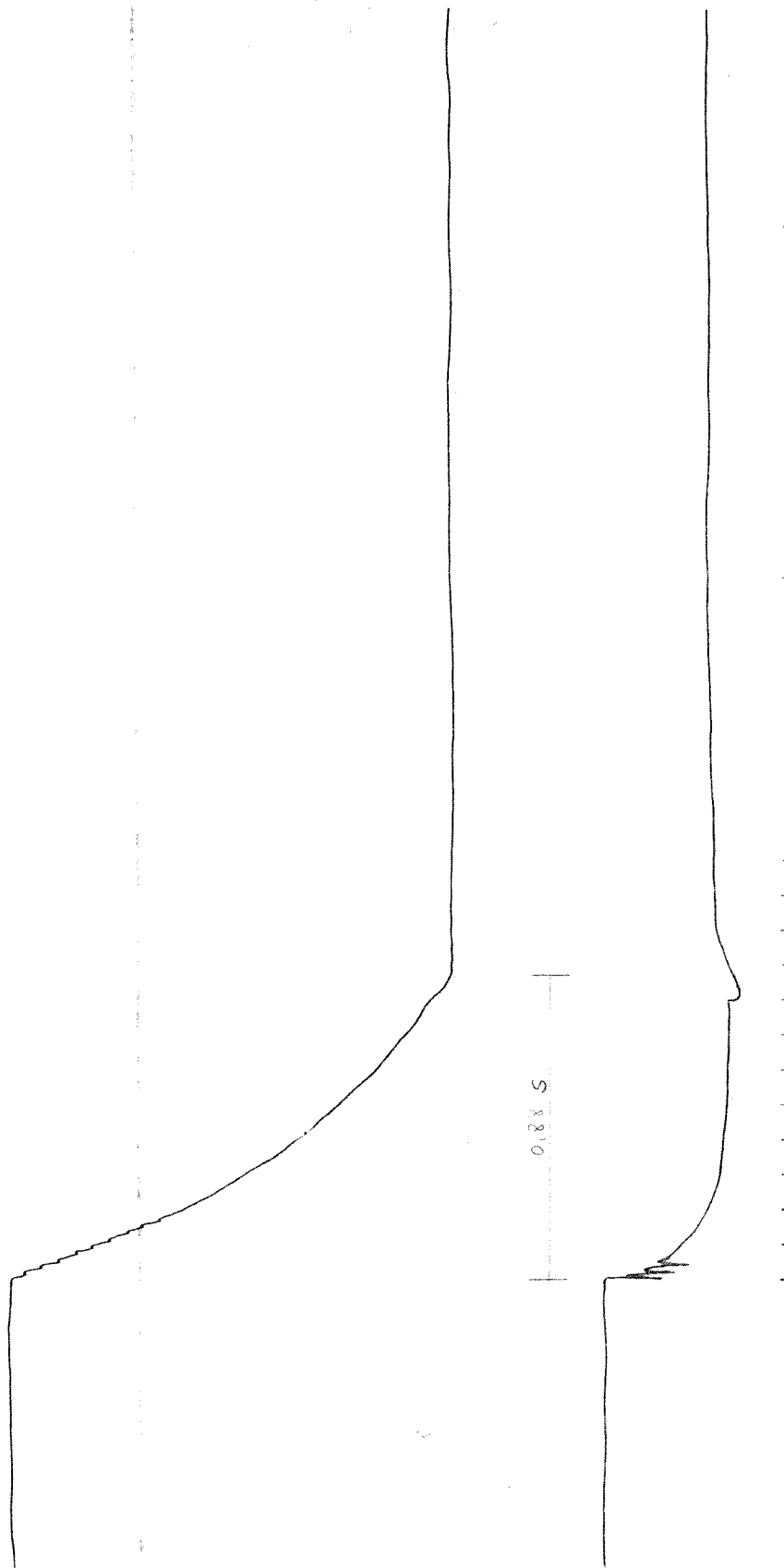


Figura 8.16 - Desenergização de campo pelo bloqueio dos pulsos de disparo da ponte  
conversora