



SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO
E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SP/GSP/07

São Paulo, 10/15 de abril de 1972

ENSAIOS DE CAMPO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 345 kV
JAGUARA-TAQUARIL

Engº Carlos Alberto Ferreira da Cunha
Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A.
Engº Ângelo Vian
Themag

1.0 - INTRODUÇÃO:

A Usina de Jaguara está situada no Rio Grande, na divisa entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais, tendo em sua etapa inicial quatro unidades geradoras de 112 MVA, e contará na sua fase final com mais duas unidades geradoras do mesmo porte. A sua energia deveria ser transportada em 345 kV para o Sistema Central da CEMIG, situada a cerca de quatrocentos quilômetros de distância, tendo sido previsto para essa transmissão o esquema representado pela ilustração 1.0-1. Entretanto, como a Subestação de Pimenta não poderia ser construída de imediato, tornou-se obrigatória a utilização do esquema indicado pela ilustração 1.0-2. Neste esquema, por ocasião de estar fora de serviço a linha Jaguara-Estreito, resultaria a transmissão direta da energia daquela usina ao Sistema Central por uma única linha de transmissão, com 398 km de extensão. É de se notar que, se bem que haviam sido previstos dois reatores de 60 MVAR, 345 kV para a compensação reativa da linha, por motivo de atraso em sua entrega, utilizou-se somente um de 91 MVAR, 440 kV, que operando em 345 kV absorveria 56 MVAR. Este reator foi cedido, por empréstimo, pela CESP.

2.0 - PROBLEMAS TÍPICOS DE TRANSMISSÃO A LONGA DISTÂNCIA:

Os sistemas de transmissão a longa distância, especialmente em sua fase inicial em que a potência total a ser transportada não é grande, apresentam problemas específicos enumerados a seguir:

2.1- Dificuldades Operativas em Funcionamento Normal :

O funcionamento normal do Sistema, especialmente em ocasiões de carga leve, resulta em tensões exa-

geradas e em problemas na absorção de reativos pelas máquinas. Esses problemas podem ser resolvidos com relativa facilidade com o emprégo de reatores em derivação.

- 2.2. Sobretensões Devidas a Surtos de Manobra: Os surtos de manobra, resultantes especialmente do fechamento de disjuntores, trazem certos problemas relativamente difíceis de serem estudados, mas que em geral, para a tensão de 345 kV, não resultam em soluções com custo exagerado.
- 2.3. Sobretensões a Frequência Industrial: As sobretensões a frequência industrial, causadas por energização e principalmente por rejeição de carga, são difíceis de serem analisadas, já que os problemas envolvem parâmetros não lineares como a saturação dos transformadores. Estas sobretensões são os problemas mais graves nas transmissões a longa distância, aos quais se devotam normalmente cuidados especiais.

3.0 - PROTEÇÃO DO SISTEMA CONTRA SOBRETENSÕES A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL:

A fim de proteger o sistema contra sobretensões a frequência industrial foram tomadas as seguintes provisões:

- Prover o sistema com um esquema de proteção contra sobretensões que desligasse a linha todas as vezes que fosse possível fazê-lo antes que as sobretensões atingissem valores intoleráveis.
- Proibir todas as configurações do sistema que resultassem em sobretensões perigosas para o equipamento, mesmo por curto intervalo de tempo.

O esquema de proteção contra sobretensões indicado acima foi executado com três relés de sobretensão com seus contatos ligados em série, de forma que a linha não viesse a ser desligada por um desequilíbrio de tensão causado eventualmente por um curto-círcuito. Este esquema evitaria, também, o desligamento da linha com o aparecimento de uma tensão espúria no secundário de um transformador de potencial por mal funcionamento do mesmo. A fim de se evitar um desligamento indesejável, por ocasião da energização da linha, estes relés só eram inseridos após um certo tempo depois da energização da mesma. Tal proteção foi prevista em ambas as extremidades da linha, sendo que cada um dos conjuntos de relés de cada uma das extremidades faz retaguarda ao outro, através de sinal de telecomunicação (ver Iustração 3.0-1).

Como a temporização desta inserção juntamente com o ajuste dos relés eram bastante críticos foram determinados com muito cuidado, tendo-se previsto uma verificação especial dos mesmos nos ensaios de campo.

A saturação dos transformadores com o aumento da tensão causa o aparecimento de harmônicas de tensão, valores difíceis de serem determinados e que têm uma ação no sentido de diminuir a sensibilidade dos relés de sobretensão. Foram executados ensaios no Laboratório - da CEMIG com a finalidade de se escolherem relés os mais insensíveis a harmônicas de tensão que se pudessem encontrar. Durante os ensaios de campo tomou-se cuidado especial para se verificar o ponto exato de operação dos relés de sobretensão, já que a forma da onda de sobretensão a frequência industrial é bastante distorcida.

4.0 - ESTUDOS DE SOBRETENSÃO EXECUTADOS:

Relativamente aos problemas levantados no item 2.3, foi dedicada atenção particular para se determinarem os

níveis de sobretensão a frequência industrial, quando da energização da linha e da rejeição de carga. Em ambos os casos, energização e rejeição de carga, se a tensão subisse acima de determinados valores, provocaria saturação dos transformadores envolvidos, com as seguintes possíveis consequências:

- Se o grau de saturação imposto aos transformadores for elevado, o que corresponde a uma tensão da ordem de 1,4 p.u. a 1,5 p.u. da tensão nominal, os mesmos poderão se danificar.
- Se o grau de distorção nas tensões for tal que o valor de pico das mesmas for maior que o valor de descarga a frequência industrial dos pára-raios estes serão evidentemente danificados.

Portanto os estudos feitos visaram, no caso da energização da linha, a verificar quais condições de operação deveriam ser julgadas impraticáveis por resultarem em valores elevados na saturação de transformadores ou valores elevados de pico das sobretensões, ou mesmo, ocorrência de ferroressonância.

No que se refere à rejeição de carga, evento que resulta em situações mais graves que a energização, devido a elevada condição de excitação das máquinas e ao aumento da frequência durante o fenômeno, os estudos visaram:

- Avaliar o ajuste dos relés de sobretensão instantâneos de forma que, sem prejudicar com atuações indevidas a operação normal do sistema, permitisse, sómente em caso de rejeição de carga, o desligamento no tempo mais curto possível.
- Excluir condições operativas em que a rejeição de carga resultasse em sobretensões que, em qualquer dos pontos levantados acima, pudesssem danificar o equipamento antes da intervenção dos siste

mas de proteção contra sobretensões.

Os dois meios de análise essenciais a este tipo de estudo são o computador digital e o analisador de transitórios.

O computador digital é utilizado com programas destinados a avaliar a sobretensão a frequência industrial - tendo em conta somente a frequência fundamental, mas simulando as unidades geradoras em todos os seus detalhes, e incluindo os seus sistemas de regulação de tensão e velocidade.

O analisador de transitórios é usado para determinar, com base nos valores da força eletromotriz subtransitoria dos geradores, obtido com o auxílio do computador, as sobretensões a frequência industrial no sistema, levando em conta as distorções da onda devidas a harmônicas de tensão, bem como a eventual ocorrência de ferro ressonância.

No estudo no analisador de transitórios, além do valor de pico das sobretensões a frequência industrial também se determinou o valor eficaz das mesmas. Este último é útil para se definir os ajustes dos relés de sobretensão, bem como para se avaliar o comportamento dos transformadores, do ponto de vista de saturação. Aproveitou-se a mesma montagem do sistema no analisador de transitórios para o estudo das distorções da onda das sobretensões, para se determinarem as sobretensões de manobra, quer na energização, quer na abertura ou no religamento.

O estudo, tanto no caso de sobretensões a frequência industrial como no de sobretensões de manobra, foi conduzido de forma tal que se pudesse extrapolar os resultados obtidos para outras condições de operação, além daquelas realmente estudadas.

5.0 - ENSAIOS EXECUTADOS:

5.1. Objetivo dos Ensaios: O objetivo dos ensaios de

campo foi a verificação do comportamento do sistema, relacionando-o às conclusões obtidas nos estudos executados em computador digital e em analisador de transitórios, e também o exame do desempenho do equipamento de manobra e proteção da linha de transmissão Jaguara-Taquaril. Os ensaios foram executados na ocasião da primeira energização da referida linha.

Com a finalidade descrita acima, foram examinados os seguintes aspectos do funcionamento do sistema:

- Níveis efetivos de sobretensão de manobra e a frequência industrial nas condições reais do sistema.
- Funcionamento dos disjuntores.
- Desempenho dos transformadores de tensão capacitivos.
- Funcionamento da proteção e a sua coordenação com a do Sistema de Furnas, particularmente a da linha Jaguara-Estreito.
- Funcionamento da teleproteção.

5.2. Equipamentos de Programação, Comando e Medição utilizados nos ensaios: Devido aos tipos de ensaios previstos, cujos objetivos são citados no item 5.1, foi necessário recorrer, para uma boa execução dos mesmos, a equipamentos especiais de programação, comando e medição. Na programação e comando de cada manobra, por exemplo, nos testes de energização, deviam ser previstos:

- Comando de fechamento do disjuntor principal em um certo instante programável de modo tal que o fechamento elétrico acontecesse, presumivelmente, em pontos predeterminados dentro de um semi-ciclo da tensão de uma fase assumida como referência.

- Comando de partida dos instrumentos de medição, quer em Jaguara, quer em Taquaril, em instantes determinados tendo-se em vista a manobra do disjuntor principal.
- Comando de abertura do disjuntor principal, após um tempo julgado suficiente para o registro das grandezas elétricas e dos outros sinais, disparos e atuações eventuais de proteção, de interesse no ensaio;
- Comando de parada dos instrumentos de medição em Jaguara e Taquaril.
- Comando de abertura do disjuntor de retaguarda, essencial em caso de defeito e falha eventual na abertura do disjuntor principal.

Na ilustração 5.2-1 é indicado um exemplo de programação para ensaio de energização.

O equipamento de programação e comando foi o reboque oscilográfico da CESP que é provido de chaves programadoras mecânicas complementadas de sincronizadores eletrônicos. Tais chaves programadoras permitem o fechamento de contatos que atuam os comandos de abertura e fechamento do disjuntor e de disparo dos oscilógrafos.

O reboque foi instalado em Jaguara e para os comandos do equipamento em Taquaril foi usado um canal de telecomunicação (ver ilustração 5.2-2). No que se refere à medição foram utilizados os seguintes instrumentos:

Em Jaguara:

- Oscilógrafo "rápido" a raios catódicos "Baron", com 6 traços, instalado no reboque, que permite o registro de frequências até 15 - 20 KHz.

- Oscilógrafo "lento" a raios catódicos "Baron", com 21 traços, instalado no reboque, que permite o registro de frequências até 5 - 10 KHz.

Em Taquaril:

- Oscilógrafo galvanométrico "Galileo" com 12 traços, que permite o registro de frequências até 3 a 8 KHz.
- Dois osciloscópios "Tektroniks" a 2 traços com máquinas fotográficas "Polaroid".

Para o registro das tensões em Jaguara e Taquaril, foram instalados nestes locais, conjuntos de três divisores capacitivos com alta fidelidade de resposta. Esses tinham como finalidade, entre outras, a de avaliar a fidelidade de resposta dos transformadores de potencial (capacitivos).

Em Jaguara foram instalados dois conjuntos de três divisores capacitivos, um a montante do disjuntor principal e um a jusante do mesmo, enquanto que em Taquaril foi instalado um conjunto no terminal da linha.

As características dos divisores capacitivos, assim como do esquema simplificado da sua instalação e ligação aos oscilógrafos, está indicado nas ilustrações 5.2-3 e 5.2-4. Nota-se que a instalação em Jaguara do conjunto de divisores capacitivos à montante do disjuntor, da linha Jaguara-Taquaril, é essencial para se ter o registro da tensão no barramento antes da manobra, como também, para a avaliação da tensão diferencial (e então da tensão de restabelecimento), por ocasião dos ensaios de curto circuito.

Em Taquaril, sendo o oscilógrafo de tipo gal-

vánométrico, foi necessário a utilização de amplificadores a fim de realizar o desacoplamento entre os divisores capacitivos e o oscilógrafo.

5.3. Sobretensões de Manobra: As manobras foram executadas sobre duas condições do sistema:

Configuração 1 - Com a linha Jaguara-Estreito em funcionamento, três máquinas em Jaguara, quatro em Estreito e seis em Furnas.

Configuração 2 - Com a linha Jaguara-Estreito fora de serviço, estando em funcionamento três máquinas em Jaguara.

Os valores mais significativos (em p.u. de $345 \text{ kV} \times \sqrt{3}/\sqrt{3}$) obtidos durante as manobras de energização foram:

Configuração 1 -

Valor mais elevado	Jaguara : 1,2
	Taquaril : 1,65
Valor médio	Jaguara : 1,10
	Taquaril : 1,43
Desvio padrão	Jaguara : 0,048
	Taquaril : 0,135

Configuração 2 -

Valor mais elevado	Jaguara : 1,65
	Taquaril : 2,15
Valor médio	Jaguara : 1,46
	Taquaril : 1,85
Desvio padrão	Jaguara : 0,08
	Taquaril : 0,123

As distribuições probabilísticas correspondentes à estas configurações são mostradas nas ilustrações 5.3-1 e 5.3-2.

Note-se que na configuração 2, nas manobras de energização da linha, poderão ocorrer sobretensões de manobra que causem descarga nos pararaios em Taquaril, se bem que a probabilidade

desta ocorrência seja pequena (probabilidade inferior a 2%).

Nas manobras de desligamento trifásico nunca foram verificadas reamorçagens nem reignições de arco, e as sobretensões encontradas foram pois bastante baixas, da ordem de 1,15 p.u.

5.4. Sobretensões a Frequência Industrial: Foram executados ensaios de energização com diferentes níveis de tensão antes do fechamento do disjuntor, de forma a se visualizar a presença em amplitude das harmônicas de tensão que apareceriam. Estes ensaios servem para se estimar o comportamento das harmônicas de tensão também em ocasião de rejeição de carga. Ensaios de rejeição de carga não foram pois executados, já que causariam distúrbios operativos no Sistema Interligado que não os justificariam.

Estando o sistema na configuração 1, isto é, com a linha Jaguara-Estreito em operação, o valor máximo encontrado nas manobras de energização, sendo a tensão antes do fechamento 345 kV, foi de 1,06 p.u. em Jaguara e 1,22 p.u. em Taquaril (valores em p.u. de 345 kV). Estes valores relativamente baixos se devem à notável ajuda do sistema de Furnas, cuja contribuição em Jaguara, de potência de curto-círcuito por ocasião das manobras, era da ordem de 2500 MVA.

Na configuração 2, isto é, com a linha Jaguara-Estreito fora de serviço, com a tensão antes do fechamento igual a 310kV, o valor máximo de tensão de pico em Jaguara foi de 1,14 p.u., e em Taquaril 1,31 p.u. (valores em p.u. de $345\text{kV}\sqrt{2}/\sqrt{3}$).

Com a tensão antes do fechamento igual a 345kV a tensão de pico em Jaguara atingiu 1,26 p.u., e em Taquaril 1,43 p.u., em ambas o conteúdo de harmônicas de tensão, onde prevalece a 7ª harmônica

foi da ordem de 10% a 15%, (ver ilustração 5.4-1 e 5.4-2).

Nestes ensaios pôde-se verificar claramente o funcionamento do regulador de tensão.

5.5. Funcionamento do Disjuntor: Foi constatado que o funcionamento do disjuntor utilizado na linha foi satisfatório, já que seus parâmetros apresentaram valores, obtidos nos ensaios, congruentes com aqueles garantidos pelo fabricante. Estes parâmetros satisfazem plenamente os requisitos necessários para o sistema em questão.

5.6. Funcionamento do Transformador de Potencial: Em todos os ensaios realizados, os transformadores de potencial (capacitivos) da linha Jaguara-Taquaril apresentaram respostas adequadas, devendo-se salientar que, no primeiro ciclo após o fechamento do disjuntor, a onda no secundário do TP aparece com uma distorção causada por harmônicas de frequência entre 1000 e 2000 Hz de pequena amplitude, e após este período, o TP oferece a mesma precisão de medida que os divisores capacitivos de precisão utilizados nos ensaios.

5.7. Funcionamento da Proteção de Curto-círcuito: Foram executados dois ensaios de curto-círcuito na linha Jaguara-Taquaril, estando a mesma, na ocasião, aberta na subestação de Taquaril. O primeiro foi executado na configuração 1 do sistema, estando a linha Jaguara-Estreito fora de serviço, e a segunda na outra condição. Esta última serviu para verificar a coordenação com a proteção da linha Jaguara-Estreito. Nos dois casos a proteção de distância para terra operou, isolando o defeito em cerca de 60 ms.

5.8. Proteção contra Sobretensões: Os ensaios da proteção de sobretensões foram executados depois de

se reduzir o tempo de inserção dos relés de sobretensão para 0,2s, energizando-se sucessivamente a linha com tensão cada vez mais elevadas. Se bem que os relés da extremidade de Taquaril operaram a contento, os de Jaguara, no grupo inicial de ensaios, não funcionaram. Atribuiu-se isto à utilização de uma resistência inadequada conectada à bobina de corrente alterna. Os ensaios foram repetidos com sucesso uma semana mais tarde, após a substituição da resistência citada.

5.9. Funcionamento da Teleproteção: O equipamento de onda portadora da teleproteção só operava estando a linha desenergizada, o que evidentemente só foi percebido durante os ensaios.

Atribuiu-se isto à dificuldade de se sintonizar em ressonância série, com alto fator de qualidade, uma caixa de sintonia com elementos adequados para operação em faixa larga (baixo fator de qualidade). O nível de recepção era de 2dB_{BSR} o que não proporcionava uma relação sinal ruído adequada para um nível de ruído de -30dB_{BSR}. Isto foi posteriormente corrigido obtendo-se um sinal de -13dB_{BSR}. A relação sinal ruído de ... 43dB obtido é superior ao aceitável, que é de 20dB de relação sinal ruído e mais 10dB de reserva.

6.0 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ESTUDOS E DOS ENSAIOS DE CAMPO:

A presente análise comparativa tem por finalidade verificar a validade dos estudos realizados em relação ao comportamento real do sistema obtido nos ensaios de campo.

A comparação será feita relativamente a:

- Sobretensões de manobra, focalizando também o

comportamento do disjuntor.

- Sobretensões a frequência industrial, destacando além disso o funcionamento dos reguladores de tensão dos geradores.

6.1. Sobretensões de Manobra: A comparação dos resultados obtidos nos estudos, com aqueles obtidos nos ensaios de campo, será feita pelo confronto das distribuições probabilísticas das sobretensões.

Na configuração 2, isto é, com a linha Jaguara-Estreito fora de serviço, este confronto mostrou uma diferença no valor médio da sobretensão de manobra de 3,4% em Jaguara, e de 3,8% em Taquaril.

Como no estudo efetuado no analisador de transitorios não se avaliou a distribuição probabilística das sobretensões de manobra sem o reator de Taquaril, foi necessário se extrapolar à essa condição os resultados obtidos quando o mesmo estava presente.

Utilizou-se um fator K de extração, que leva em conta não só a relação entre os componentes próprios dos surtos das sobretensões de manobra nas duas condições, mas também, os valores das sobretensões a frequência industrial no primeiro instante da energização.

Com base neste critério, foram avaliadas as distribuições probabilísticas que são indicadas ilustrações 6.1-1 e 6.1-2, juntamente com os valores encontrados nos ensaios de campo. Os valores característicos destes gráficos são indicados abaixo:

Analisador de Transi- tórios (Extrapolado)	Ensaios de Campo	Diferença
---	------------------------	-----------

Sobretensões em Jaguara:

Valor médio	1,51 p.u.	1,46 p.u.	3,4%
Desvio padrão	0,048	0,080	-

Sobretensões em Taquaril:

Valor médio	1,92 p.u.	1,85 p.u.	3,8%
Desvio padrão	0,080	0,123	-

(Valores em p.u. referidos a $345 \text{ kV} \times \sqrt[3]{2}/\sqrt[3]{3}$)

No que se refere ao desempenho do disjuntor com relação as sobretensões de manobra, é de interesse comparar os tempos de preinserção dos resistores supostos nos estudos no analisador de transitórios e aqueles registrados durante os ensaios de campo. Obteve-se desta comparação uma diferença de 0,8% entre os valores médios dos tempos de preinserção dos resistores, tendo sido o desvio padrão dos ensaios de campo $\sigma = 0,343 \text{ ms}$, valor mais baixo que o do Analisador de Transitórios, $\sigma = 0,67 \text{ ms}$. As duas distribuições são indicadas na ilustração 6.1-3. Sabe-se que tais tempos variam devido à dispersão, entre as três fases, nos fechamentos do contato secundário, que insere o resistor, e o do contato principal do disjuntor, que o fecha definitivamente.

Baseando-se nas informações do fabricante, supõe-se no analisador de transitórios um tempo médio de preinserção dos resistores de $\pm 7,5 \text{ ms}$ com dispersão $\pm 1 \text{ ms}$, com a curva de distribuição cortada a 2σ no fechamento do contato secundário e $\pm 1,5 \text{ ms}$, cortada a 2σ para o fechamento do contato principal.

Os tempos de preinserção dos resistores mostra-

ram-se distribuídos, para os estudos no analisador de transitórios e nos ensaios de campo, como segue:

	Analizador de Transitórios	Ensaio de Campo
Valor médio	7,572 ms	7,634 ms
Desvio padrão	0,67 ms	0,343 ms
Valor máximo	9,2 ms	8,700 ms
Valor mínimo	6,16 ms	7,100 ms

Evidencia-se, neste gráfico, que a distribuição relativa aos ensaios de campo é praticamente cortada a $\pm 2\sigma$ e mais recolhida em torno do valor médio que a encontrada nos estudos em analisador de transitórios.

Isto, de um lado, evidencia o efeito do "pre-arco" no fechamento dos contatos secundários, não considerado no analisador de transitórios, e por outro lado confirma o comportamento bastante homogêneo do disjuntor.

6.2. Sobretenções a Frequência Industrial: A presença de elementos saturáveis no sistema, aliada ao fato que durante os ensaios de energização a tensão pode subir acima da parte linear das características de saturação dos mesmos, impõe dois tipos de análise comparativa, dependendo do fato que tais elementos estivessem ou não em saturação.

O andamento (comportamento em relação ao tempo) das tensões por ocasião de uma manobra de energização tem a forma indicada na ilustração 6.2-1.

No exame dos resultados obtidos nos ensaios encontraram-se distorções devido as harmônicas de tensão até 0,4 a 0,6s após as energizações com 0,9 p.u. de tensão e até 0,6 a 0,8s após as energizações com 1,0 p.u. de tensão (p.u. de..

345 kV). Em tal período de distorção os ensaios de campo evidenciaram o prevalecimento da 7ª harmônica de tensão. Esta 7ª harmônica apresenta-se praticamente em fase com o fundamental em Jaguara e praticamente em oposição de fase em Taquaril. Isto traz como consequência que em Jaguara o valor de pico da tensão é reduzido devido a presença da harmônica de tensão, enquanto que em Taquaril o valor de pico é aumentado.

As ilustrações 5.4-1 e 5.4-2 explicam como a 7ª harmônica em fase com o fundamental diminui o valor de pico, enquanto que, em oposição de fase, o aumenta.

Nos resultados obtidos no analisador de transitórios a presença com prevalecimento da 7ª harmônica é também bem evidente, mas na maioria dos casos, quer em Jaguara, quer em Taquaril ela está em oposição de fase com o fundamental (ver ilustrações 6.2-2, 6.2-3 e 6.2-4). Essa diferença na defasagem das harmônicas resulta numa diferença entre os valores de pico obtidos nos estudos e nos ensaios de campo, maior em Jaguara que em Taquaril :

Em Jaguara:

- Nos ensaios de campo - $V_{pico} = 1,26$ p.u.
- Nos estudos no analisador de transitórios- $V_{pico} = 1,34$ p.u.
diferença percentual: 6%

Em Taquaril:

- Nos ensaios de campo - $V_{pico} = 1,43$ p.u.
- Nos estudos no analisador de transitórios- $V_{pico} = 1,46$ p.u.
diferença percentual: 2%

Essas diferenças, em si já verdadeiramente muito pequenas face à complexidade do fenômeno da

distorção, justificam-se devido a inevitáveis aproximações na simulação do sistema no analisador de transitórios e em particular dos elementos não lineares.

Após o período em que se apresentam as distorções, os resultados obtidos nos estudos e a quêles obtidos nos ensaios são praticamente coincidentes, sendo a diferença encontrada menor que 2%. Isso vem confirmar a simulação correta do sistema nos estudos quando fora da condição de saturação, e em particular a representação, bastante exata, do regulador de tensão. Outro fato que confirma a simulação correta do regulador de tensão é se encontrar o valor máximo das sobretensões a frequência industrial, quer nos estudos como nos ensaios, no mesmo instante, isto é, cerca de 0,2s após o fechamento do disjuntor. As envoltórias dos valores das sobretensões a frequência industrial obtidas nos ensaios e nos estudos estão representadas nas ilustrações 6.2-5 e 6.2-6.

Não se traçaram as envoltórias no intervalo entre 0 e 0,05 segundos por que nesse período as sobretensões ainda estão afetadas pelos componentes de surto.

6.3. Conclusões da comparação entre os resultados dos ensaios de campo e estudos: Conforme os resultados da análise descrita no parágrafo 6.1- "Sobretensões de Manobra", conclui-se que a simulação, nos estudos, do modelo do sistema, bem como do disjuntor da linha Jaguara-Taquaril foram feitas de forma correta, visto que os valores médios das sobretensões de manobra encontrados, quer em Jaguara, quer em Taquaril, apresentaram-se, nos ensaios, praticamente coincidentes com os valores obtidos nos es-

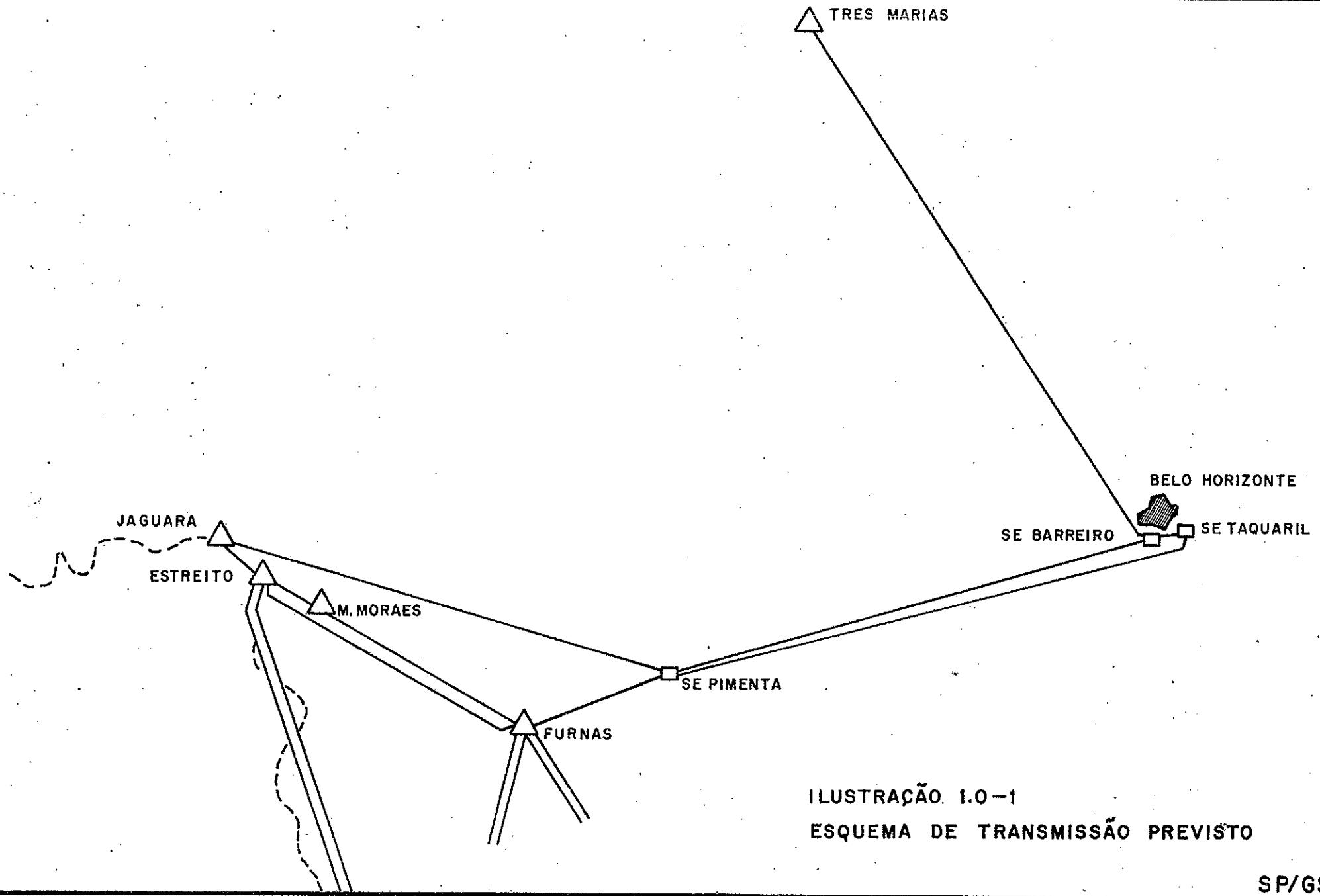
tudos (3 a 3,8 % de diferença). Ressalta-se aí o comportamento do disjuntor da linha Jaguará-Taquaril, cujas principais características (fornecidas pelo fabricante) mostraram-se congruentes com aquelas obtidas nos ensaios de campo, fator este que, certamente, muito contribuiu para que os resultados dos estudos e ensaios fossem tão próximos.

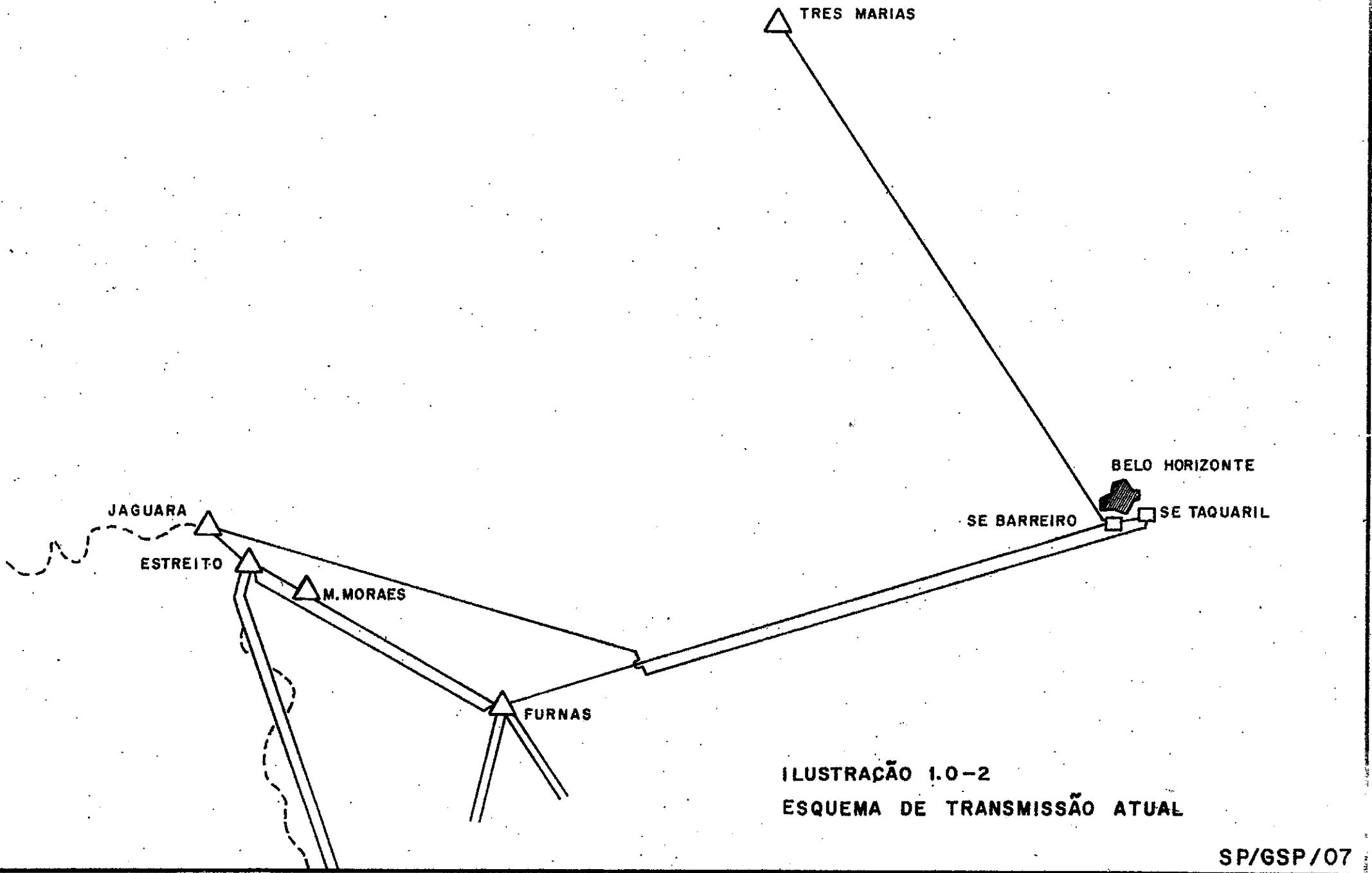
Na análise feita no parágrafo 6.2- "Sobretenções a Frequência Industrial", evidenciou-se que os resultados dos estudos de sobretensão a frequência industrial, inclusive em casos de rejeição de carga (embora estes não tenham sido comprovados diretamente por ensaios de campo) devem ser considerados válidos.

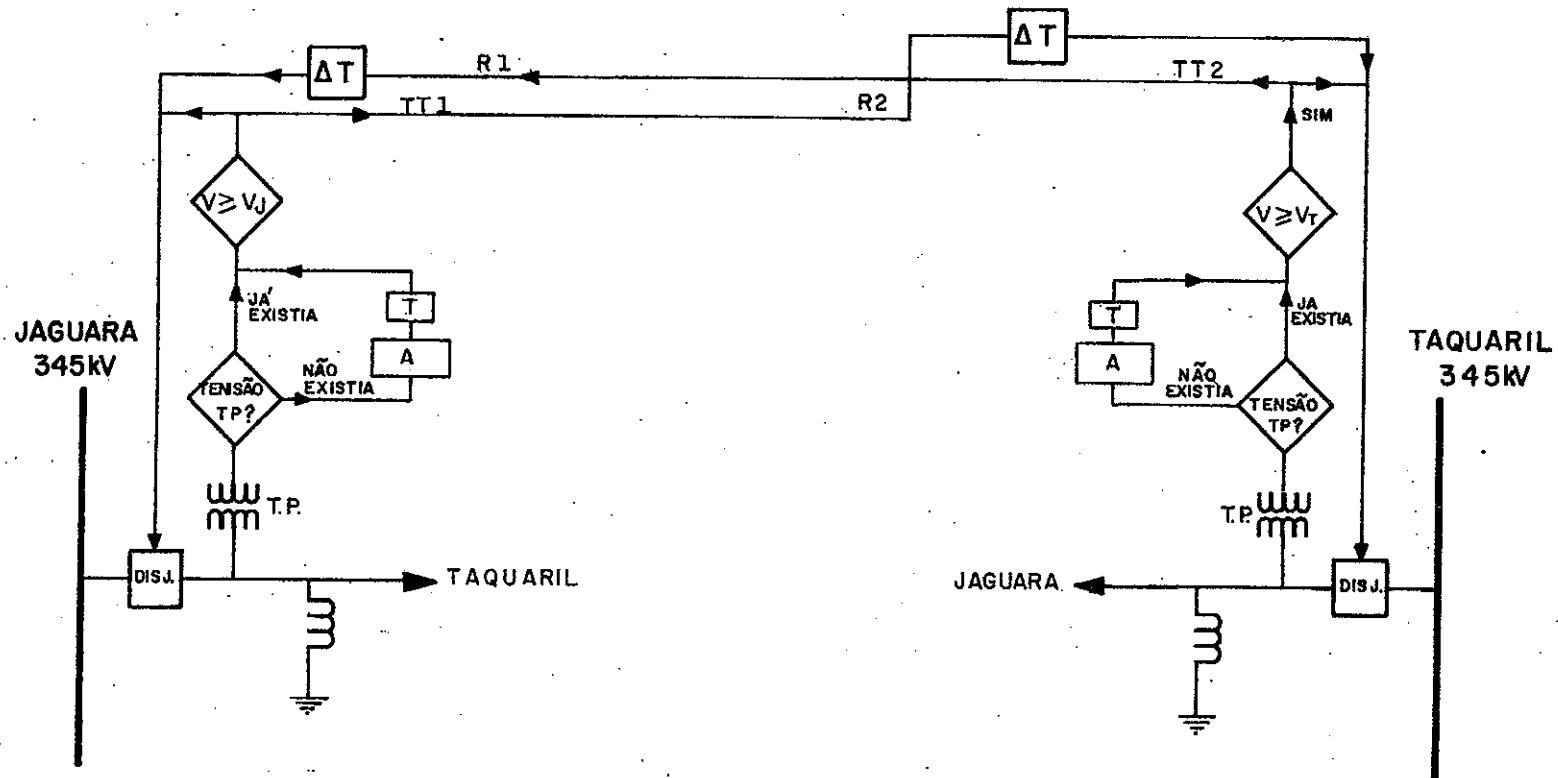
É importante notar, que os ajustes dos relés de sobretensão foram determinados a partir dos estudos de sobretensão por rejeição de carga, razão pela qual se examinou, cuidadosamente, os valores obtidos para a energização da linha, fenômeno este de certa forma similar à rejeição.

* BIBLIOGRAFIA *

1. THEMAG - Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A. - CEMIG
- Sistema de Transmissão 345 kV - "Plano F" - Estudo das Sobretensões.
2. THEMAG - Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A. - CEMIG
- Testes de Campo no Sistema de Transmissão 345 kV - "Plano F".
3. H.C.F.Mello - L. Terry - Sobretensões de Manobra em Sistemas de Alta Tensão - Análise Comparativa de Ensaios de Campo com Resultados Obtidos em Computadores Analógicos e Digitais - Junho 1969.
4. H.C.F.Mello - Sobretensões de Manobra no Sistema da CHESF - Setembro 1969.







VJ: valor de ajuste dos relés de Jaguara

VT: valor de ajuste dos relés de Taquaril

A : atraso na inserção dos relés no sistema de T seg, após aparecimento de tensão no T.P.

T : valor do tempo de atraso na inserção

AT: temporização na proteção de retaguarda via sinal de transferência

ILUSTRAÇÃO 3.0-I: ESQUEMA DA LÓGICA DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES

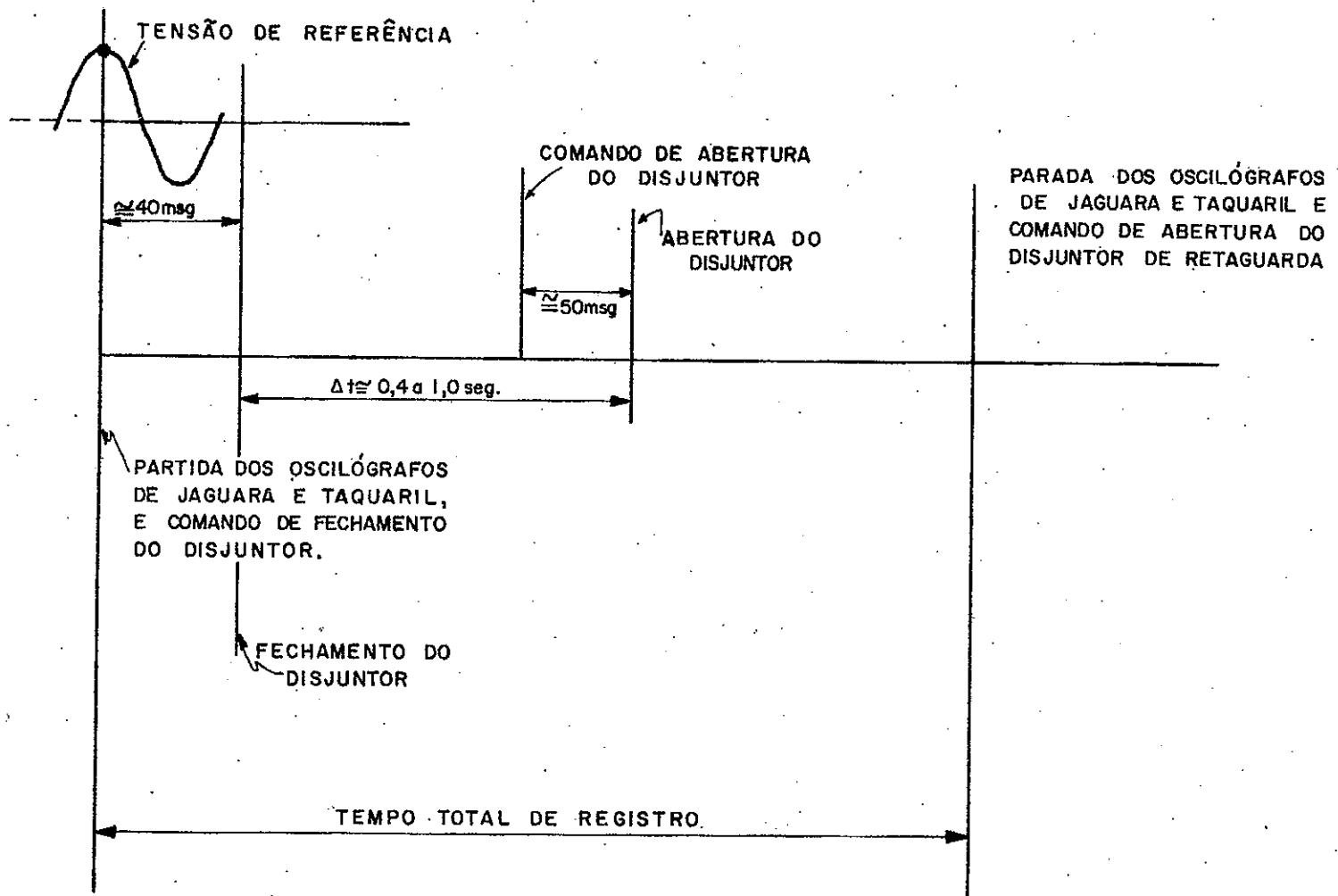


ILUSTRAÇÃO 5.2-1: ESQUEMA DE UM POSICIONAMENTO DOS
CONTACTOS DA CHAVE PROGRAMADORA

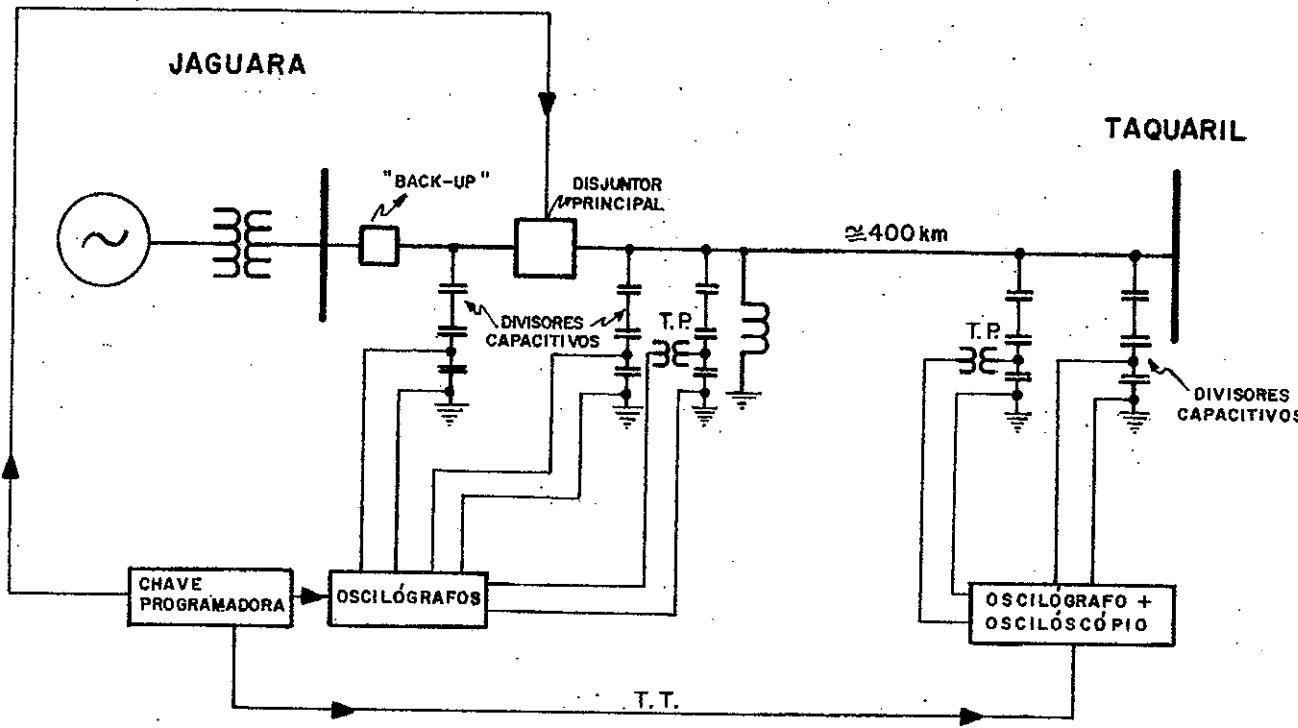
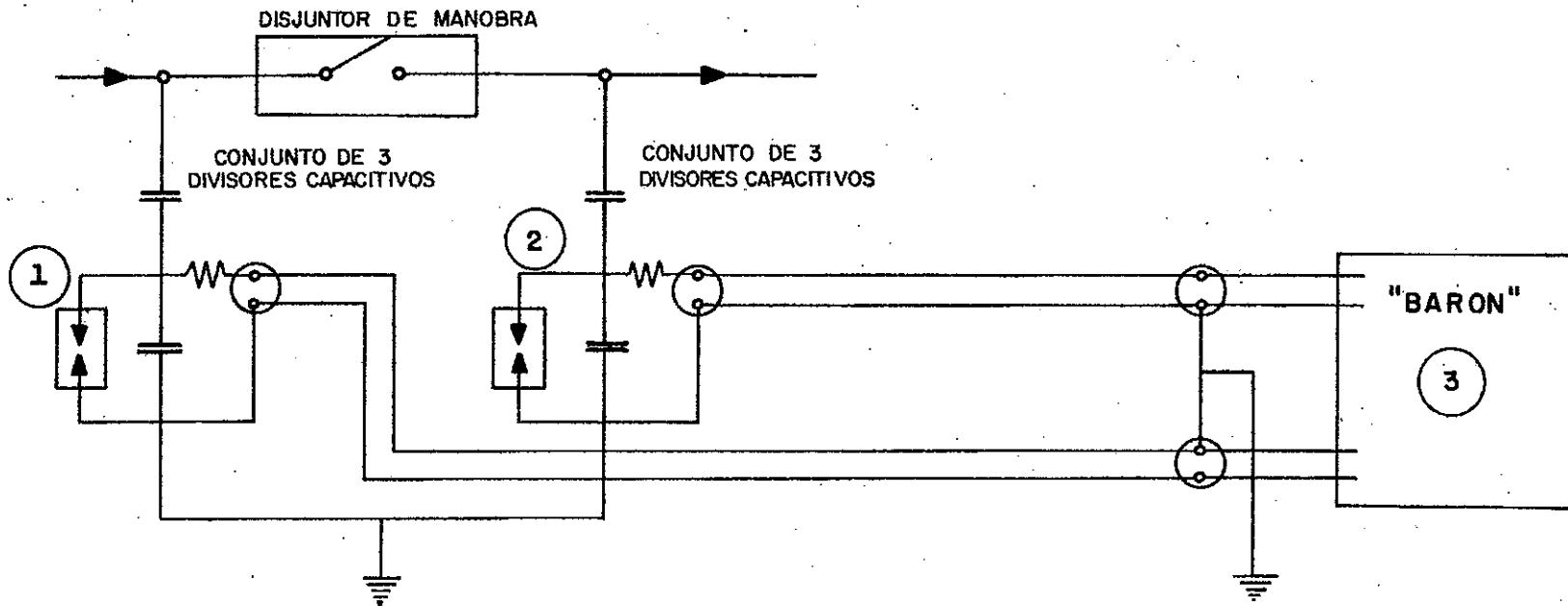


ILUSTRAÇÃO 5.2 - 2 : ESQUEMA GERAL DA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO
DE PROGRAMAÇÃO, COMANDO E MEDIDAÇÕES.

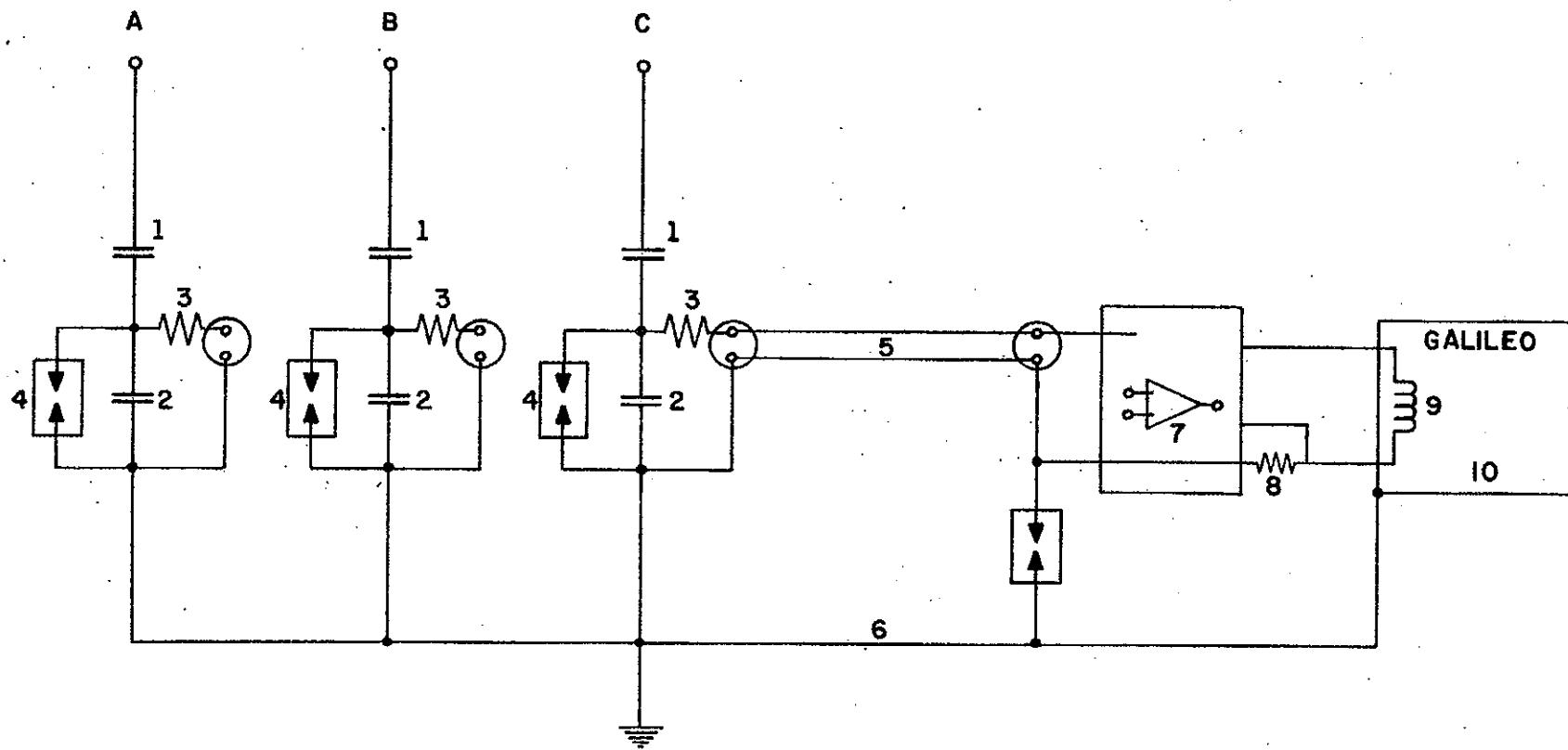


- 1: Conjunto de 3 divisores capacitivos instalados nas fases A,B e C, à montante do disjuntor de manobra
- 2: Conjunto de 3 divisores capacitivos instalados nas fases A,B e C, à jusante do disjuntor de manobra
- 3: 2 oscilógrafos "BARON" Rápido & Lento

OBS.: a parte da alta tensão do divisor capacitivo tem capacidade = 71,5 pF
e a parte da baixa c = 0,368uF.

ILUSTRAÇÃO 5.2-3: ESQUEMA DA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO EM JAGUARA

345KV Fases



- 1: parte A.T. do divisor capacitivo $C = 71,5 \text{ pF}$
- 2: parte B.T. do divisor capacitivo $C = 1 \mu\text{F}$
- 3: resistência de adaptação do cabo coaxial $P = 120 \Omega$
- 4: pará-raios de proteção: $350\text{V} - 20\text{A} \sim 10\text{kA}$
- 5: cabo coaxial blindado $Z_c \approx 120 \Omega$
- 6: cabo terra
- 7: amplificador de desacoplamento divisor capacitivo/oscilógrafo
- 8: resistência em série $P = 100 \Omega$
- 9: equipamento oscilográfico do GALILEO (frequência de ressonância = 5KHZ)
- 10: oscilógrafo GALILEO

ILUSTRAÇÃO 5.2-4: ESQUEMA DA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO EM TAQUARIL

ILUSTRAÇÃO 5.3-1: DISTRIBUIÇÃO PROBABILÍSTICA DAS SOBRETENSÕES EM JAGUARA E TAQUARIL NA CONFIGURAÇÃO 1

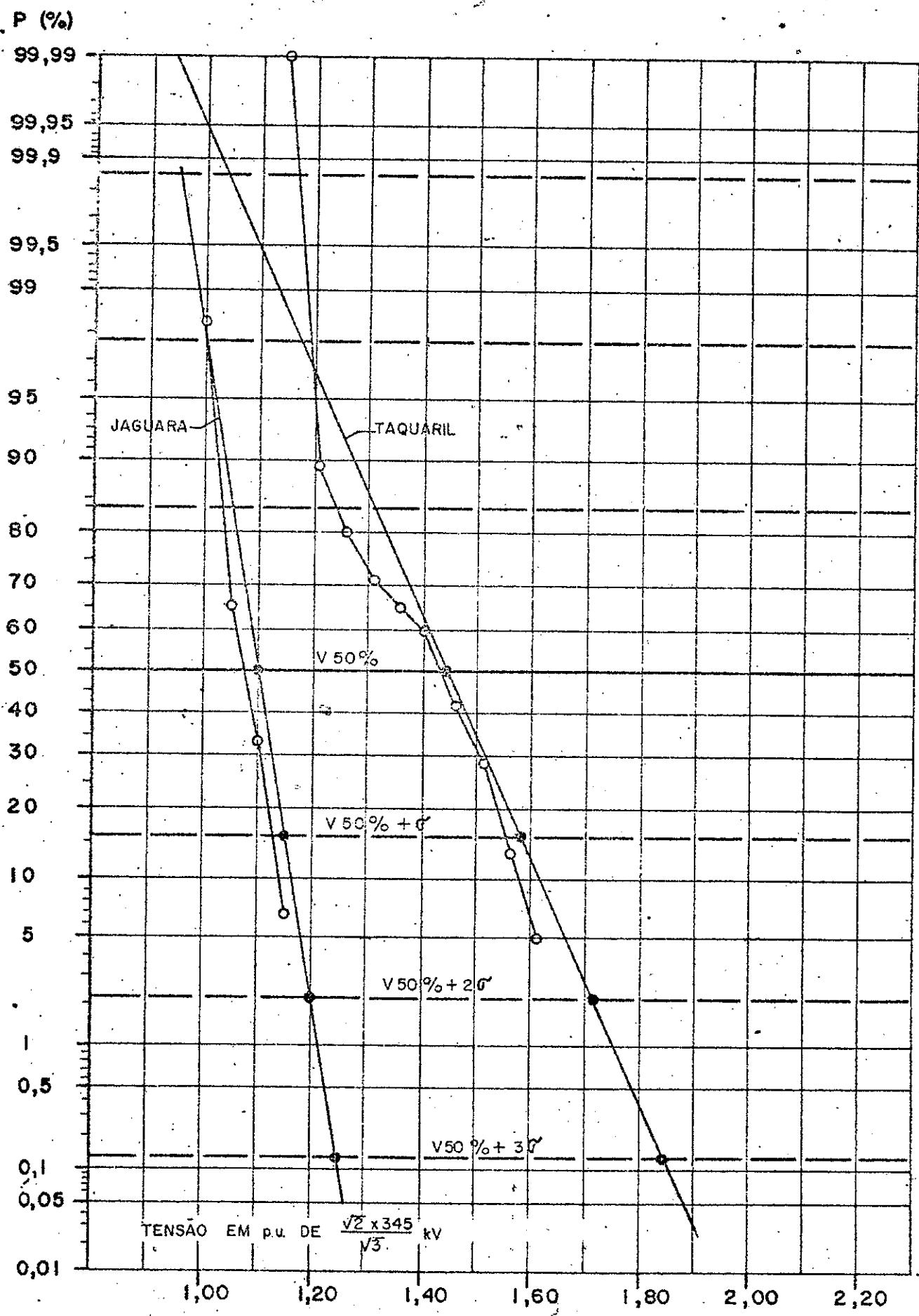


ILUSTRAÇÃO 5.3-2: DISTRIBUIÇÃO PROBABILÍSTICA DAS
SOBRETENSÕES EM JAGUARA E TAQUARIL
NA CONFIGURAÇÃO 2

P (%)

99,99

99,95

99,9

99,5

99

95

90

80

70

60

50

40

30

20

10

5

1

0,5

0,1

0,05

0,01

JAGUARA

TAQUARIL

V 50 %

V 50 % + 0'

V 50 % + 20'

V 50 % + 30'

TENSÃO EM pu DE $\frac{\sqrt{2} \times 345}{\sqrt{3}}$ kV

1,00

1,20

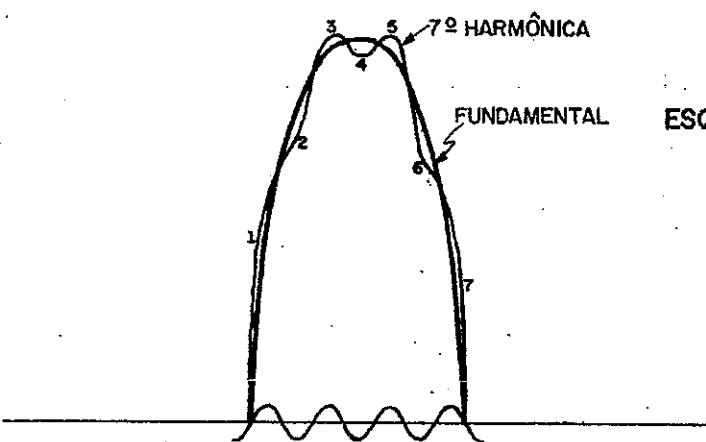
1,40

1,60

1,80

2,00

2,20



ESQUEMA ELUCIDATIVO DA 7º HARMÔNICA
EM FASE COM A FUNDAMENTAL

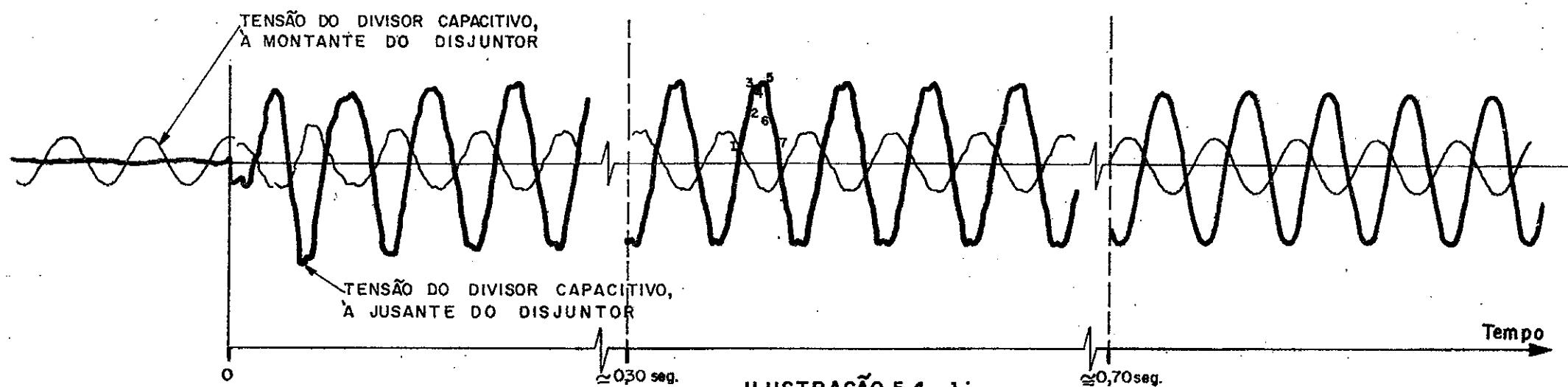
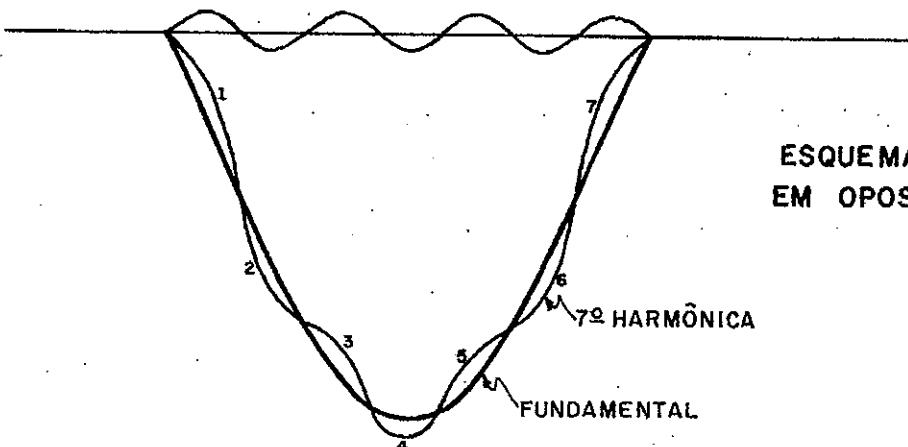


ILUSTRAÇÃO 5.4-1:
DISTORÇÃO DA TENSÃO, PREVALE CIMENTO
DA 7º HARMÔNICA — JAGUARA



ESQUEMA ELUCIDATIVO DA 7^ª HARMÔNICA
EM OPOSIÇÃO DE FASE COM A FUNDAMENTAL

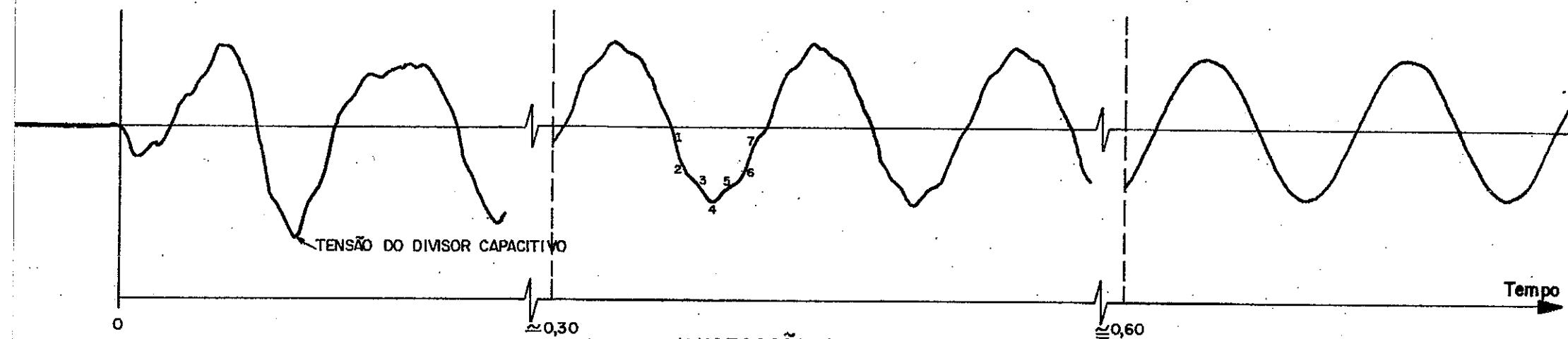


ILUSTRAÇÃO 5.4-2:
DISTORÇÃO DA TENSÃO, PREVALE CIMENTO
DA 7^ª HARMÔNICA — TAQUARIL

**ILUSTRAÇÃO 6.1-1: COMPARAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES PROBABILÍSTICAS
DAS SOBRETENSÕES EM JAGUARA — ENSAIOS DE
CAMPO E ESTUDOS**

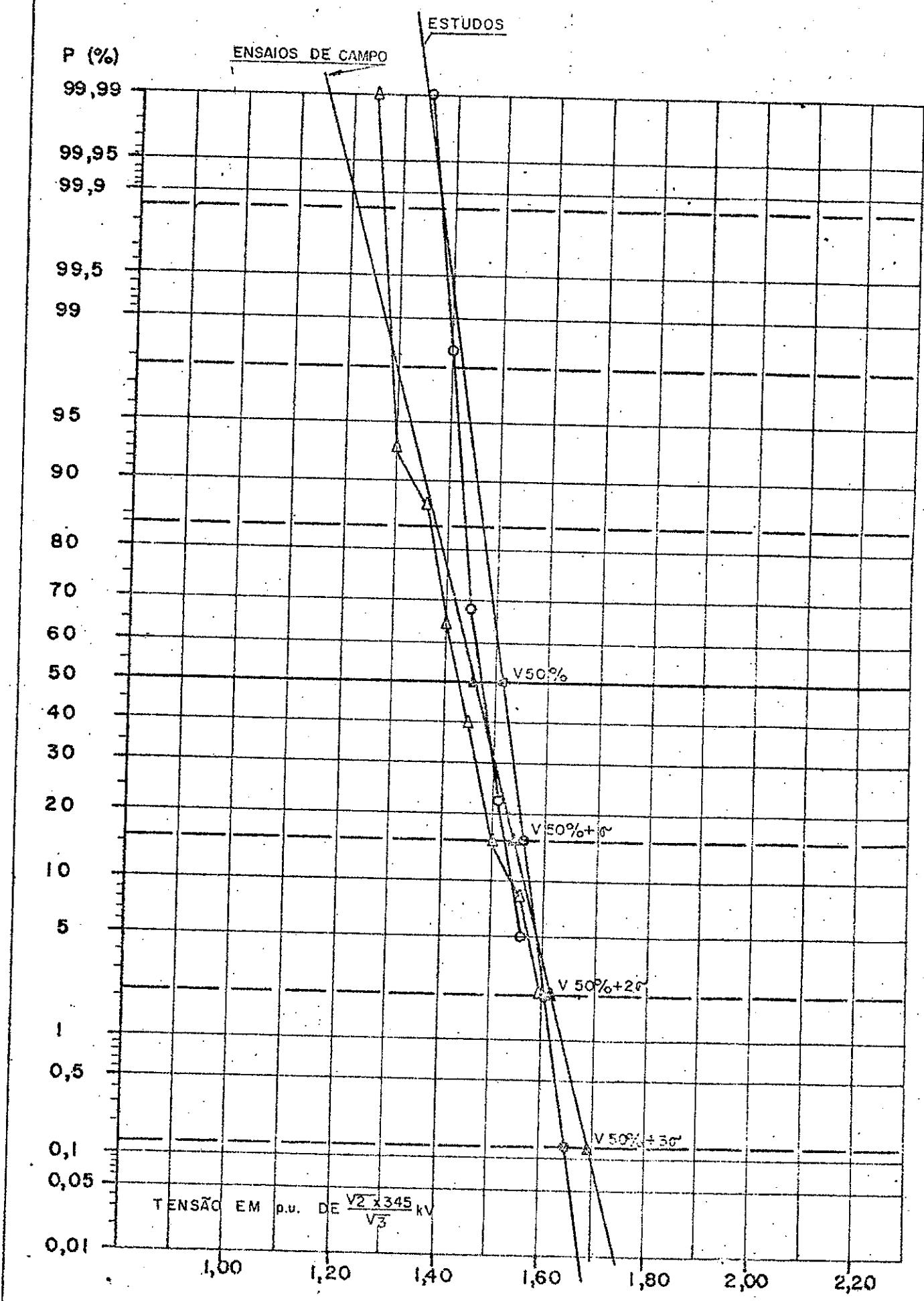


ILUSTRAÇÃO 6.1-2 : COMPARAÇÕES DAS DISTRIBUIÇÕES PROBABILÍSTICAS
DAS SOBRETENSÕES EM TAQUARIL - ENSAIOS DE
CAMPO E ESTUDOS

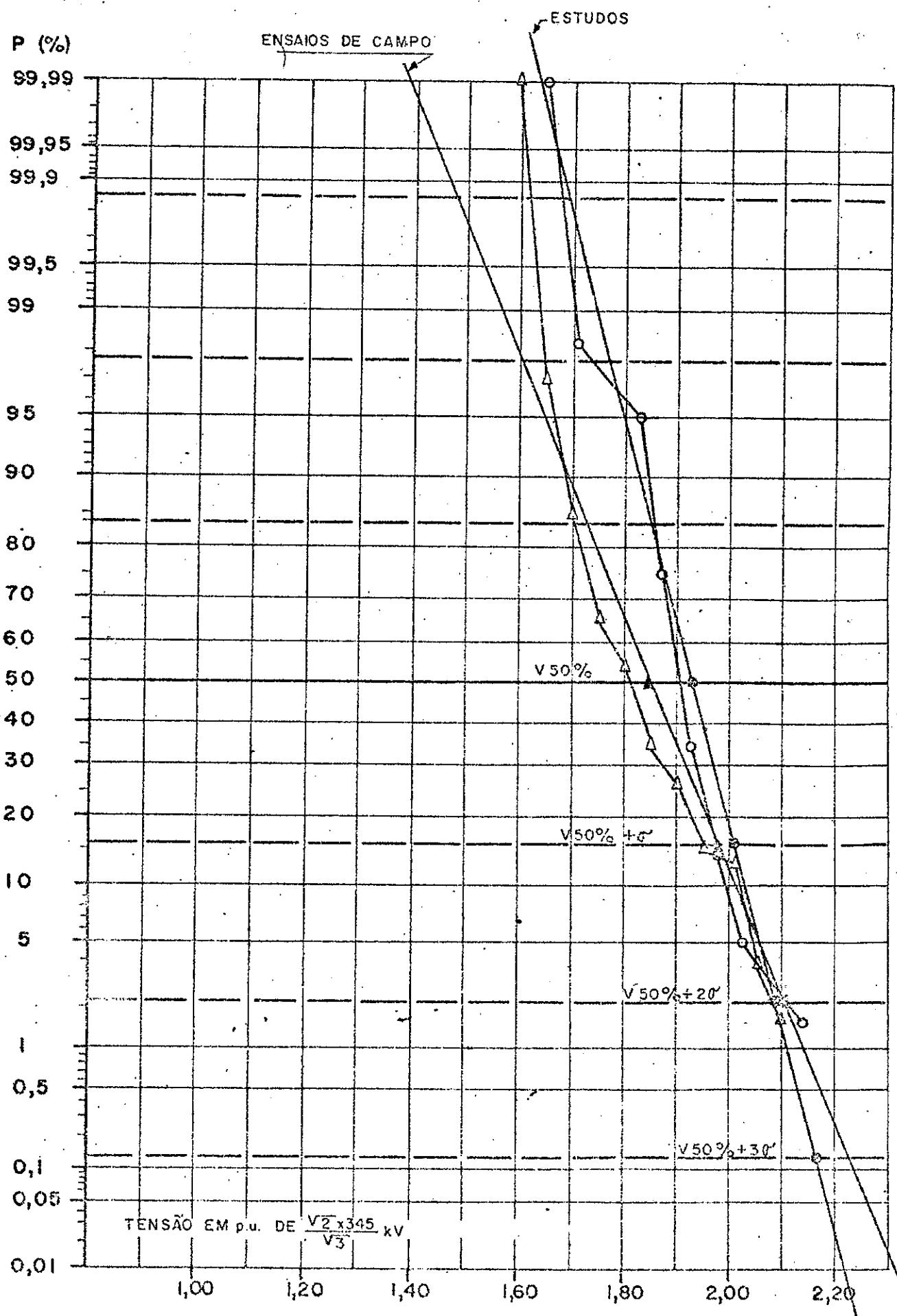
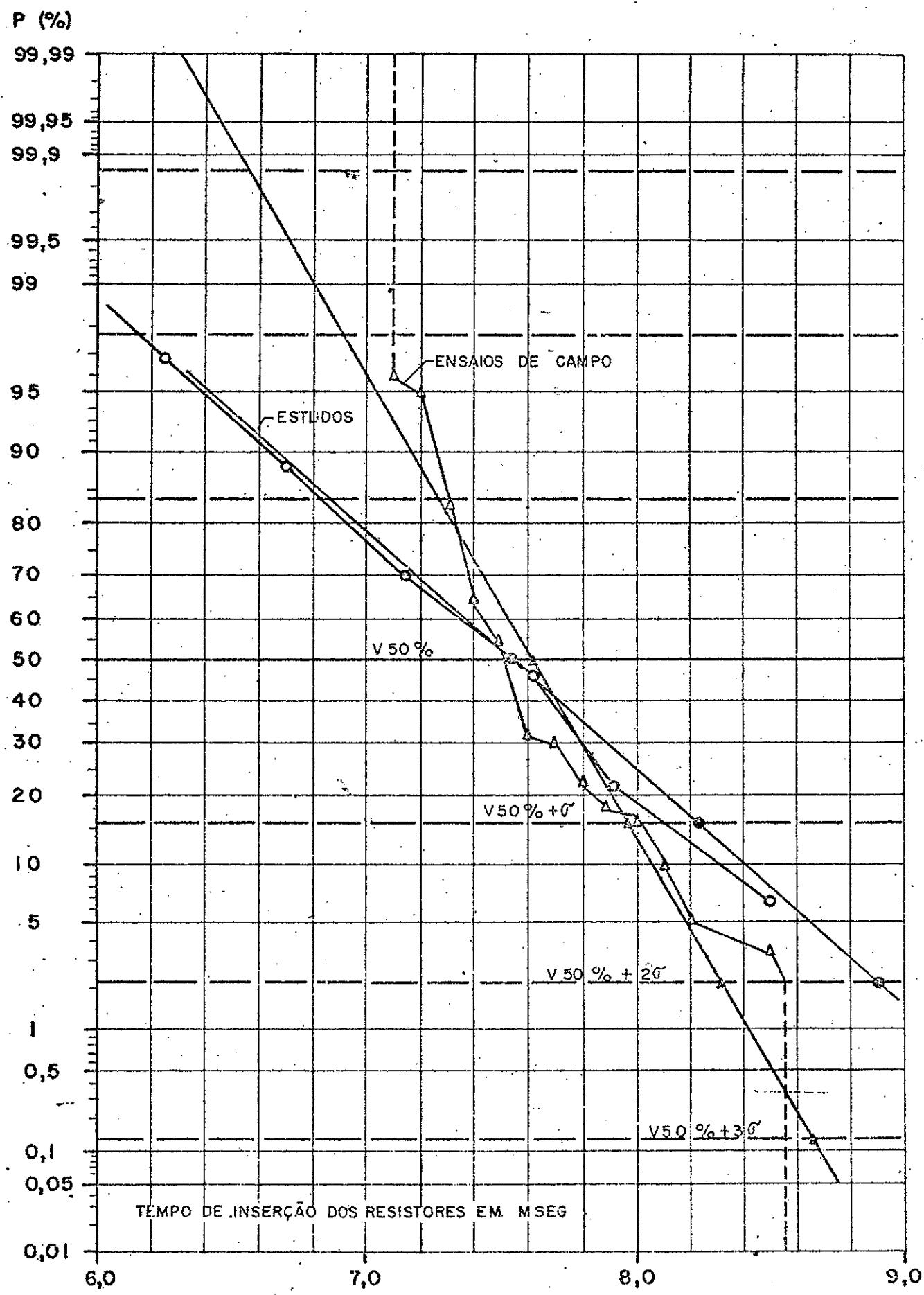


ILUSTRAÇÃO 6.1-3: COMPARAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES PROBABILÍSTICAS
DOS TEMPOS DE INSERÇÃO DOS RESISTORES
DO DISJUNTOR DA LINHA JAGUARA-TAQUARIL
EM JAGUARA—ENSAIOS DE CAMPO E ESTUDOS



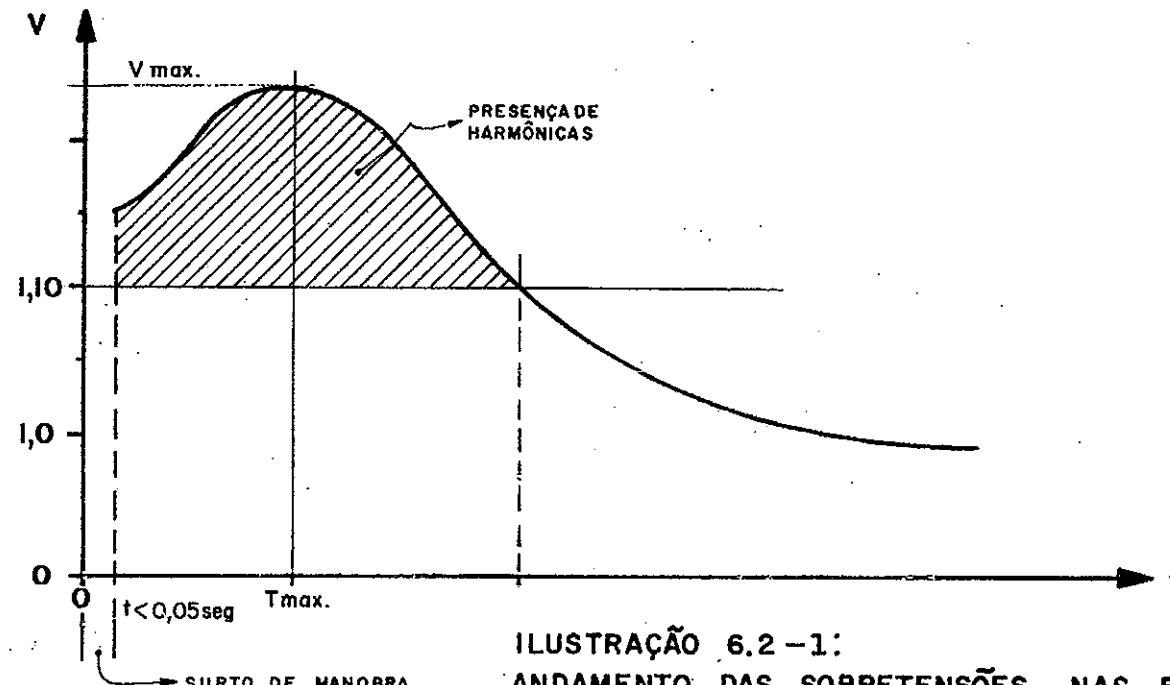


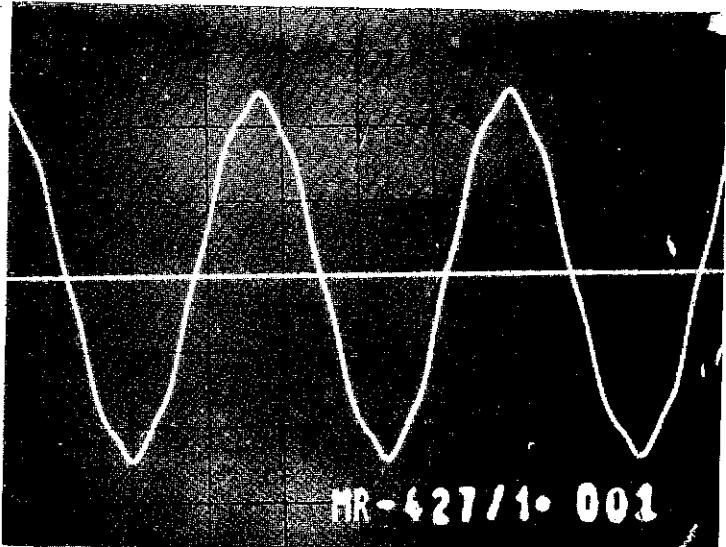
ILUSTRAÇÃO 6.2 - 1:
ANDAMENTO DAS SOBRETENSÕES NAS ENEGIZAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 6.2-2

Pequena distorção na tensão devida à presença da 7ª harmônica - estudo no analisador de transitórios.

ESCALA:

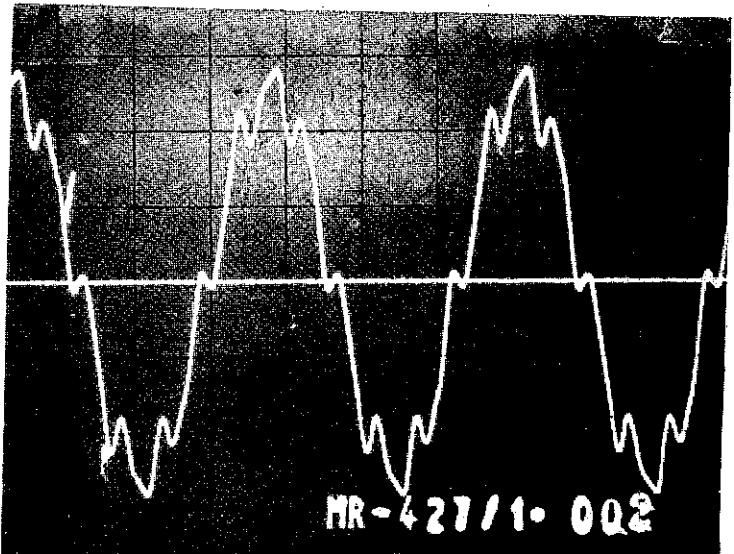
Horizontal- Tempo : 5ms/div
 Vertical - Tensão : 0,5p.u./div
 (p.u. de 345 kV)

ILUSTRAÇÃO 6.2-3

Alta distorção na tensão devida à presença da 7ª harmônica - estudo no analisador de transitórios.

ESCALA:

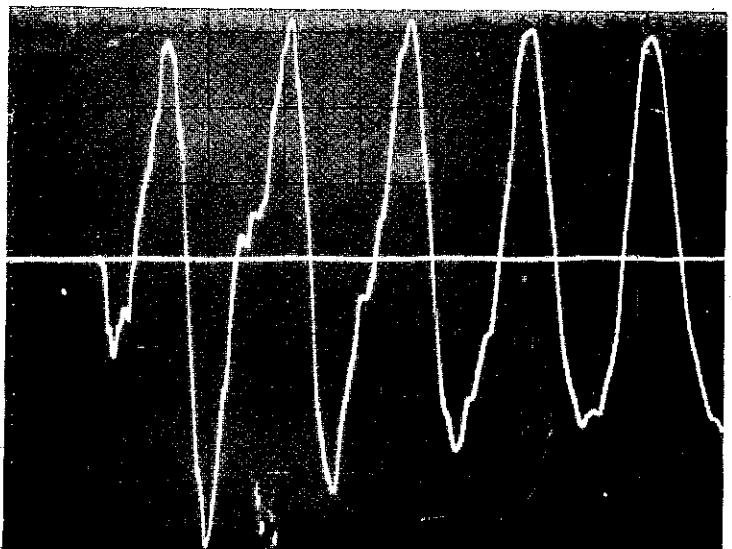
Horizontal- Tempo : 5ms/div
 Vertical - Tensão : 0,5p.u./div
 (p.u. de 345 kV)

ILUSTRAÇÃO 6.2-4

Sobretensão de manobra em Taquaril, energização - estudo no analisador de transitórios.

ESCALA:

Horizontal- Tempo : 10ms/div
 Vertical - Tensão : 0,5p.u./div
 (p.u. de 345 kV)



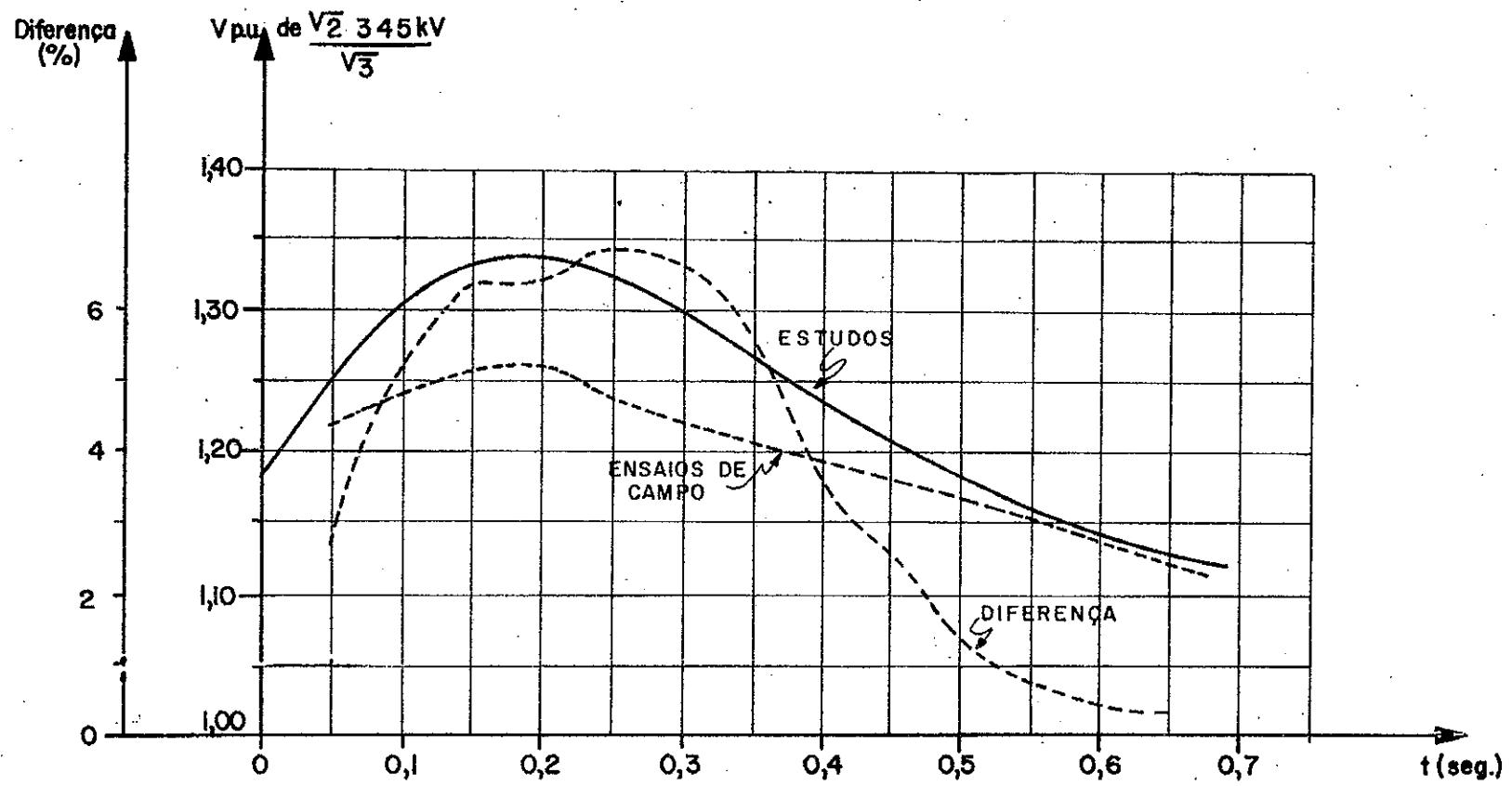


ILUSTRAÇÃO 6.2-5: COMPARAÇÃO ENTRE ANDAMENTOS DAS ENVOLTÓRIAS DAS SOBRETENSÕES EM JAGUARA - ENSAIOS DE CAMPO E ESTUDOS

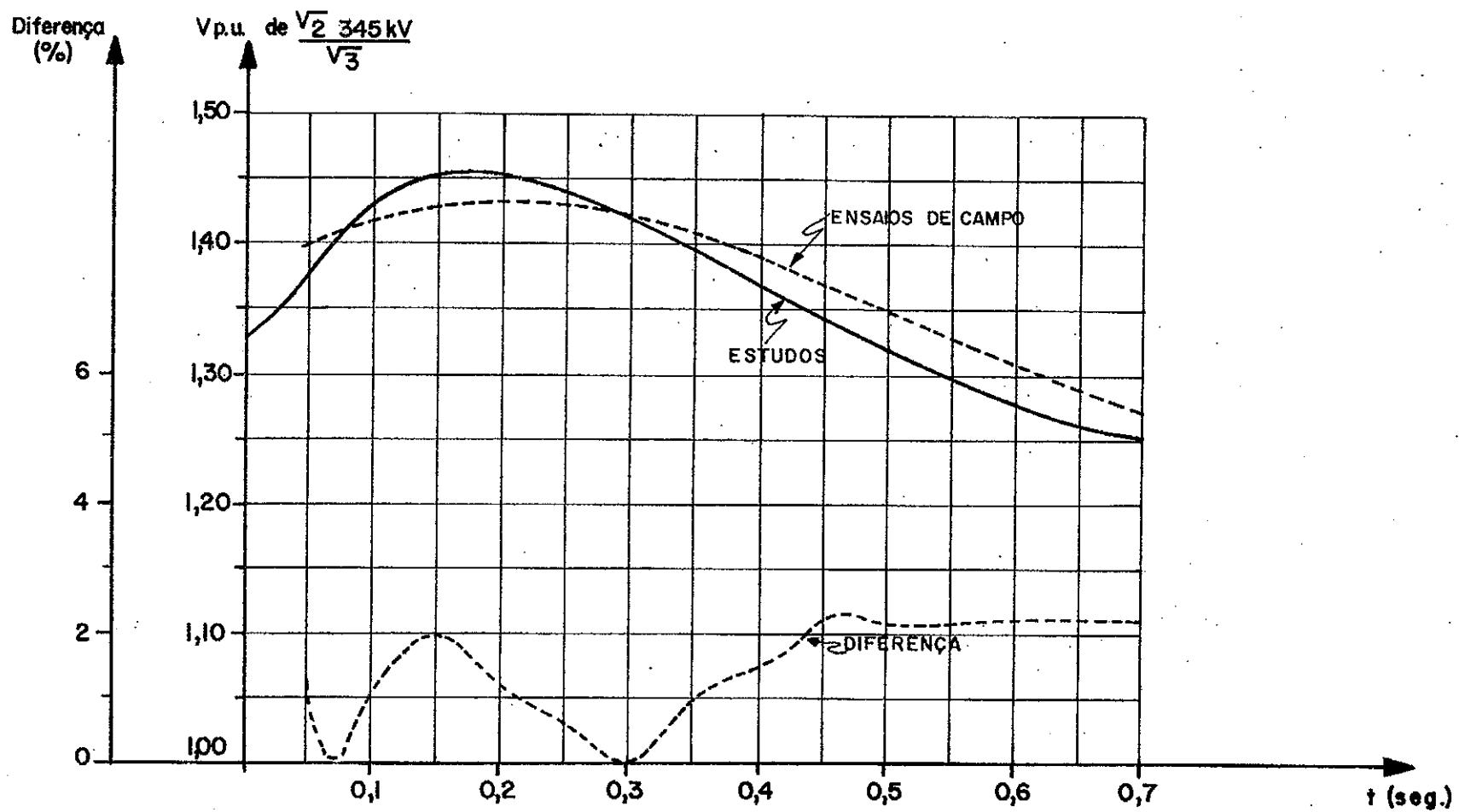


ILUSTRAÇÃO 6.2-6: COMPARAÇÃO ENTRE ANDAMENTOS DAS ENVOLTÓRIAS DAS SOBRETENSÕES EM TAQUARIL — ENSAIOS DE CAMPO E ESTUDOS