TESE
432

- EDUARDO HENRIQUE ELLERY FILHO -

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

MODELAGEM DE COMPENSADORES ESTÁTICOS PARA ESTUDOS DINÂMICOS À FREQÜÊNCIA INDUSTRIAL

ORIENTADOR: PROF. JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO APRESENTADO À COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE "MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA".

ITAJUBÁ, 24 de abril de 1985

CLASS.
CUTT.
TOMBO

CLASS. 621.372.5:621.316(043.2)
CUTT. E 45 m
TOMBO 432

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 148 de 23 / 04 / 85, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado Intitulada: "Modelagem de Compensadores Estáticos para Estudos Dinâmicos à Frequência Industrial"

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 Eduardo Henrique Ellery Filho.

Itajubá, 24 de Abril de 1985

1º Examinador
Dr. Alquindar Souza Pedroso
- CEPEL -

2º Examinador
Prof. Hector Arango
- EFEI -

3º Examinador
Prof. José Carlos de Oliveira
Orientador
UFUb

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: "Modelagem de Compensadores Estáticos para Estudos Dinâmicos à Frequência Industrial"

Autor: EDUARDO HENRIQUE ELLERY FILHO

JULGAMENTO

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

Resultado médio: Conceito A+, ou seja aprovado com distinção

Observações:

Itajubá, 24 de abril de 1985.

1º Examinador
Dr. Alquindar Souza Pedroso
CEPEL

2º Examinador
Prof. Hector Arango
EFEI

3º Examinador
Prof. José Carlos de Oliveira
Orientador

DEDICATÓRIA

A realização deste trabalho só me foi possível graças à incondicional compreensão e apoio de minha querida esposa BETÂNIA, e à inspiração inesgotável que sempre encontrei no sorriso inocente e na alegria da minha filhinha FABIANA. Entrego a vocês duas, com todo amor, o fruto deste longo período de esforço, consolidado nas páginas que se seguem.

AGRADECIMENTOS

A ELETRONORTE, nas pessoas dos engenheiros RICARDO PINTO PINHEIRO, CAROLINO AUGUSTO CEPEDA E JOSÉ MÁRIO MIRANDA ABDO, por terem me dado todas as condições necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas do Departamento de Planejamento Elétrico da ELETRONORTE, que sempre me incentivaram no objetivo perseguido, sempre com sugestões úteis e valiosas.

A todos os professores que direta e indiretamente formaram os caminhos que percorri até este ponto.

Ao grande amigo engº FAUSTO DE PAULA MENEZES BANDEIRA, que na revisão técnica propiciou significativa melhora no escopo global do trabalho.

À amiga SORAYA CHERUBINO SILVEIRA, pela dedicação e carinho com que realizou todo o trabalho de datilografia.

À meus pais, EDUARDO HENRIQUE ELLERY e ALADIR DE CARVALHO ELLERY, e à meus sogros, JULIO CAPILÉ e LAIS DIAS CAPILÉ, pelo amor, compreensão e carinho com que me dedicaram tão grande apoio.

Ao professor JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA, que durante todo este tempo mostrou ser, além de orientador dedicado e atento, um grande amigo.

À minha esposa BETÂNIA e filhinha FABIANA, pelas incontáveis horas em que tiveram que ficar sem minha presença, e pelo incentivo pronto com que me fizeram chegar até aqui.

E ao PAI CELESTE, que me permitiu contar com tantas pessoas tão boas ao meu redor, e me deu a oportunidade suprema de crescer, estudar e desenvolver. Rogo ainda que abençoe a todos estes AMIGOS, a quem tudo devo.

RESUMO

Este trabalho, que tem como objetivo principal o desenvolvimento de modelos de compensadores estáticos (C.E.'s) para simulações dinâmicas à freqüência industrial, contém ainda um estudo detalhado de seus principais tipos e características.

Inicialmente, procurou-se analisar os principais problemas que exigem a adoção de controle de tensão e de compensação reativa. Conforme cada caso, apresentou-se as soluções tradicionalmente adotadas. A seguir, introduziu-se os C.E.'s como equipamentos de tecnologia relativamente nova, fazendo uma análise de sua área de aplicação e uma comparação com as soluções de compensação reativa tradicionais.

A análise específica do funcionamento dos C.E.'s foi levada a efeito destacando-se as principais características das unidades variáveis de uso mais comum na atualidade. Para tanto, viu-se as equações básicas de cada uma dessas unidades, pesquisando sua atuação nas diversas etapas de funcionamento de um sistema elétrico. Feito isto, passou-se ao estudo dos arranjos de compensadores estáticos mais difundidos. Viu-se a área de aplicação de cada um deles, o desempenho frente às perdas de potência ativa e os principais problemas e vantagens por eles apresentados.

Ainda com relação ao desempenho genérico dos compensadores estáticos, foi dada uma especial ênfase à interação deste com o sistema elétrico de potência, desenvolvendo-se algumas metodologias de análise que permitem avaliar os limites de absorção e geração de reativo e verificar a adequabilidade do C.E. em relação às respostas dinâmicas requeridas.

A elaboração dos modelos dinâmicos foi dividida em duas etapas. Na primeira tratou-se dos equipamentos controlados por tiristores, onde se estudou os mais importantes equipamentos do sistema de controle, associando a cada um sua correspondente função de transferência. Com estas informações foram montados os diagramas de blocos dos modelos mais significativos. Na segunda etapa tratou-se do reator de núcleo saturado, desenvolvendo de forma detalhada suas equações. Analisando-as foi possível detectar os principais pontos que influem no retardo de sua resposta, e com algumas hipóteses simplificadoras chegou-se a um diagrama de blocos compatível

com o grau de detalhe exigido nos programas de estabilidade transitória.

Como item final, fez-se a adaptação dos modelos obtidos em um programa de estabilidade transitória, sendo detalhada a metodologia adotada neste processo. Após a adaptação, na etapa de testes, houve ainda a necessidade de se desenvolver um algorítmo de suavização das oscilações numéricas do processo iterativo existente no programa, a fim de melhorar suas características de convergência.

ABSTRACT

The main objective of this research is the development of Static VAr Systems (SVS's) models for dynamic simulations at industrial frequency. It also contains a detailed study of their principal types and characteristics.

An analysis on the principal situations which requires voltage control and VAr compensation was conducted in the beginning of this work. Accordingly to each case, the traditional solutions were presented. Eventually, the SVS's were introduced as equipments derived from a rather new technology. A study was made on their utilization along with a comparison between them and the already well-known traditional forms of reactive compensation.

The specific analysis on the functioning of the SVS detailed in the text took into consideration the most important characteristics of the variable units already in use nowadays. For this purpose, the basic equations for each of these units were studied, observing, meanwhile, their behavior in the many status of performance of an electric power system. Studies about the most common configurations of a SVS were conducted keeping an eye on their specific performance facing losses of active power, their principal problems and advantages.

In relation to the overall performance of the SVS's, a special attention was given to their interaction with the electric power system. Some methodologies were developed in order to permit the analysis and subsequent evaluation of the possibles VAr generation and absortion limits. In the meantime, these methodologies would allow the performance check of the SVS in relation to the required dynamic responses.

The elaboration of the dynamic models was divided in two parts. The first dealt with the thyristor controlled devices, and the most important equipments of the control system were studied relating to each one of them its proper transfer function. In possession of all this information, the block diagrams of the most outstanding models were made. In the second part the saturable reactor was analysed and its equations were developed in details. The most principal things which have influence in the delay of its response were detected, and considering some simplifying hyphotesis a block diagram was created. It was detailed enough to meet the standards of

precision required in programs of transient stability.

Finally, the models obtained were adapted in a transient stability program by means of a specific methodology here well detailed. afterwards, in the testing stage, it was necessary to develop an algorithm for the damping of the numerical oscilations of the iterative process of the program, in order to improve its convergence characteristics.

ÍNDICE

Pág.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO AOS COMPENSADORES ESTÁTICOS 01

1.1 - O Significado do Controle de Tensão para os Sistemas Elétricos de Potência 01

1.2 - Soluções Tradicionais de Controle de Tensão ... 03

1.2.1 - Soluções de Controle de Tensão Tradicionalmente Adotadas para Compensar as Variações Lentas de Carga 03

1.2.2 - Soluções de Controle de Tensão Tradicionalmente Adotadas para Compensar Cargas Especiais 05

1.2.3 - Soluções de Controle de Tensão Tradicionalmente Adotadas para ajudar na Estabilização do Sistema 06

1.3 - Os Compensadores Estáticos (C.E.'s)..... 13

1.3.1 - O Compensador Estático visto pelo Sistema 17

1.4 - Comparação entre Soluções Tradicionais de Controle de Tensão e os Compensadores Estáticos .. 18

1.4.1 - Reatores e Capacitores em Derivação em Comparação com os Compensadores Estáticos 19

1.4.2 - Compensadores Síncronos (C.S.'s) em comparação com os Compensadores Estáticos. 21

CAPÍTULO 2 - PRINCIPAIS UNIDADES CONTROLÁVEIS DOS COMPENSADORES ESTÁTICOS 28

Pág.

2.1 - Análise dos Elementos de Impedância Variável de um Compensador Estático 28

2.1.1 - Reator Controlado por Tiristores (RCT) 30

2.1.2 - Capacitor Chaveado por Tiristores (CCT) 44

2.1.3 - Reator de Núcleo Saturado (RNS) 54

2.2 - Conclusões 64

CAPÍTULO 3 - ARRANJOS BÁSICOS DE COMPENSADORES ESTÁTICOS 68

3.1 - Arranjos Básicos de Compensadores Estáticos envolvendo Reatores Controlados por Tiristores 68

3.1.1 - Reator Controlado por Tiristores com Capacitores Fixos 69

3.1.2 - Reator Controlado por Tiristores com Capacitores Chaveados 74

3.2 - Arranjos Básicos de Compensadores Estáticos envolvendo Capacitores Chaveados por Tiristores 76

3.3 - Arranjos Básicos de Compensadores Estáticos envolvendo Reatores de Núcleo Saturado 78

3.4 - Arranjos não Convencionais para Compensadores Estáticos 79

3.5 - Conclusões 80

CAPÍTULO 4 - INTERAÇÃO DOS COMPENSADORES ESTÁTICOS COM O SISTEMA ELÉTRICO 81

4.1 - O Equivalente do Sistema Elétrico de Potência 81

4.2 - As Equações e Curvas de Funcionamento a Regime Permanente 84

4.3 - Algumas Conclusões sobre o Comportamento Dinâ-
mico 88

Pág.

4.4 - Conclusões 91

CAPÍTULO 5 - MODELAGEM DOS COMPENSADORES ESTÁTICOS PARA SIMULAÇÕES DIGITAIS 93

5.1 - Modelagem para Estudos de Fluxo de Carga 93

5.2 - Modelagem para Estudos de Curto-Circuito 97

5.3 - Modelagem para Estudos de Penetração Harmônica 98

5.4 - Modelagem para Simulações Dinâmicas à Freqüência Industrial 99

5.4.1 - Modelos Dinâmicos para Compensadores Estáticos com Controle Externo 101

5.4.2.- Modelo Dinâmico para Compensadores Estáticos com Controle Intrínseco 115

5.4.3 - Cálculo do Ganho do Modelo Linear de Compensador Estático com Controle Externo 129

5.5 - Modelagem para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos à Freqüência Natural 133

CAPÍTULO 6 - INTRODUÇÃO DOS MODELOS DINÂMICOS DE COMPENSADORES ESTÁTICOS EM UM PROGRAMA DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA 135

6.1 - Representação dos C.E.'s no Sistema Elétrico do Programa de Estabilidade 136

6.2 - Adaptação dos Modelos Dinâmicos de Compensadores Estáticos às Equações Algébricas do Método Trapezoidal Implícito 139

6.2.1 - Desenvolvimento Algébrico do Modelo Linear Simplificado de Compensador Estático 142

6.2.2 - Desenvolvimento Algébrico do Modelo Linear de Compensador Estático com Rea

Pág.

6.2.3 - Desenvolvimento Algébrico do Compensador Estático do Tipo Reator Saturado com Capacitor de Correção de Inclinação 151

6.2.4 - Desenvolvimento Algébrico para Novos Modelos de Compensadores Estáticos ... 159

6.3 - Introdução dos Compensadores Estáticos no Programa de Estabilidade Transitória 161

6.3.1 - Descrição da Forma de Funcionamento do Programa de Estabilidade Transitória 161

6.3.2 - Descrição das Subrotinas Específicas para Simulação dos Compensadores Estáticos 166

6.4 - Conclusões 170

CAPÍTULO 7 - SIMULAÇÕES DE COMPENSADORES ESTÁTICOS NO PROGRAMA DE ESTABILIDADE 172

7.1 - Testes dos Modelos de Compensadores Estáticos Implantados 172

7.1.1 - Testes Realizados 176

7.1.2 - Análise do Problema de Convergência com o Sistema Mal Condicionado 191

7.2 - Simulação de um Sistema Elétrico Completo incluindo Compensadores Estáticos 203

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES GERAIS 206

ANEXO I 210

ANEXO II 215

ANEXO III 224

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 249

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO AOS COMPENSADORES ESTÁTICOS

1.1 - O Significado do Controle de Tensão para os Sistemas Elétricos de Potência

Os primeiros sistemas elétricos de potência (SEP's) que surgiram no mundo apresentavam uma característica muito particular e que, nos dias de hoje, é cada vez mais difícil de ser encontrada — a geração localizava-se junto à sua própria carga. E, mesmo nesta situação, já se pôde verificar que a manutenção de uma razoável constância na tensão dos pontos de entrega aos consumidores era de suma importância. Desde então, iniciou-se a busca de métodos eficazes para o real controle da tensão nos SEP's. Deve-se ressaltar que, devido ao pequeno porte destes primeiros sistemas, o mecanismo básico de controle consistia apenas na regulação do nível de tensão nos terminais das máquinas geradoras, bem como na regulação de sua capacidade de fornecer a necessária energia aos consumidores.

É importante notar que, desde tais tempos, muitas modificações surgiram. Com o aparecimento de maiores consumidores industriais, que já utilizavam sofisticados processos produtivos, a manutenção da tensão de suprimento, e também da freqüência, dentro de estreitos limites de variação tornou-se importante meta a ser perseguida pelos operadores dos SEP's. Além disto, com o crescimento dos grandes centros consumidores e escasseamento das fontes de energia locais, houve necessidade de distanciar a geração de sua carga . E foi então que novas soluções para o controle de tensão tiveram que surgir, pois a simples regulação dos geradores já não se fazia tão eficiente.

Num crescer quase que geométrico, as necessidades de energia elétrica das sociedades vieram se avolumando. Isto obrigou aos planejadores procurarem fontes cada vez mais distantes e, o que é mais importante, a interligar várias fontes para atender a seus consumidores. Com isto, novos e mais complexos problemas surgiram, forçando a estudos e soluções mais e mais elaborados. Esta mesma sociedade crescente passou a exigir ainda melhor qualidade e constância em seu suprimento, o que só veio a aumentar a carga de respon

Para fazer frente a estas exigências, começaram a surgir órgãos de normalização e fiscalização das companhias fornecedoras de energia elétrica, como é o caso do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, no Brasil. Estes órgãos fixam metas a serem perseguidas quando do Planejamento e Operação dos SEP's, visando garantir a necessária qualidade no suprimento aos consumidores, bem como uma aplicação econômica e rentável dos recursos da área energética.

Com relação aos níveis de tensão de suprimento, uma série de normas são especificadas. Em primeiro lugar, apenas uma pequena variação na tensão média da barra do consumidor é permitida com relação ao valor nominal pré-estabelecido. No caso do Brasil, este desvio é de $\pm$ 5%. Por outro lado, caso existam flutuações menores, mas que se repitam com freqüência, elas deverão ser evitadas mesmo não ultrapassando os 5% acima citados. Por exemplo, variações de tensão da ordem de 0,20 a 0,30%, mas que se verifiquem 5 ou 6 vezes por segundo, provocam na iluminação desagradáveis pulsações comumente conhecidas como "flickers", e que se constituem numa má qualidade de serviço. Por isto mesmo, elas deverão ser reduzidas, de alguma forma, pelo supridor, para que não cheguem aos consumidores.

Entretanto, o controle de tensão não tem sua importância restrita ao fornecimento de energia com qualidade, muito pelo contrário, é através de um adequado controle dos níveis de tensão de um sistema de transmissão que se consegue mantê-lo em funcionamento sob certas condições de contingências de linhas e equipamentos. Além disto, para se conseguir um máximo aproveitamento das grandes linhas de transmissão, a fim de que elas possam transportar o máximo de potência ativa possível, controles de tensão estrategicamente colocados tornam-se sumamente necessários.

Por último, pode-se destacar ainda mais a premência de controles de tensão, lembrando que as cargas dos SEP's são extremamente diversificadas e dinâmicas. Isto significa que, a cada instante, a demanda requerida pelos consumidores, tanto no que se refere à potência ativa quanto à reativa, varia, forçando a uma constante readaptação por parte dos fornecedores. E parte desta readaptação consiste justamente em exercer um adequado controle na tensão de suprimento, pois caso contrário os limites acima citados seriam freqüentemente violados.

1.2 - Soluções Tradicionais de Controle de Tensão

Abordando de forma mais específica as necessidades de controle de tensão conforme sua causa, nota-se de imediato uma íntima relação entre a causa de origem da variação de tensão e a solução a ser adotada para se contrapor a esta variação. Sendo assim, com fins de simplicidade e coerência, pode-se destacar três tipos básicos de causas de variações de tensão que levam a diferentes grupos de soluções tradicionais:

- Variações de tensão originadas pela natural mudança da carga ao seguir sua curva de demanda diária (caracterizam-se por serem variações lentas);

- Variações de tensão causadas por grandes consumidores especiais (caracterizam-se por serem variações rápidas e/ou desequilibradas, que podem introduzir perturbações que se expandem por todo o sistema);

- Variações de tensão oriundas de chaveamentos programados ou de faltas que levam à saída de linhas e/ou equipamentos de grande porte (caracterizam-se por serem variações instantâneas e de grande porte que, na maioria das vezes, põem em risco a estabilidade do sistema como um todo).

A divisão feita acima, e que será abordada com maiores detalhes a seguir, não implica necessariamente que a solução adotada para um determinado item não sirva para o outro. Ela indica apenas que existem soluções preferenciais para cada um dos pontos acima, no caso deles não se encontrarem justapostos — o que se verifica frequentemente nos problemas a serem resolvidos .

1.2.1 - Soluções de Controle de Tensão Tradicionalmente Adotadas para Compensar as Variações Lentas da Carga

Quando a principal causa para o problema de variações de tensão a ser combatido reside na natural e constante mudança da demanda de energia das cargas do sistema, procura-se adotar uma série de medidas operativas, técnica e economicamente viáveis, a fim de sanar o problema. Tais medidas podem ser automáticas ou manuais (com a intervenção direta do operador). No entanto, todas elas caracterizam-se pelo fato de não necessitarem ser adotadas num momento preciso, sendo havendo uma folga de tempo (da ordem de

para sua adoção, sem que isso traga prejuízos na qualidade de atendimento.

A primeira medida a ser tomada e, certamente, a mais econômica, consiste em alterar a tensão de geração conforme a necessidade apresentada. Contudo, esta atitude só é realmente efetiva caso a carga fique próxima à geração. Caso contrário, este tipo de controle não se apresenta suficiente para manter as tensões nas barras de carga mais distantes dentro dos limites pré-estabelecidos.

Quando a solução acima não cabe, procura-se adotar medidas de atuação mais próximas à carga e que, por isto mesmo, atinjam os objetivos perseguidos. As soluções apresentadas a seguir não têm uma ordem de prioridade, vindo a serem adotadas conforme a necessidade de cada caso, perseguindo sempre a otimização dos aspectos técnicos e econômicos.

Uma das formas mais eficientes de controle de tensão junto às cargas consiste na mudança do intercâmbio de potência reativa do barramento em questão com o sistema, através do chaveamento da compensação reativa "shunt" existente (capacitores ou reatores). É claro que este chaveamento só poderá ocorrer, principalmente no que se refere aos reatores, caso esta compensação não deva permanecer energizada, a fim de evitar problemas de sobretensões e/ou estabilidade no sistema.

A mudança da relação de transformação dos transformadores dotados de comutação automática sob carga é, também, muito usada para compensar os distúrbios de tensão devidos à variação diária da carga. Quando são registradas mudanças sazonais de maior porte na carga, admite-se ainda a mudança de taps em transformadores com comutação a vazio, desde que esta mudança não seja freqüente (uma ou duas vezes ao ano).

Outra medida relativamente comum é a mudança da tensão nos barramentos controlados por compensadores síncronos. Como estes equipamentos localizam-se normalmente em grandes subestações, este tipo de solução fica condicionado ao funcionamento do sistema como um todo, ficando o ajuste da tensão do síncrono como função da carga pesada e leve de todos os barramentos.

Pode-se utilizar também o chaveamento de linhas de transmissão, desde que esta atitude não venha diminuir o índice de confiabilidade de atendimento às cargas nos períodos em que a linha permaneça desenergizada.

Por fim, vale ressaltar que, dos elementos e/ou medidas de controle de tensão aqui abordados, somente os compensadores síncronos, e em menor escala os comutadores automáticos sob carga, são capazes de fazer um controle contínuo de tensão. Entretanto, como neste tópico se tratou de variações lentas de tensões devido às cargas, deve-se ter em mente que todas as medidas apontadas são eficientes, desde que usadas criteriosamente.

1.2.2 - Soluções de Controle de Tensão Tradicionalmente Adotadas para Compensar Cargas Especiais

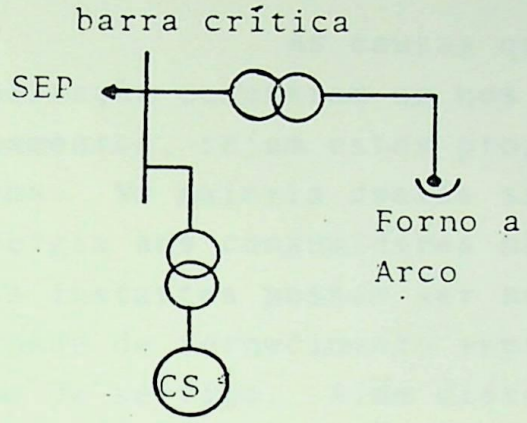
Por cargas especiais entende-se aquelas cargas, normalmente industriais, que pelo seu porte e característica influem diretamente no desempenho do sistema. Elas podem ser desequilibradas (caso típico de ferrovias), altamente indutivas (grandes motores de indução), podem provocar variações rápidas nas tensões dos barramentos próximos, introduzindo pulsações incômodas aos demais usuários (fornos a arco), podem provocar uma grande injeção de harmônicas no sistema (grandes conversores para indústrias de alumínio, elos de corrente contínua), etc.. Enfim, cargas especiais são aquelas que, de uma forma ou de outra, podem vir a prejudicar o atendimento normal aos demais consumidores. E, por esta razão, os estudos de planejamento de sistemas elétricos de potência devem prever equipamentos que eliminem ou ao menos atenuem os efeitos danosos de tais cargas.

Quando o problema principal consiste no distúrbio das tensões devido a injeções de correntes harmônicas no sistema, a adoção de ligações adequadas dos transformadores, juntamente com a instalação de filtros, é quase sempre satisfatória para eliminar o problema.

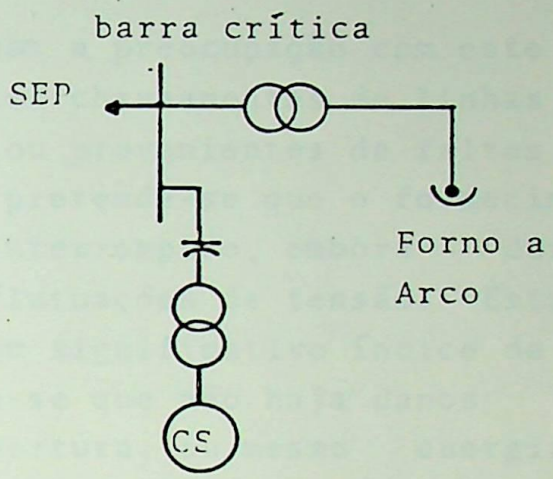
Já no caso de cargas que de um momento para outro variam bruscamente a exigência de reativo, a solução consiste em fazer com que o barramento em que esta carga está conectada tenha um alto nível de curto-circuito. Isto permitirá que a nova quantidade de reativo da carga seja fornecida/absorvida sem que haja uma grande perturbação nas demais tensões do sistema. E para se conseguir o adequado nível de curto, deve-se ter próximo à carga especial uma grande geração, ou compensadores síncronos.

Para o caso de introdução de pulsações nas tensões do sistema, ou os chamados "flikers", adota-se uma solução seme

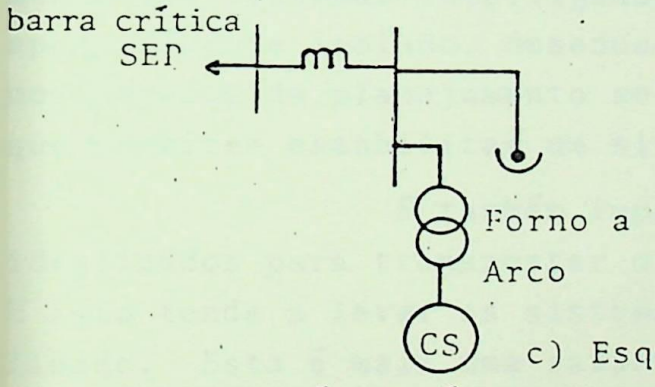
indutores ou capacitores amortecedores, cuja finalidade é justamente amortecer as rápidas variações de tensão provocadas pela carga. Como exemplificação, a figura 1.1 mostra três tipos básicos de instalações para fornos a arco:



a) Esquema só com compensador síncrono



b) Esquema com adoção de um capacitor série com o CS, a fim de reduzir a impedância de curto-circuito do conjunto transformador/CS



c) Esquema com reator amortecedor

Obs.: Barra crítica é aquela a partir da qual as variações de tensão devem ser reduzidas

Figura 1.1 - instalacões típicas para compensação de Fornos a Arco

Com relação a cargas desequilibradas, como grandes cargas monofásicas (Ferrovias P. Ex.), pode-se adotar como solução, além da tradicional ligação scott para transformadores, uma combinação criteriosa das três opções apontadas anteriormente. Deve-se apenas salientar que, neste caso, é bastante importante contar com um sistema elétrico forte (alto nível de curto-circuito), pois isto ameniza bastante o efeito do desequilíbrio. E, além disto, é possível que haja necessidade de dotar os geradores do sistema com capacidade especial para operação desequilibrada.

1.2.3 - Soluções de Controle de Tensão Tradicionalmente Adotadas para Ajudar na Estabilização do Sistema

o sistema contra perda de estabilidade e/ou sobretensões do que propriamente garantir um bom perfil de tensões em regime permanente. Mas, estando todos os fatos inter-relacionados, muitas vezes acontecerá que equipamentos, usados inicialmente para beneficiar o desempenho dinâmico do sistema, também auxiliarão a melhorar as tensões no regime permanente.

As causas que originam a preocupação com este tipo de aplicação encontram-se nos freqüentes chaveamentos de linhas ou equipamentos, sejam estes programados ou provenientes de faltas no sistema. Na maioria destas situações pretende-se que o fornecimento de energia aos consumidores não seja interrompido, embora durante alguns instantes possam ser sentidas flutuações de tensão. Esta continuidade de fornecimento representa um significativo índice de qualidade de serviço. Além disto, espera-se que não haja danos nos equipamentos em conseqüencia de uma abertura, ou mesmo energização de linha ou equipamento. Tudo isto somado ao fato de que com o crescimento dos sistemas interligados cresce também o perigo de um defeito, aparentemente isolado, desencadear uma reação em cadeia, faz com que, nos estudos de planejamento se considere, cada vez mais, os recursos que permitem estabilizar um sistema.

É também importante notar que os SEP's devem ser idealizados para transportar o máximo de potência ativa possível. E isto tende a levar os sistemas a operarem no seu limite de estabilidade. Esta é mais uma razão que torna os controles de tensão com objetivos de estabilização mais e mais necessários.

Começando pela necessidade de se evitar sobretensões que venham a danificar equipamentos, pode-se dizer que uma das soluções mais difundidas consiste na instalação adequada de reatores "shunt". Estes reatores deverão ficar constantemente em funcionamento, já que não se pode prever o momento do defeito. Esta solução, embora ainda seja amplamente difundida, traz o incoveniente de baixar o perfil de tensões em carga pesada. Isto força que, na maioria das situações, sejam acrescentados ao sistema capacitores que anulem o efeito deste reator em regime permanente, mas que sejam colocados de forma a não anularem sua atuação durante os transitórios em que eles se fazem precisos.

Com relação à estabilidade do sistema, existem várias opções a serem adotadas. Em princípio, quando o problema é de estabilidade dinâmica, ou seja, quando após a eliminação de um defeito todas as máquinas permanecem em sincronismo, mas as oscila-

subseqüentes (ângulo, potência, etc.) são crescentes, ou mesmo pouco amortecidas, procura-se uma solução através dos controles de tensão, e mesmo de velocidade, dos geradores e compensadores síncronos existentes. Nestas condições, na maioria das vezes é suficiente o ajuste adequado dos sistemas de controle, utilizando-se de sinais adicionais que coloquem em fase os torques sincronizantes das máquinas com as oscilações de potências nas linhas de interligação entre as mesmas. Isto fornece o necessário amortecimento das oscilações dinâmicas. Quando não se consegue sucesso com este tipo de solução, parte-se para a adoção de métodos equivalentes aos que serão descritos a seguir para problemas de estabilidade transitória.

Quando as máquinas saem de sincronismo antes mesmo de completarem um ciclo de oscilação conjunta, diz-se comumente que o sistema é transitoriamente instável. Como isto ocorre nos primeiros instantes após o distúrbio, não há tempo útil para a atuação efetiva de reguladores de tensão e, muito menos, de velocidade. Desejando-se tornar um caso nestas condições em estável, faz-se necessária uma alteração na configuração do sistema.

Como o problema acima surge da incapacidade de transferência de potência ativa entre as máquinas, ou ainda porque no regime permanente pré-falta o sistema operava próximo ao seu limite de estabilidade, todas as soluções a serem adotadas certamente terão como objetivo aumentar a capacidade de intercâmbio de potência entre as diversas áreas do sistema, tanto em regime permanente quanto para situações dinâmicas. Sendo assim, a primeira idéia que se teria nesta situação seria a de aumentar o número de linhas que interligam as áreas que perdem o sincronismo. E, sem dúvida alguma, esta seria a melhor e mais confiável solução técnica. No entanto, há de se convir que ela é extremamente cara e, por isto mesmo, só deverá ser adotada quando não houver outro meio de resolver o problema.

Uma solução mais econômica, e que muitas vezes resolve, é a adoção de suportes de tensão junto à carga. Isto faz com que a tensão neste ponto baixe menos após a eliminação de algum importante elo do sistema, permitindo assim que uma maior quantidade de potência continue a ser absorvida neste ponto ou, ainda, intercambiada com o restante do sistema.

Mas não é sempre que o problema de estabilidade transitória é resolvido como mostra o parágrafo anterior. Em certos casos, o que se necessita realmente é que o intercâmbio de potência através de uma interligação seja o maior possível, a fim de permitir

que haja oscilação de potência entre as máquinas das áreas interligadas, sem que isto implique em perda de sincronismo. Uma forma relativamente simples de se chegar a este aumento de intercâmbio é a utilização de um suporte de tensão intermediário entre as áreas interligadas. E sobre este assunto vale uma explicação mais detalhada, pois servirá de base ao tema principal deste trabalho.

Suponha-se, para efeito de simplificação, duas máquinas síncronas interligadas por linhas puramente indutivas, na configuração apresentada na Figura 1.2 .

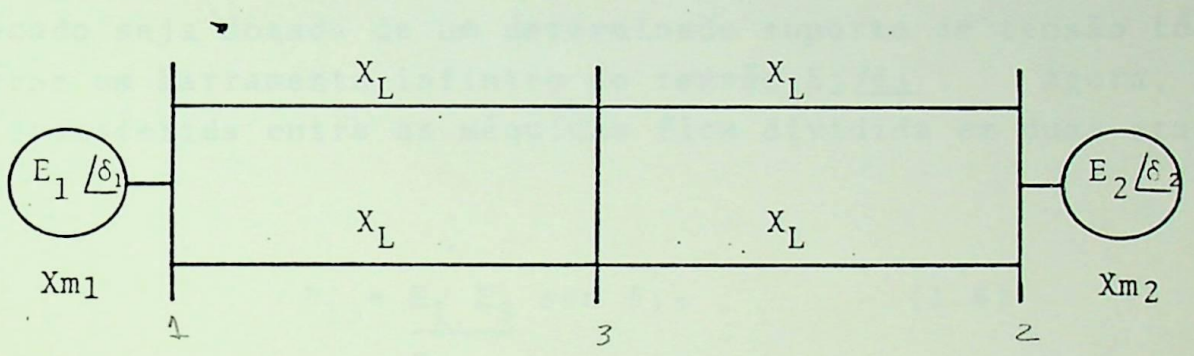


Figura 1.2 - Sistema elétrico simplificado

onde, $Xm_1 = Xm_2$ = reatâncias das máquinas síncronas
$E_1 \angle\delta_1$; $E_2 \angle\delta_2$ = tensões e ângulos internos das máquinas
X_L = reatâncias dos trechos de linha indicados.

Nesta situação, a transferência de potência ativa da máquina 1 para a 2 pode ser dada pela seguinte fórmula (Referências 1 e 2):

$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_{eq12}} \operatorname{sen} \delta_{12} \qquad (1.1) ;$$

sendo $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ (1.2),

e, para este caso em específico,

$$X_{eq12} = X_{m1} + X_{m2} + X_L \qquad (1.3) .$$

Nestas condições, sem nenhum suporte de tensão intermediário, o mai

or ângulo possível entre as máquinas é de 90°. No entanto, não se pode operar muito próximo a este limite, pois qualquer variação não prevista na carga ou no sistema de transmissão talvez impossibilitasse a transmissão da mesma quantidade de potência. Por exemplo, se uma das linhas da figura 1.2 fosse desligada obter-se-ia uma nova impedância equivalente, maior que a inicial, o que certamente acarretaria numa diminuição da potência máxima de 1.1. Sendo assim, se antes do desligamento a potência transmitida estivesse maior que a capacidade máxima de transmissão de depois do desligamento, seria impossível ao sistema continuar operando.

Admita-se agora que a barra intermediária do caso enfocado seja dotada de um determinado suporte de tensão ideal, que a torne um barramento infinito de tensão $E_3 \angle \delta_3$. Agora, a potência transferida entre as máquinas fica dividida em duas etapas dadas por:

$$P_{13} = \frac{E_1 E_3}{X_{eq13}} \operatorname{sen} \delta_{13} \qquad (1.4)$$

$$P_{32} = \frac{E_3 E_2}{X_{eq32}} \operatorname{sen} \delta_{32} \qquad (1.5)$$

Sendo $\delta_{13} = \delta_1 - \delta_3$ e $\delta_{32} = \delta_3 - \delta_2$.

E por observação direta da Figura 1.2 , tem-se imediatamente:

$$X_{eq13} = X_{m1} + X_L/2 = X_{eq32} \qquad (1.6)$$

Se as três tensões forem iguais, $P_{13} = P_{32}$. E mais, X_{eq13} é metade de X_{eq12} sem suporte de tensão. Com isto a nova potência transferida P_{12} , igual a P_{13} ou P_{32} , será o dobro. E mais, agora o máximo de δ_{13} e δ_{32} é que será de 90°, permitindo que a defasagem angular total entre as máquinas seja de 180° e não de 90°, como no caso anterior. O comportamento dos dois casos de regime permanente acima são mostrados nas curvas 1 e 2 de potência versus ângulo da figura 1.3a. A curva 3 da mesma figura mostra o mesmo caso, mas com um suporte de tensão real, que dificilmente permitirá o aumento da defasagem angular para 180° ou mesmo permitirá dobrar a máxima transferência de potência possível.

Do que foi abordado, viu-se claramente o efeito do suporte de tensão intermediário no aumento do intercâmbio de potência entre áreas ou máquinas. Mas para ver como este aumento colabora no aumento da estabilidade transitória, será necessário utilizar uma ferramenta simples, de pouca valia prática que, no entanto, permitirá uma análise adequada do assunto. Trata-se do critério das áreas iguais (Referência 2). Este critério supõe que a potência mecânica das máquinas permanece constante durante um distúrbio, e que, no regime permanente inicial, a potência mecânica (Pm) é igual à potência elétrica (Pe). A partir deste ponto diz-se que um sistema será estável quando as mudanças no sistema elétrico (altera-se a curva de transmissão de potência elétrica em que o sistema opera) são tais que permitem que a área das curvas acima da reta de potência mecânica constante (área de desaceleração das máquinas) sejam maiores ou, no mínimo, iguais às áreas inferiores (área de aceleração).

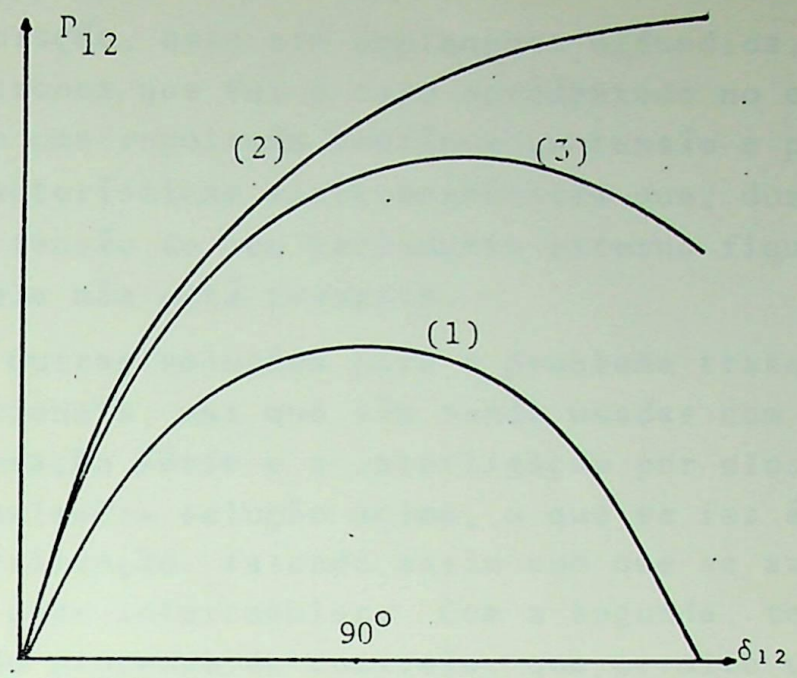
Como ilustração, a figura 1.3b traz um exemplo que mostra o sistema tratado anteriormente, sem suporte de tensão, sofrendo um curto-circuito trifásico franco e, depois, para eliminação do mesmo, perdendo uma das linhas. Nesta situação, considerou-se que o tempo de eliminação do curto foi crítico, ou seja, permitiu que a área de aceleração ficasse igual à área de desaceleração. A figura 1.3c mostra o mesmo caso, com mesmo tempo de eliminação do curto, só que com um suporte intermediário de tensão real. Como se vê, aqui o tempo de eliminação deixa de ser crítico, pois a curva pós-falta é mais elevada e permite que sobre ainda uma área entre ela e a potência mecânica constante, aumentando a margem de estabilidade.

Disto depreende-se que a melhoria da capacidade de intercâmbio de potência ativa influi positivamente, com maior ou menor eficiência conforme as características do suporte de tensão adotado, em todos os instantes de funcionamento de um sistema elétrico. Sendo assim, o suporte poderá melhorar a margem de estabilidade transitória de seu sistema, ou mesmo torná-lo estável. Deve-se esclarecer mais uma vez que a análise acima, embora simplista, reflete com razoável precisão o comportamento transitório dos sistemas elétricos de potência. Por isso, as conclusões acima são, em princípio, válidas na maioria dos casos. Considerações tais como reguladores de tensão, características das cargas, etc., normalmente só vêm a melhorar a situação estudada.

(1) Sem suporte de tensão

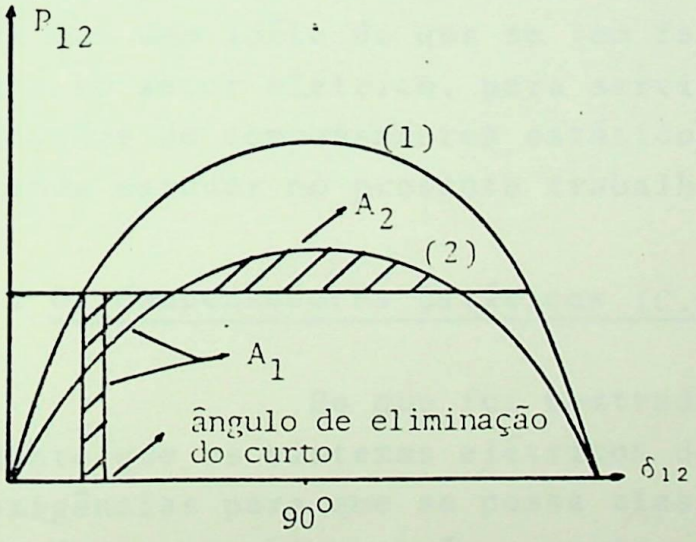
(2) Com suporte ideal

(3) Com suporte real



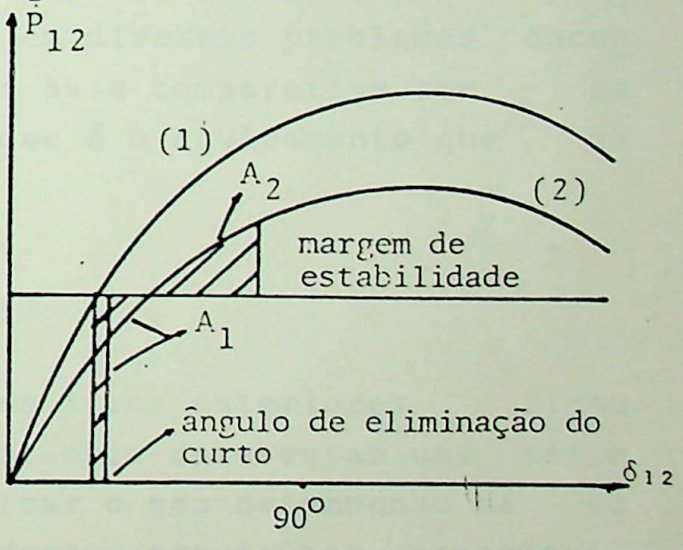
a) influência do suporte de tensão na transmissão de potência

(1)- Pré-falta
(2)- Pós-falta
A_1 - Aceleração
A_2 - Desaceleração



b) Critério das áreas iguais sem suporte de tensão e com margem de estabilidade nula

(1)- Pré-falta
(2)- Pós-falta
A_1 - Aceleração
A_2 - Desaceleração



c) Critério das áreas iguais com suporte intermediário de tensão

Figura 1.3 - Aumento da capacidade de transmisão no sistema da Figura 1.2

A efetivação prática deste suporte intermediário de tensão pode ser conseguida de várias maneiras. De início poder-se-ia pensar em bancos de capacitores. No entanto, nem sempre isto é o mais recomendável.pois a presença dos mesmos no sistema pode não ser suficiente e vir a ser danosa em alguns casos de rejeição. Ou

tra tradicional solução, esta sim amplamente difundida, é o uso de compensadores síncronos, que foi o caso apresentado no exemplo anterior. Eles fornecem uma regulação contínua na tensão e permitem por suas próprias características eletromagnéticas que, durante o período transitório, a tensão de seu barramento externo fique mais elevada do que quando ele não está presente.

Outras soluções para o problema tratado acima, que não são tão tradicionais, mas que vêm sendo usadas com sucesso, são a adoção de compensação série e a interligação por elos de corrente contínua. Com a primeira solução acima, o que se faz é diminuir a impedância da interligação, fazendo assim com que se aumente a potência máxima que se pode intercambiar. Com a segunda, tem-se um equipamento de avançado processo de controle, que permite uma resposta ultra-rápida no que concerne à oscilação de potência. E mais, por funcionar em corrente contínua, ele desacopla as oscilações de máquinas de cada área, reduzindo o problema de perda de sincronismo, que passa a ser responsabilidade somente da capacidade do sistema de controle do elo.

Para finalizar, deve-se salientar que a exposição acima não pretende cobrir todas estas áreas de estudo, mas simplesmente dar uma idéia do que se tem feito em diversos problemas encontrados no setor elétrico, para servir de base comparativa com as aplicações de compensadores estáticos, que é o equipamento que se pretende estudar no presente trabalho.

1.3 - Os Compensadores Estáticos (C.E.'s)

Do que foi mostrado nos itens anteriores ficou evidente que os sistemas elétricos de potência apresentam uma série de exigências para que se possa classificar o seu desempenho de satisfatório. E mais, o não cumprimento destes requisitos constitui-se num problema a ser sanado pelos planejadores e operadores dos sistemas. Sendo assim, ao longo dos anos, uma série de equipamentos e recursos de controle vêm sendo desenvolvidos com o fim de auxiliar na solução dos problemas existentes nos SEP's, objetivando sempre um sério compromisso entre os aspectos técnicos e econômicos das soluções a serem adotadas.

E foi exatamente neste cenário de pesquisa, procurando atender às exigências cada vez maiores de confiabilidade, rapidez de resposta e baixos custos, que os fabricantes de equipamentos para sistemas de potência desenvolveram os compensadores estáti

cos. É claro que também foi de primordial importância no surgimento dos C.E.'s o desenvolvimento da tecnologia de estado sólido para altas potências.

Feitas as observações acima surge, então, o natural questionamento do que vem a ser um compensador estático. Na realidade, quando se fala em compensadores estáticos o que se tem em mente não é um equipamento isolado, mas sim um sistema de compensação reativa "shunt" usado para variar o intercâmbio de potência reativa de uma determinada barra com o restante do SEP. O C.E. é formado pela combinação de um ou mais elementos estáticos de compensação reativa (reatores lineares ou não, e capacitores), configurando-se num sistema de compensação em derivação ou "shunt" com componentes passivos. E a sua principal característica é que, a partir dos elementos que o compõem, ele pode controlar seu fornecimento ou absorção de potência reativa, dentro de sua faixa nominal de operação, de forma extremamente rápida (caso necessário, ele pode passar de um extremo a outro em cerca de 1,5 ciclos). Exemplificando, a figura 1.4 mostra o comportamento da tensão da barra controlada por um determinado C.E. após um distúrbio relativamente sério no sistema de transmissão. E mais, esta variação de potência reativa dentro da faixa de controle pode ser processada de forma contínua ou discreta, conforme as necessidades de cada aplicação dos C.E.'s.

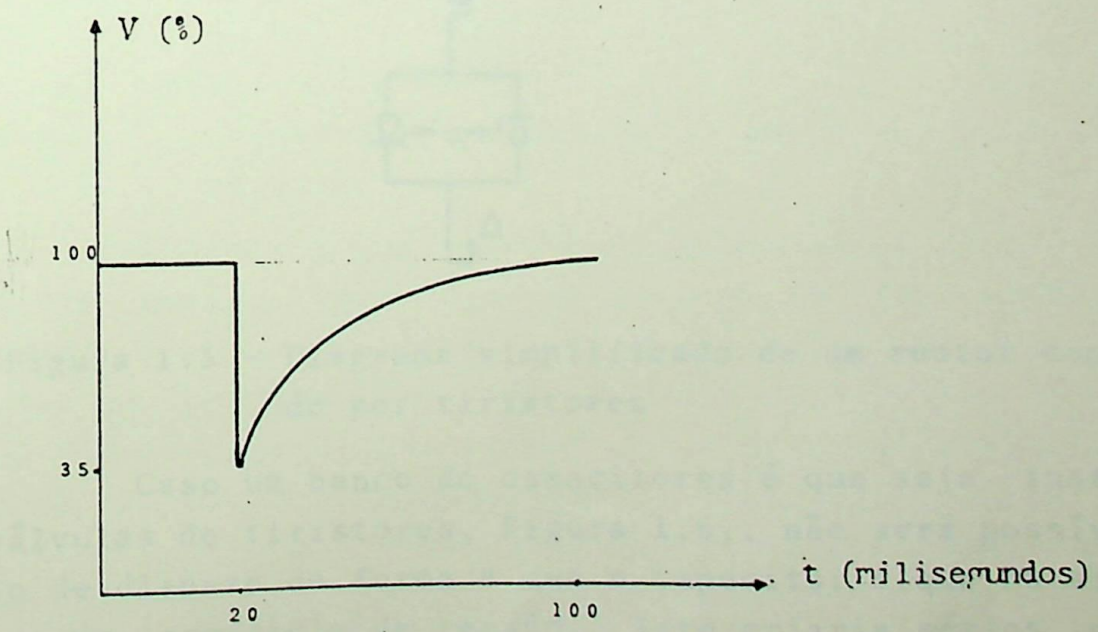


Figura 1.4 - Curva típica de regulação de tensão de uma barra controlada por um Compensador Estático

Pela definição dada, vê-se que os compensadores estáticos podem ser, funcionalmente, muito semelhantes aos compensadores síncronos, pois variam o intercâmbio de potência reativa com o sistema, de forma rápida. Sendo assim, pode-se dizer que este tipo de equipamento agirá, de forma análoga a um síncrono, como um regulador de tensão, e se utilizará da injeção ou absorção de reativo para manter sua variação de controle o mais próxima possível do valor pré-especificado.

Mas, sendo o C.E. um equipamento composto somente por elementos estáticos, surge a natural dúvida de como ele consegue uma variação rápida, e até mesmo contínua, de potência reativa. E a resposta é bastante simples. Graças ao desenvolvimento dos tiristores de alta potência, pode-se interconectar um reator linear ao sistema elétrico através de uma válvula de tiristores, e através da variação do ângulo de disparo desta válvula, permitir que o reator fique presente no sistema por um período maior ou menor em cada semiciclo de tensão, obtendo-se assim uma variação contínua do reativo absorvido.

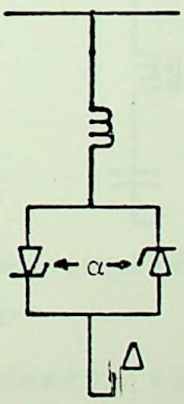


Figura 1.5 - Diagrama simplificado de um reator controlado por tiristores

Caso um banco de capacitores é que seja instalado através de válvulas de tiristores, Figura 1.6., não será possível variar o ângulo de disparo de forma a que o capacitor fique no sistema só em parte de um semiciclo de tensão. Isto criaria sérios distúrbios transitórios à operação tanto do sistema quanto dos próprios capacitores. Assim, os tiristores têm por função apenas chavear o banco de capacitores, o que acontece sempre para um mesmo ângulo de disparo, em condições normais. Este tipo de ligação permite que os

capacitores sejam ligados ou desligados do sistema em apenas meio ciclo, e sem qualquer problema de transitórios de energização ou reacendimento de arco na desenergização.

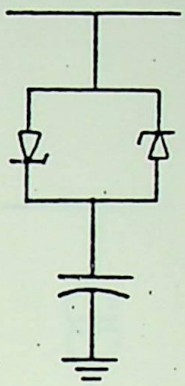


Figura 1.6 - Diagrama simplificado de um capacitor chaveado por tiristores

Uma terceira forma de regulação dos reativos seria o uso de reatores saturados, Figura 1.7. Pela sua própria curva característica de elemento não linear, ele consegue, por si só, controlar a tensão de um determinado ponto, de forma contínua.

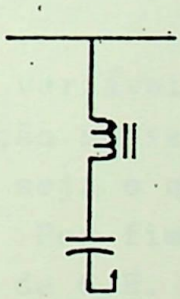


Figura 1.7 - Diagrama simplificado de um reator de núcleo saturado

É através destes tipos básicos de elementos, com controle externo (Reator Linear e Capacitor) ou intrínseco (Reator de Núcleo Saturado), combinados com elementos estáticos não controlados e lineares, que se consegue a necessária faixa de excursão de potência reativa a fim de controlar a tensão de um determinado ponto do sistema. Desta forma, pode-se dizer que, a princípio, existe uma grande quantidade de opções, todas elas diferentes, de se fazer uma instalação de compensador estático para uma determinada aplicação. A escolha final do arranjo a ser adotado ficará a cargo de uma criteriosa análise técnico-econômica, pois cada diferente configuração de C.E. além de apresentar um preço distinto, terá desempenho, facilidades de expansão, índice de confiabilidade, custeio de manutenção e perdas próprios, e todos estes parâmetros terão de ser levados em

conta para a decisão final.

Na Figura 1.8 são apresentados três arranjos genéricos de compensadores estáticos. É claro que para todos partiu-se do princípio que ele terá tanto que gerar quanto absorver reativo. Caso isto não ocorra, pode-se ter um C.E. composto tão somente dos elementos variáveis necessários.

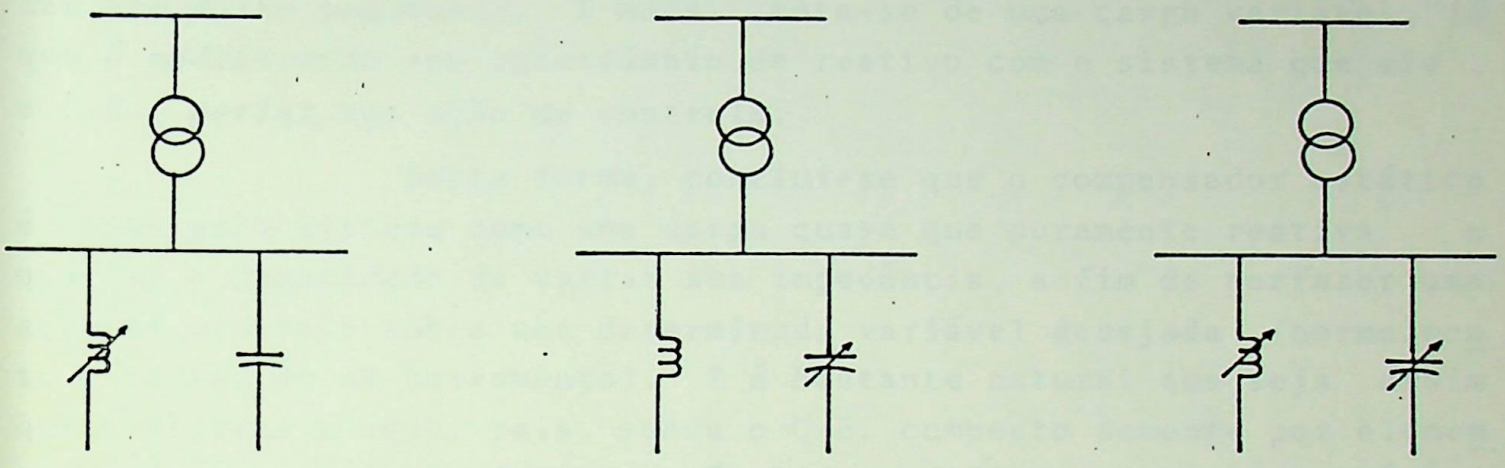


Figura 1.8 - Arranjos genéricos de Compensadores Estáticos

Os reatores variáveis da figura 1.8 podem ser lineares ou não, e sua instalação no secundário de um transformador nem sempre é requerida, embora seja o que ocorre atualmente na quase totalidade das aplicações. Por fim, deve-se dizer que uma análise mais detalhada de cada tipo de C.E. ficará adiada para o capítulo 2 deste trabalho.

1.3.1 - O Compensador Estático visto pelo Sistema

Da breve descrição feita sobre a forma de funcionamento de um C.E. viu-se que ele varia o intercâmbio de reativo com o sistema por três razões básicas, que dependem do tipo de elemento controlado usado:

- Pela energização sucessiva de um reator linear durante períodos maiores ou menores de um semiciclo de tensão;
- Pelo chaveamento rápido e sucessivo de bancos de capacitores, através das válvulas de tiristores (em até 1/2 ciclo);
- Pela atuação de um reator não linear operando na zona de saturação.

É claro que a atuação de um compensador estático, como já foi dito, pode, também, dever-se a uma combinação das formas de controle acima. Mas, o importante para o assunto agora abordado é que todos os tipos de compensação estática são formados somente com elementos passivos, significando que nenhum deles tem capacidade intrínseca de gerar tensão. Ora, isto posto, tem-se que qualquer C.E. nada mais é do que uma carga no sistema. E, sendo assim, pode-se ainda dizer que é uma carga com baixíssimo fator de potência (suas perdas são muito pequenas). E mais, trata-se de uma carga variável, já que é modificando seu intercâmbio de reativo com o sistema que ele, o C.E., perfaz sua ação de controle.

Desta forma, conclui-se que o compensador estático é visto pelo sistema como uma carga quase que puramente reativa e que tem a capacidade de variar sua impedância, a fim de perfazer uma ação de controle sobre uma determinada variável desejada (normalmente a tensão de um barramento). E é bastante natural que seja assim que o sistema o veja, pois, sendo o C.E. composto somente por elementos passivos, a única forma possível de modificar o seu intercâmbio de potência reativa com o sistema é pela alteração de sua impedância, o que no fim é o efeito obtido com qualquer tipo de compensador estático existente na atualidade.

1.4 - Comparação entre Soluções Tradicionais de Controle de Tensão e os Compensadores Estáticos

Como o compensador estático constitui-se em mais uma solução de controle de tensão, nada mais natural do que, depois de se ter uma noção básica do seu funcionamento, fazer uma comparação entre ele e os equipamentos mais difundidos até o momento. Mas, já de início, deve ficar claro que em todos os casos se supõe que o C.E. a ser usado é aquele, dentre os vários tipos possíveis, de configuração mais adequada técnica e economicamente para o caso. Partindo do tipo ótimo de C.E. é que será feita a comparação com os outros equipamentos. Isto significa que, na análise a seguir, os compensadores estáticos serão tratados de uma forma genérica, não se entrando no mérito de cada configuração. O confronto entre os tipos de C.E.'s será feito nos Capítulos 2 e 3.

1.4.1 - Reatores e Capacitores em Derivação em Comparação com os Compensadores Estáticos

Quando reatores e/ou capacitores são instalados junto às cargas para resolver o problema de controle de tensão oriundo da natural variação da demanda de um sistema, sem qualquer outro propósito, dificilmente existirá uma outra solução que possa ser comparável a esta. Se no aspecto técnico o chaveamento diário de capacitores e reatores, seguindo a curva de carga do sistema, não é normalmente o mais desejado, mesmo quando não viola qualquer critério, há de se convir que, do ponto de vista econômico, não existe solução de controle de tensão tão adequada. O uso de comutadores sob carga nos enrolamentos de transformadores é comparável a esta solução, no entanto eles trazem o problema de não compensar o fator de potência das cargas, forçando uma maior circulação de reativo, aumentando assim as perdas na transmissão.

Deve-se deixar evidente que na consideração anterior foi suposto que os módulos dos bancos de capacitores e reatores são adequados ao sistema, de forma que o chaveamento de qualquer das unidades não provoca variações de tensão acima dos limites aceitáveis. É claro que um C.E. nestas circunstâncias agiria muito mais eficientemente, pois faria uma regulação automática e, se desejado, até mesmo contínua. No entanto, como tudo isto viria como vantagem adicional, não sendo o objetivo básico, dificilmente semelhante sugestão seria aceita, pois um C.E. equivalente a uma instalação simples de reatores e capacitores chaveáveis é bem mais oneroso.

No caso de reatores utilizados para evitar sobretensões, devendo por isto mesmo serem fixos no sistema, a comparação se torna mais equilibrada. Mas, mesmo assim, a vantagem, principalmente econômica, ainda pende para o reator fixo, dependendo de algumas considerações que serão enumeradas a seguir.

Em primeiro lugar, se o reator, por ficar constantemente no sistema, não prejudicar o intercâmbio de potência ativa, nem baixar o perfil de tensões em carga máxima a ponto de exigir a presença de bancos de capacitores convenientemente instalado para anular seu efeito, não há dúvidas de que ele superará o C.E. tanto técnica quanto economicamente.

Não se verificando a hipótese acima, a instalação do reator já ficará mais dispendiosa, pois necessitará também de bancos de capacitores que, muitas vezes, deverão ser chaveáveis para sa em carga mínima. E, nestas condições, pode-se estudar a

tuição do conjunto reator/capacitor por um C.E. que só consuma reativo. Este compensador ficará, em condições normais, com um pequeno consumo de reativo, satisfazendo a condição antes atendida pela energização simultânea de bancos de capacitores junto com o reator. E quando houvesse um surto de manobra que exigisse a presença do reator, ele teria condições de atuar em plena potência em menos de 1,5 ciclos (25 ou 30 milisegundos). É claro que, do momento do surto até o da atuação do C.E., todo o sistema teria que ter sua suportabilidade adequada às sobretensões surgidas neste pequeno período. E, neste ponto, vale ressaltar que já existem sistemas planejados para suportar os transitórios deste intervalo de tempo (Referência 3). E mais, este mesmo C.E. poderá ter uma ação contínua de controle de tensão, melhorando assim a regulação e até mesmo o desempenho dinâmico do sistema elétrico como um todo. Do ponto de vista econômico este compensador estático também ficará comparável, pois ele, contando somente com um reator, substituirá um conjunto de reator e capacitores. Ou seja, o preço excedente deste tipo de C.E. comparado com um reator fixo será compensado pelo preço do banco de capacitores, ficando, muitas das vezes, mais em conta.

Do que foi dito no parágrafo anterior, conclui-se que para o C.E. ser tecnicamente viável na substituição do reator fixo que precisa de compensação capacitiva para compensá-lo, é condição necessária que o sistema elétrico suporte as sobretensões durante o período em que ele ainda não atuou plenamente. E esta é uma condição que deve ser verificada para cada caso. Exatamente devido ao difícil cumprimento deste quesito, existem poucas aplicações de compensadores estáticos para este tipo de situação.

Pode-se ainda comparar os compensadores estáticos com os bancos de capacitores usados para aumentar a capacidade de transporte e, conseqüentemente, melhorar a estabilidade do sistema . Neste caso deve-se fazer uma analogia com o que foi dito em 1.2.3 , isto é, quando há a possibilidade do uso de tais bancos, esta passa a ser, sem dúvida, a melhor solução econômica e, mesmo, técnica. No entanto, na maioria das vezes, os bancos de capacitores, por não serem equipamentos com chaveamento rápido, são descartados por razões técnicas. Logo, não é possível uma análise comparativa em que o C.E. venha a substituir bancos de capacitores, nas condições acima descritas, onde este último pudesse operar satisfatoriamente do ponto de vista técnico.

Concluindo a comparação feita neste item, pode-se dizer que em raras situações o C.E. substitui bancos de reatores e/

ou capacitores, trazendo vantagens econômicas. Do ponto de vista técnico muitas vezes o compensador estático seria melhor, no entanto, como neste caso os bancos de reatores ou capacitores teriam um desempenho satisfatório, passa a pesar o fator preço. Desta forma, chega-se à conclusão que os C.E.'s não são feitos para entrar num mercado de competição com reatores e capacitores, apesar de, em certas condições, poderem vir a concorrer com estes.

1.4.2 - Compensadores Síncronos (C.S.'s) em Comparação com os Compensadores Estáticos (C.E.'s)

Pela suscinta descrição do que é um compensador estático, feita em 1.3, observou-se que o seu desempenho visto pelo sistema elétrico é bem parecido com o de um Compensador síncrono.

Sendo assim, é de se esperar que os C.E.'s venham a disputar com os síncronos o mesmo campo de aplicação técnica. E é exatamente isto que acontece. Na maioria dos casos onde se utilizaria um C.S. pode-se agora estudar a aplicação alternativa de um compensador estático, como será mostrado a seguir. E este último, por contar com uma avançada tecnologia de construção e controle, e por não ter partes girantes, normalmente terá um desempenho melhor e um custo mais baixo. No entanto, ver-se-á, também, que os síncronos continuam a apresentar vantagens que, em certas situações, o tornarão mais recomendáveis que os estáticos.

Antes de proceder à comparação proposta, deve-se abrir um parêntese para relembrar os princípios de funcionamento de um compensador síncrono. Como é sabido, este equipamento nada mais é do que uma máquina síncrona comum, só que sem nenhuma carga em seu eixo. A injeção de uma corrente contínua em seu rotor cria uma força magnetomotriz no "gap" estator-rotor, e com a injeção de uma corrente trifásica nos enrolamentos do rotor cria-se uma interação entre as forças magnetomotrizes geradas, fazendo com que o rotor gire à velocidade síncrona. O ângulo entre as forças magnetomotrizes do rotor e do estator determinará a potência ativa consumida (no caso, este ângulo é bem pequeno, em regime permanente, pois a carga do C.S. deve-se somente às suas perdas mecânicas). Por outro lado, o consumo/geração de potência reativa dependerá da magnitude da força magnetomotriz do rotor. Por isto, uma representação simples que se faz de um síncrono é uma fonte de tensão atrás de uma reatância pura (desprezando as perdas). Esta tensão é uma função da corrente do rotor bem como das interações eletromagnéticas estator/rotor. S

assim, pode-se dizer que o compensador síncrono tem uma fonte de tensão intrínseca.

Deste pequeno resumo das características de um C.S. depreende-se a primeira grande diferença entre eles e os compensadores estáticos. O primeiro, por ser uma fonte de tensão, é um elemento ativo e contribui para aumentar o nível de curto-circuito do ponto onde é instalado. Já o segundo, por ser composto somente por elementos passivos, não contribui em nada para a elevação deste nível. Se isto é vantagem ou desvantagem, não se tem como saber a priori. Na realidade, existem situações em que o aumento do nível de curto é uma necessidade imperiosa, em compensação, em outros casos, isto não só é desnecessário como até mesmo indesejável.

Comparando agora os C.E.'s com os síncronos na compensação a cargas especiais, deve-se ressaltar que já há muito tempo os estáticos vêm sendo usados com este propósito. Em verdade, o avanço da tecnologia de componentes de estado sólido de potência simplesmente abriu o campo de uso dos C.E.'s para os sistemas de transmissão. Os compensadores estáticos podem operar independentemente em cada fase, o que os torna ideais para compensar cargas desequilibradas. Além disto, como eles têm um tempo de resposta de 1 a 9 ciclos, enquanto que os síncronos mais rápidos ficam em cerca de 9 ciclos, e isto se contarem com excitatrizes estáticas, fica claro que os C.E.'s são muito mais eficientes no amortecimento das rápidas flutuações de tensão provocadas por fornos a arco, ou mesmo na partida de grandes motores de indução. Por último, o fato de não contribuir em curtos-circuitos é muito vantajoso, e mesmo menos oneroso, para instalações industriais. Exatamente por todas estas vantagens, o C.E. surgiu inicialmente para este tipo de aplicação.

No controle de tensão de sistemas elétricos de potência, em regime permanente, a atuação de compensadores estáticos e síncronos é equivalente, sendo indiferente a utilização de um ou outro. Por isto, tanto um quanto o outro propiciam um aumento de capacidade de transmissão de potência ativa entre sistemas interligados, como mostrado em 1.2.3. Ambos agem como eficiente suporte de tensão a regime permanente.

Quando se trata de garantir a estabilidade transitória, a situação muda bastante. Neste período da primeira oscilação do sistema, a tensão interna do compensador síncrono permanece praticamente inalterada, conservando o valor anterior ao distúrbio . [illegible] a tensão do barramento [illegible]

mas também não será mantida dentro de valores aceitáveis, pois o controle do síncrono ainda não atuou. Já o compensador estático tem condições de atuar neste período, podendo colocar toda sua capacidade de geração de reativo à disposição do sistema, o que contribuirá para garantir um bom nível de tensão transitória na barra controlada. Para visualizar melhor esta situação, suponha-se o exemplo da Figura 1.9:

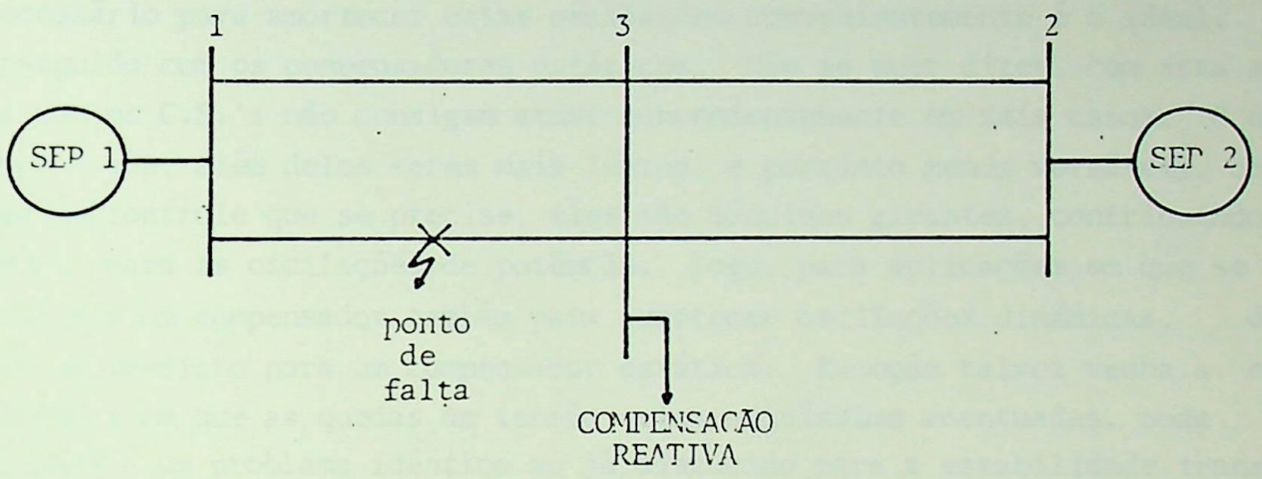


Figura 1.9 - Sistema para análise do Compensador Estático

Um curto-circuito trifásico é aplicado numa das linhas 1-3, e alguns ciclos depois esta linha é aberta em ambas as extremidades. Suponha-se que este sistema, sem suporte de tensão na barra 3, seja transitoriamente instável. Caso grande parte da geração encontre-se no SEP 1, pode-se dizer que a queda de tensão em 3 , mesmo instalando-se um C.E. nela, será bastante acentuada, talvez não sendo suficiente todos os capacitores do estático para garantir a estabilização. Por outro lado, instalando-se um síncrono ter-se-ia uma fonte de tensão na barra 3, o que certamente diminuiria a queda verificada com o estático, com sua atuação característica de elemento passivo. Entretanto, o compensador síncrono é uma máquina girante, com inércia própria, podendo ele mesmo sair de sincronismo em relação ao restante do sistema; isto já não ocorreria com o C.E.

Das rápidas, e até bastantes drásticas, considerações feitas acima vê-se que é muito relativa a aplicação de um C.E. ou C.S. para garantir a estabilidade transitória de um sistema. Tudo dependerá basicamente das condições de cada situação em específico. E, por tudo isto, pode-se concluir que, em tal caso, as soluções possíveis devem ser todas elas avaliadas e estudadas criteri-

mente pois, a princípio, não existe um compensador de uso mais indicado. Já no caso de compensação de estações terminais de elos de corrente contínua, pode-se dizer que é possível determinar o equipamento mais eficiente no período transitório. Como o controle do elo é extremamente rápido, fica claro que o C.E. é mais adequado.

Quando o sistema passa no período transitório mantendo seu sincronismo, mas se tornar dinamicamente instável, é possível indicar um compensador mais eficiente. Conforme abordado em 1.2.3., a instabilidade dinâmica é basicamente devida à falta de amortecimento das oscilações de potência. Sendo assim, um sistema de controle que tenha a capacidade de responder tão rápido quanto necessário para amortecer estas oscilações convenientemente é o ideal. E isto é conseguido com os compensadores estáticos. Não se quer dizer, com esta afirmativa, que os C.S.'s não consigam atuar convenientemente em tais casos. O que acontece é que, além deles serem mais lentos, e portanto menos versáteis, conforme o tipo de controle que se precise, eles são máquinas girantes, contribuindo, eles próprios, para as oscilações de potência. Logo, para aplicações em que se pretenda utilizar um compensador também para amortecer oscilações dinâmicas, deve-se partir de imediato para um compensador estático. Exceção talvez venha a existir em sistemas em que as quedas de tensão sejam muitíssimo acentuadas, onde então se chegará a um problema idêntico ao já discutido para a estabilidade transitória.

A ênfase dada aos compensadores estáticos como solução para problemas dinâmicos não deve encobrir o uso de medidas mais econômicas do que a instalação de um C.E., como é o caso da utilização de sinais adicionais adequados nos reguladores de tensão dos geradores do sistema. A avaliação deste tipo de solução deve ser feita antes de se pensar em instalar um C.E. que venha a ter como finalidade única estabilizar dinamicamente um sistema elétrico de potência.

Um outro ponto a ser ressaltado na presente comparação consiste na dependência que o compensador estático tem com relação ao nível de curto-circuito do seu ponto de instalação. Como ele é um equipamento composto somente de elementos passivos, sua atuação como regulador pode modificar-se bastante se houver uma mudança de configuração no sistema (emergência de uma importante linha de transmissão, por exemplo), que implique em drástica alteração do nível de curto de seu barramento. Esta influência será estudada em detalhe no capítulo 4 deste trabalho. Já o compensador síncrono, por ser um elemento ativo, sente menos este tipo de variação, atuando satisfatoriamente em qualquer circunstância.

O C.S. apresenta ainda uma interessante vantagem em relação ao C.E.: é sua capacidade de operar em sobrecarga para gerar reativo por um

determinado tempo. Esta característica é importante quando se tem uma aplicação em que a quantidade de injeção de reativo necessária para condições normais é menor do que aquela exigida em período transitório ou dinâmico. Isto faz com que o síncrono seja dimensionado com os limites nominais para atender ao regime permanente, e por sua própria capacidade de sobrecarga ele atenderá as solicitações transitórias e dinâmicas. Já para o C.E. não tem muito sentido falar de sobrecarga ou capacidade extra de geração ou absorção de reativo em regime transitório. Os mesmos elementos passivos que ele dispõe (reatores, válvulas de tiristores, etc.) para as situações transitórias, são os disponíveis para o regime permanente. Sendo assim, no caso acima o estático deverá ser dimensionado para a solicitação máxima, que ocorreria no período transitório, ficando por isto mesmo maior que o C.S. Nestas condições o C.E. poderia vir a ficar mais caro que o síncrono.

Para dar uma exata idéia de preço, estima-se que o custo total de um estático fica em cerca de 70% de um síncrono de mesmo porte. É claro que esta diferença varia de aplicação para aplicação, podendo vir mesmo a aumentar bastante. O fato é que o C.E. pode ter uma grande independência entre sua geração e absorção de reativo. E, dependendo do caso, isto poderá baratear ainda mais o estático, pois o síncrono não conta com esta facilidade. Por exemplo, se um determinado sistema precisar apenas absorver reativo de forma controlada não resta dúvidas que, em tal circunstância, o percentual dado acima reduzir-se-á bastante, tornando o C.E. ainda mais atrativo do ponto de vista econômico.

Aliado ao que já foi dito, existem ainda algumas importantes vantagens do C.E., como: a maior facilidade de expansão e modulação da entrada dos equipamentos (principalmente capacitores); ou a maior facilidade de manutenção, que pode ser feita sem tirar o C.E. totalmente de serviço. Isto implica numa maior confiabilidade do equipamento, fazendo com que ele tenha uma taxa de falha consideravelmente menor do que o compensador síncrono.

Por fim, vale montar um resumo das principais características de cada um, que podem constituir-se em vantagem ou não, dependendo do objetivo pretendido.

Principais características do Compensador Estático:

- É composto somente de elementos passivos, não contribuindo assim com o nível de curto-circuito do ponto de instação:

$$i_1(t) = \frac{V_m}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}} [\text{sen}(\omega t + 0 - \psi) - \text{sen}(0 + \psi) e^{-\beta t}] \quad (2.2)$$

onde,

$$\psi = \tan^{-1}(\omega L/R) \quad , \quad \text{e} \quad \beta = R/L$$

seja ainda, por questões de melhor compreensão, $R << L$ dando $\psi \simeq \Pi/2$ RAD e $\beta \simeq 0$. Isto faz com que $i_1(t)$ seja dada por:

$$i_1(t) = \frac{V_m}{\omega L} (1 - \cos\omega t) \quad (2.3) \ .$$

Superpondo a onda de tensão a esta onda de corrente tem-se a seguinte curva:

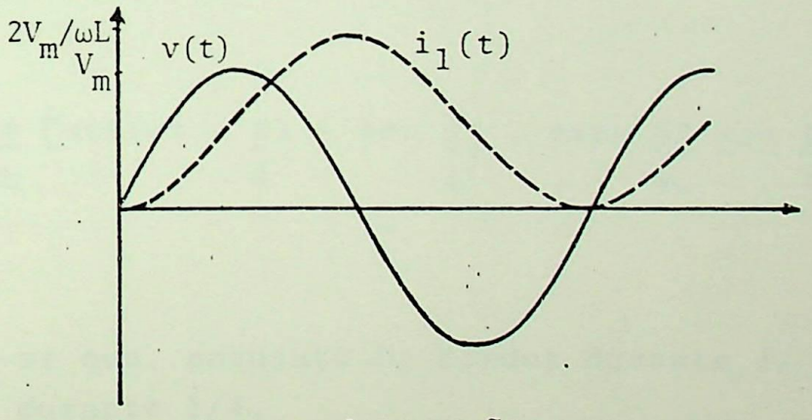


Figura 2.6 - Curvas de tensão e corrente para CH_1 fechando em $t = 0$ e $\Theta = 0$ RAD .

Como se vê, durante todo o ciclo de tensão a corrente será positiva, significando que somente D_1 conduzirá, mesmo sob condições de tensão invertida da fonte de alimentação. Isto ocorre porque não houve inversão de corrente para interromper seu modo de condução . Quando ocorre um zero, em $t = 2\Pi/\omega$ seg , o diodo já estará iniciando outro semiciclo de tensão onde ficará com polarização positiva e corrente positiva, o que significa continuar conduzindo.

Seja agora $\Theta = \Pi/4$ RAD. Neste caso a corrente em D_1 será dada por:

$$i_1(t) = \frac{V_m}{L} \operatorname{sen}(\omega t - \frac{\Pi}{4}) + \operatorname{sen}\frac{\Pi}{4} \quad , \text{ para } 0 \leq t \leq \frac{6\Pi}{4\omega} \text{ seg} \qquad (2.4)$$

que corresponde à seguinte curva:

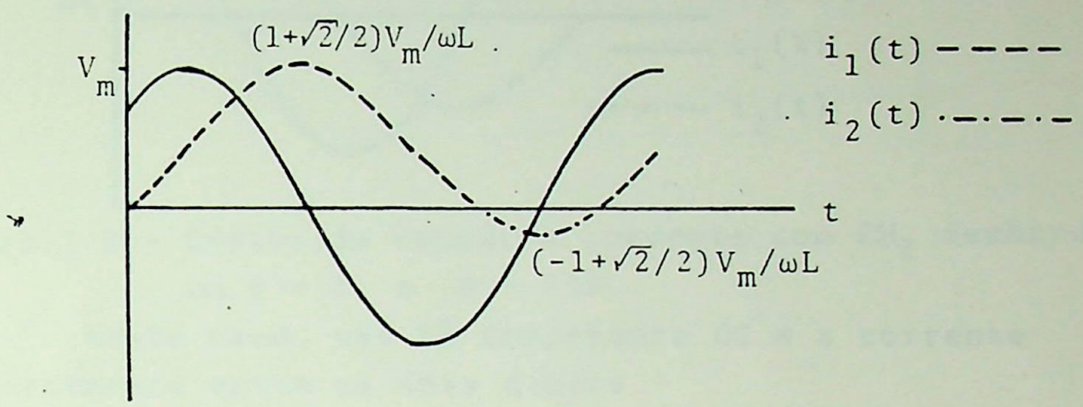


Figura 2.7 - Curvas de tensão e corrente para CH_1 fechando em t = 0 e $\Theta = \Pi/4$ RAD .

Como pode ser visto, neste caso haverá condução de D_2, sendo sua corrente dada pela equação:

$$i_2(t) = \frac{V_m}{\omega L}\left[\operatorname{sen}(\omega t - \frac{\Pi}{4}) - \operatorname{sen}\frac{\Pi}{4}\right] \quad , \text{ para } \frac{6\Pi}{4\omega} \leq t \leq \frac{8\Pi}{4\omega} \text{ seg} \qquad (2.5)$$

No entanto, vê-se que, enquanto D1 conduz durante 3/4 de ciclo, D_2 conduz somente durante 1/4.

Nos dois casos acima, tendo o chaveamento ocorrido antes de $\Pi/2$ RAD a corrente não se distribui equitativamente entre os dois diodos, o que provoca o surgimento de uma componente CC no sistema. Caso se houvesse considerado a resistência do reator, que realmente é bem menor que a indutância, mas não é nula, esta componente seria amortecida, conforme mostra (2.2). Entretanto, ela continuaria a existir, assumindo o mesmo valor inicial, sempre que se iniciasse a condução em um determinado ciclo.

Seja agora $\Theta = \Pi/2$. Neste caso ter-se-ia:

$$i_1(t) = \frac{V_m}{} \operatorname{sen} \omega t, \text{ para } 0 \leq t \leq \Pi \text{ seg} \qquad (2.6)$$

$$i_2(t) = \frac{V_m}{\omega L} \text{ sen } \omega t \text{ , para } \frac{\Pi}{\omega} \leq t \leq \frac{2\Pi}{\omega} \text{ seg} \quad (2.7)$$

Estas expressões oferecem como resultado a Figura 2.8.

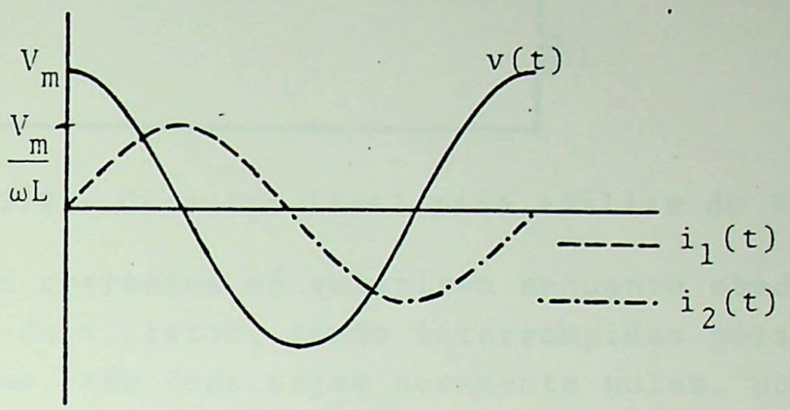


Figura 2.8 - Curvas de tensão e corrente com CH_1 fechando em $t = 0$ e $\theta = \Pi/2$

Neste caso, não há componente CC e a corrente se distribui uniformemente entre os dois diodos.

Os três exemplos acima, embora não tenham uma aplicação prática, servem para fazer-se uma comparação com um reator ligado em série a duas válvulas de tiristores em antiparalelo (Figura 2.1), tendo ângulos de disparo iguais a zero, 45 e 90 graus respectivamente, ou seja, o ângulo θ dos exemplos anteriores representa o ângulo de disparo (α) dos tiristores. Como o funcionamento de um compensador estático não deverá trazer distúrbios ao sistema, tais como injeção de corrente contínua, vê-se de imediato que o reator controlado por tiristores não deverá operar com ângulos de disparos menores que 90°. Caso isto acontecesse, o C.E. provocaria a circulação de corrente contínua no sistema, além de operar com uma válvula mais carregada que a outra.

Considerando a Figura 2.8 como a de um RCT funcionando com um ângulo de disparo de 90°, vê-se que ele operará de forma exatamente igual a um reator linear "shunt" convencional ligado ao sistema, não provocando a circulação de correntes harmônicas, componentes contínuas, ou qualquer outro tipo de distúrbio.

As fórmulas genéricas que dão as correntes dos tiristores são semelhantes àquelas dos diodos.

$$i_1(t) = \frac{V_m}{(R^2+\omega^2L^2)^{1/2}} \left[\text{sen}(\omega t-\psi) - \text{sen}(\alpha-\psi)\, e^{-\beta(t-\alpha/\omega)}\right], \text{para } t \geq \frac{\alpha}{\omega} \quad (2.8)$$

$$i_2(t) = \frac{V_m}{(R^2+\omega^2L^2)^{1/2}} \left[\text{sen}(\omega t-\psi) - \text{sen}(\alpha+\Pi-\psi)\, e^{-\beta\left(t-\frac{\alpha+\Pi}{\omega}\right)}\right], \text{para } t \geq \frac{\alpha+\Pi}{\omega} \quad (2.9)$$

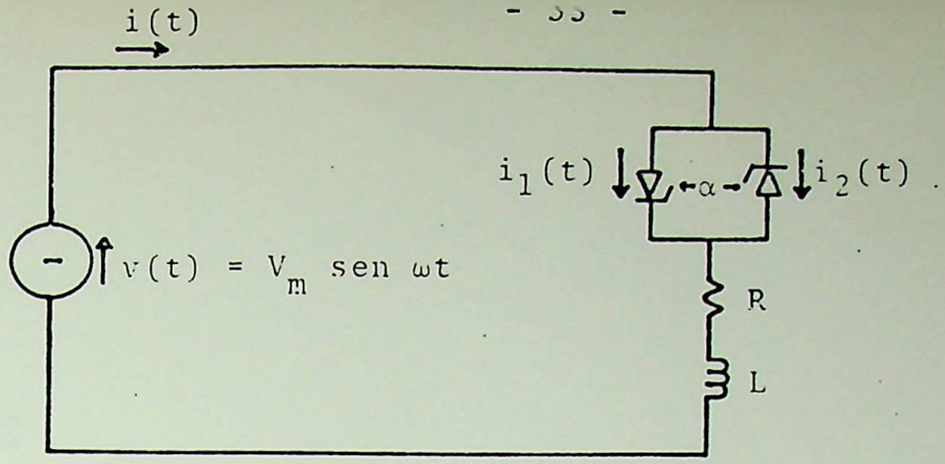


Figura 2.9 - Circuito ideal para análise do RCT

É claro que estas correntes só existirão enquanto obedecerem o sentido de condução do tiristor, sendo interrompidas pela própria característica do mesmo, tão logo sejam novamente nulas, pois aí se iniciaria um semiciclo de polaridade inversa, conforme o natural comportamento do indutor.

Como exemplo de funcionamento, suponham-se dois reatores, um sem resistência e outro com fator de qualidade igual a 25 (valor bem baixo em vista dos reais, a fim de destacar a pouca influência da resistência), operando com um ângulo de disparo $\alpha = 135^{o}$. Nestas condições tem-se, na Figura 2.10, as curvas de corrente para um semiciclo de condução da primeira válvula a operar . Analisando essa Figura, conclui-se que a influência da resistência é realmente pequena, provocando uma pequena distorção na onda de corrente que faz com que o período de condução seja menor do que no caso de resistência nula. No entanto, ela não altera a função básica deste tipo de C.E., que dá a variação da absorção de potência reativa pela modificação do ângulo de disparo dos tiristores.

Outra importante conclusão que se pode tirar da Figura 2.10 é que o RCT não introduz transitórios no sistema, como seria de se esperar, já que cada disparo dos tiristores é como se fosse uma nova energização. No entanto, o que se vê na curva acima é que esta energização não causa nenhum transitório de corrente.

Por outro lado, vê-se também que o RCT, quando opera com ângulo de disparo maior que 90º (seu ângulo mínimo, como já visto anteriormente), provocará o aparecimento de correntes harmônicas, pois sua curva de corrente, além de ser composta por semi-senoidais distorcidas, tem também espaços de tempo em que fica nula entre duas delas. Pode-se calcular, a partir das equações 2.8 e 2.9, as harmônicas geradas por esta unidade monofásica variável de um C.E. em função de seu ângulo de disparo. No entanto, normalmente estes equipamentos são conectados a sistemas trifásicos, adotando uma ligação em delta, que já elimina naturalmente a 3ª harmônica e suas múl

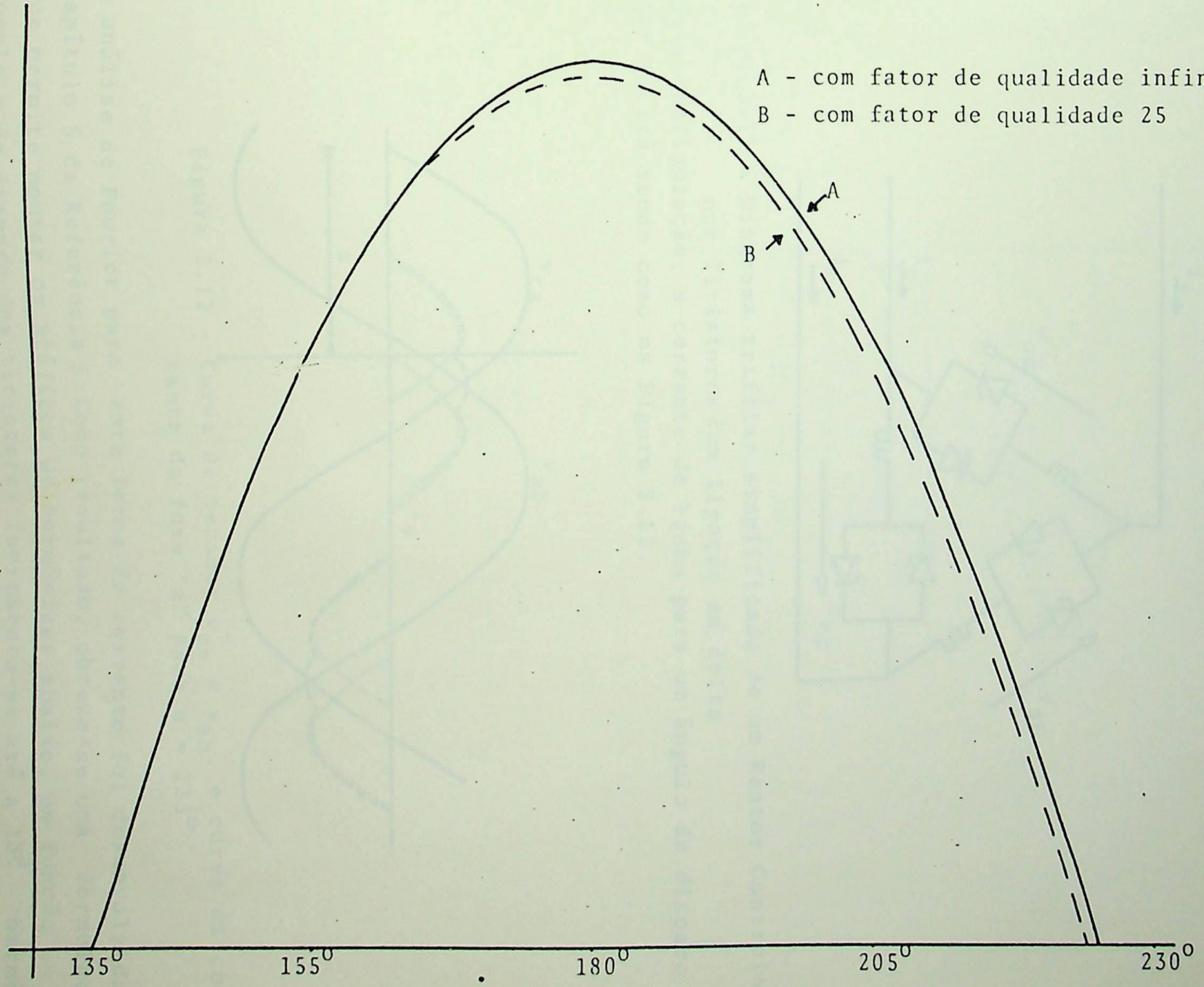


Figura 2.10 - Corrente em um RCT com ângulo de disparo $\alpha = 13$

tiplas. E é para esta situação que serão vistas as harmônicas injetadas pelo RCT.

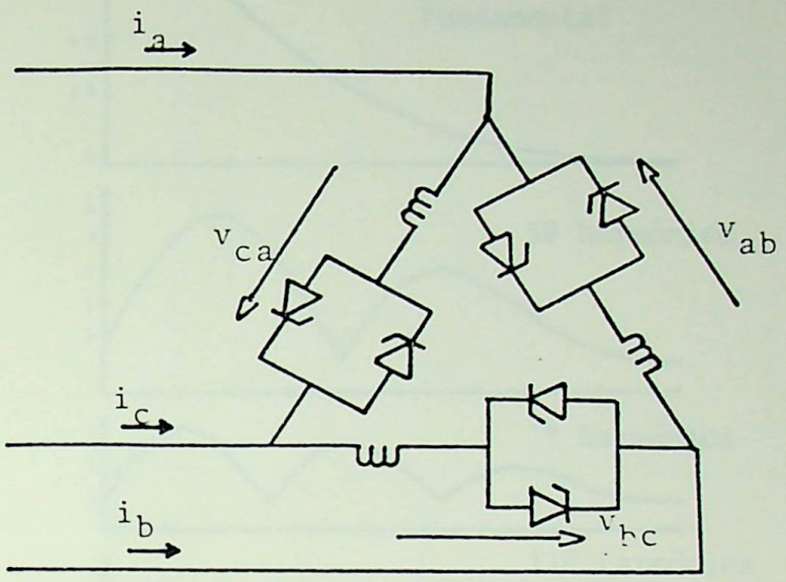


Figura 2.11 - Diagrama trifilar simplificado de um Reator Controlado por Tiristores com ligação em delta

Nesta configuração, a corrente de linha para um ângulo de disparo de 135º ficará sendo como na Figura 2.12.

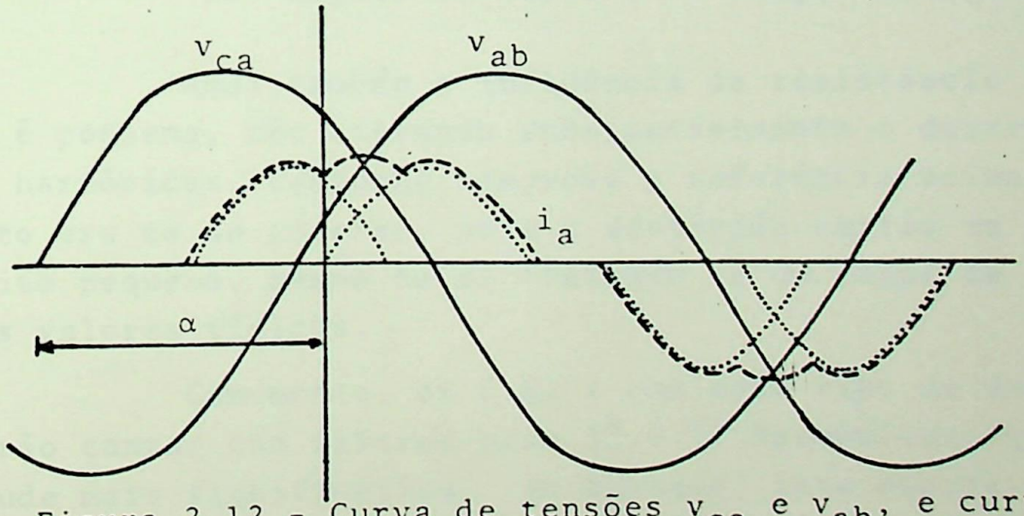


Figura 2.12 - Curva de tensões v_{ca} e v_{ab}, e curva da corrente da fase "a" para $\alpha = 135^{o}$

A análise de Fourier para esta forma de corrente foi desenvolvida no capítulo 5 da Referência 5. Como resultado, obteve-se uma formulação que permite montar os gráficos de harmônicas abaixo, em função do ângulo α de disparo dos tiristores (apresenta-se até a 13ª harmônica, pois são estas as mais significativas).

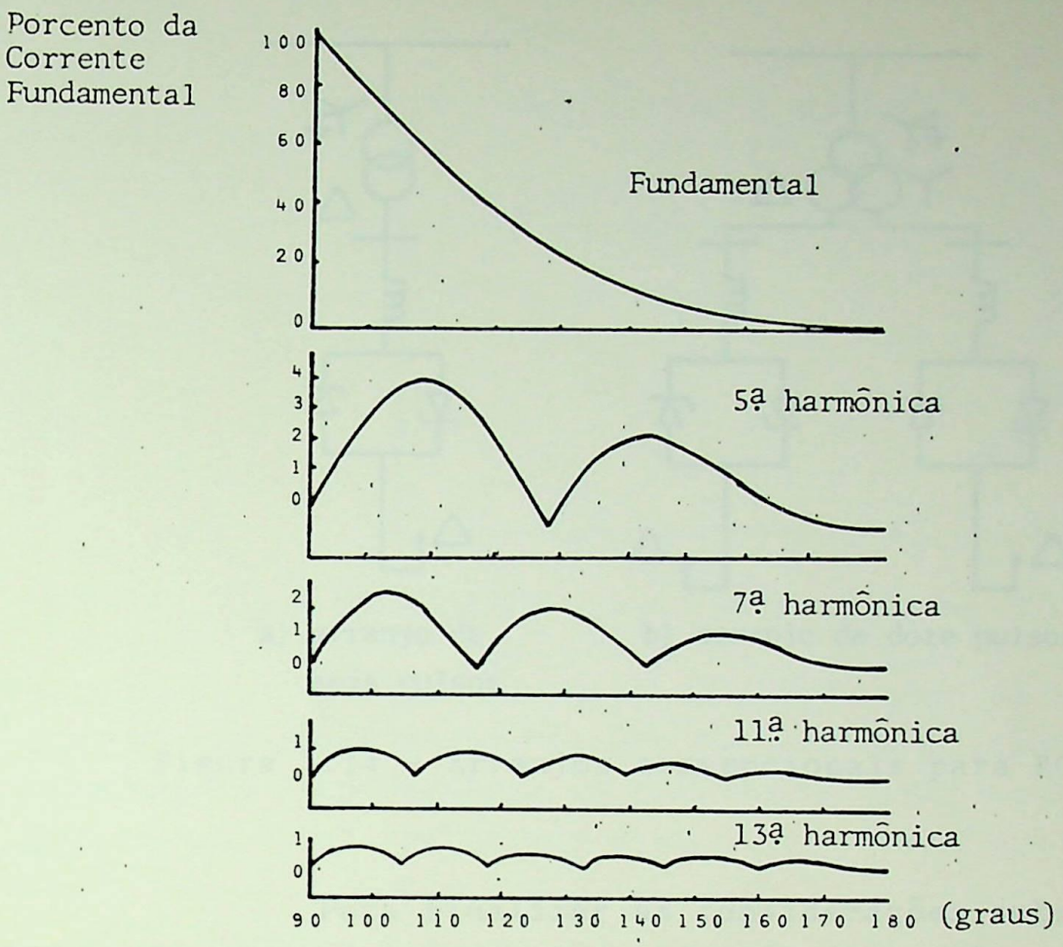
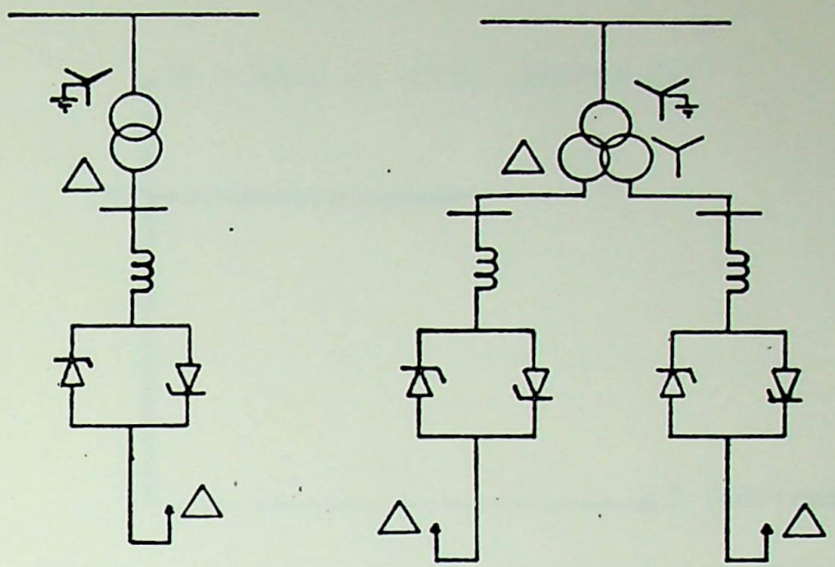


Figura 2.13 - Correntes harmônicas geradas por um RCT, trifásico, ligado em delta , em função do ângulo de disparo

Aqui também a influência da resistência inerente ao reator é pequena, não afetando substancialmente a distribuição e amplitude harmônicas, conforme comprova a referência acima mencionada. E isto era de se esperar, pois a distorção obtida na figura 2.10 é muito pequena, mesmo em se tratando de um fator de qualidade abaixo dos valores típicos.

Comumente, os C.E.'s com este tipo de unidade variável deverão contar com filtros para 5ª e 7ª harmônicas, que são as de amplitude mais significativa. No entanto, isto ocorre para um arranjo de 6 pulsos, que contém uma unidade das mostradas na Figura 2.11. Caso se utilize um arranjo de 12 pulsos — composto por duas unidades da Figura 2.11, conectadas a um transformador de três enrolamentos, tendo um enrolamento de baixa tensão em delta e outro em estrela isolada, tendo estrela aterrada no enrolamento de alta — a primeira harmônica a surgir será a 11ª, eliminando a necessidade de filtros na maioria das aplicações.



a) arranjo de seis pulsos

b) arranjo de doze pulsos

Figura 2.14 - Arranjos convencionais para RCT's

Para finalizar as considerações sobre harmônicas do RCT, vale notar que em qualquer das configurações da Figura 2.14 o compensador estático estará apto a exercer um controle de tensão trifásico, sendo que o controle por fase fica sensivelmente prejudicado pela ligação em delta dos reatores. Caso se necessite realmente que o C.E. tenha uma atuação monofásica, dever-se-á ligar cada fase do RCT a cada fase do sistema, o que implicará em se colocar também filtros para a 3ª harmônica e múltiplas subseqüentes, além das 5ª e 7ª harmônicas. É claro que, sendo assim, o C.E. terá um custo adicional considerável, mas poderá atuar convenientemente no sentido de eliminar possíveis desequilíbrios no sistema elétrico.

Tendo visto as formas de onda que caracterizam o funcionamento no tempo de um reator controlado por tiristor, pode-se agora partir para analisar o seu comportamento a 60 Hz, o que significa considerar apenas a componente fundamental da onda de corrente efetivamente injetada no sistema por este tipo de elemento estático variável. Por razões de clareza, o presente enfoque analisará o RCT sob três diferentes prismas, que cobrirão as diferentes etapas de funcionamento de um sistema elétrico de potência: desempenho em regime permanente, desempenho dinâmico e desempenho frente a curtos-circuitos.

Em regime permanente o RCT age como um sistema de regulação de tensão que tem como característica ideal de funciona

mento, a curva V x I de valores eficazes da Figura 2.15:

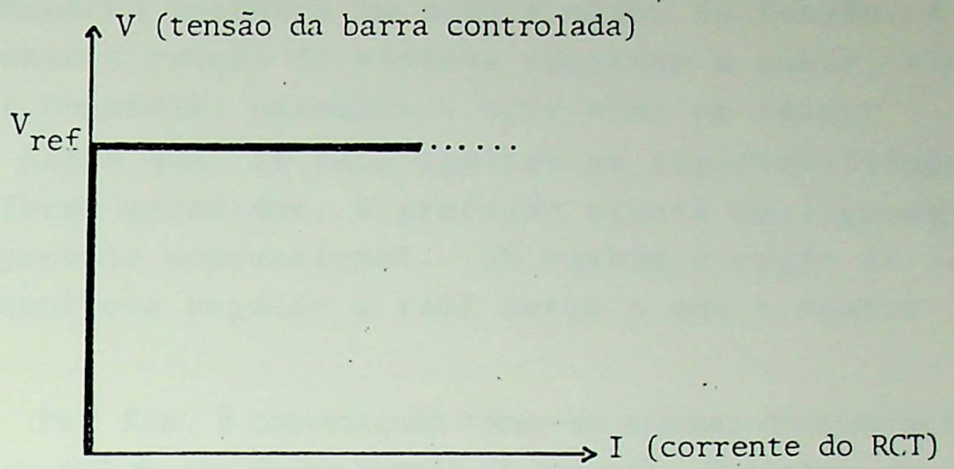


Figura 2.15 - Curva V x I (eficaz) de um RCT ideal

No entanto, este desempenho, assim como todo tipo de idealização, deverá sofrer uma série de restrições de caráter prático, que servirão para adaptá-lo ao sistema em que está conectado, além de levar em conta as próprias limitações dos materiais empregados em sua construção.

Em primeiro lugar, deve-se notar que o RCT não poderá operar com uma corrente (valor eficaz) tão próxima de zero quanto se deseje. Isto implicaria em aproximar de 180° o ângulo de disparo do tiristor, o que significaria iniciar o período de condução da válvula com uma tensão muito pequena. Entretanto, existe um valor mínimo de tensão que permite iniciar esta condução, pois o tiristor exige que a tensão imposta a ele seja de polaridade positiva e tenha condições de superar a barreira de potencial que naturalmente existe entre suas junções P - N, antes de iniciada a passagem da corrente. Sendo assim, a prática tem mostrado que não é efetivo disparar os tiristores de uma válvula de reator controlado por tiristores com ângulos maiores que 170°, e isto no caso da tensão do sistema estar acima do limite mínimo de regulação . Para valores de tensão mais baixos o maior ângulo de disparo recomendado é da ordem de 140°.

Vale ressaltar que, por se tratar de um reator controlado, o equipamento em enfoque não tem atuação efetiva na correção de tensões baixas, caso ele opere isoladamente. Desta forma, o fato dele não operar conduzindo pequenas parcelas de sua corrente nominal quase nada influirá na sua forma básica de controle.

Outro ponto óbvio que limita o modelo ideal é que

ele não pode absorver corrente indefinidamente. Quando o RCT atinge o seu ângulo de disparo mínimo (90°, como já explicado anteriormente), o reator já se encontra presente em todo o cilco de tensão. A partir deste instante, caso a tensão do sistema continue a subir, ele perde sua capacidade de controle, passando a agir como um reator "shunt" convencional. É claro que, se seus limites de suportabilidade a regime permanente forem excedidos, a proteção atuará desligando-o, como qualquer equipamento convencional. Há também a opção de seu próprio sistema de controle regular a real carga a que o reator será submetido.

Por fim, é conveniente tecer-se algumas considerações sobre a ação de regulação do RCT na sua faixa normal de operação. O sistema de controle com o qual ele é equipado tem condições de fazer com que a inclinação de sua curva V X I assuma qualquer valor, inclusive zero. No entanto, há que se levar em conta que esta inclinação, que é comumente chamada de estatismo, quando assume um valor nulo exigirá bastante do RCT, fazendo com que responda a pequenas variações no sistema com excursões demasiadamente grande dentro de sua faixa de operação. Além disto, o estatismo é importante para compatibilizar a atuação do RCT com outras fontes de controle de tensão no sistema, de forma a que cada uma venha a responder de uma forma pré-determinada aos distúrbios e variações de carga mais críticos. Desta forma, é normal que o estatismo seja fixado num valor da ordem de 2 a 6%, atendendo às conveniências de ajuste do C.E. dentro do sistema.

Unindo agora as observações de caráter prático sobre a curva ideal do RCT, obtém-se sua curva real de desempenho a regime permanente.

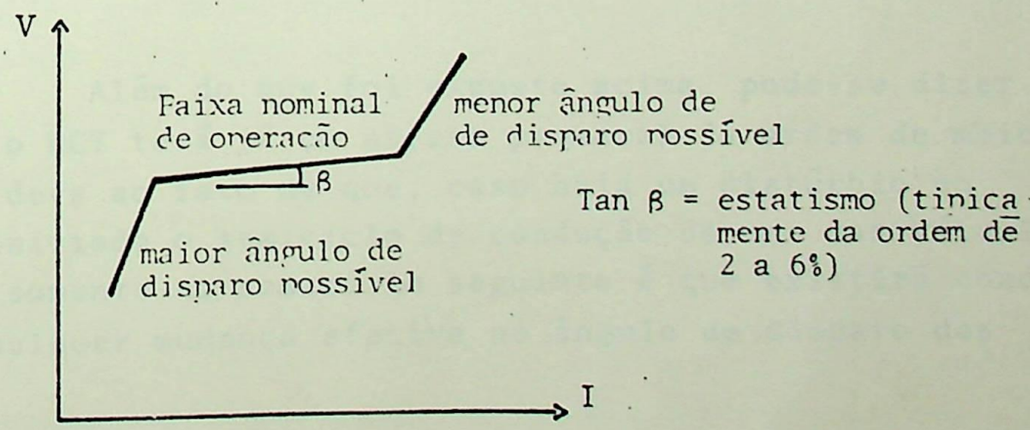


Figura 2.16 - Curva V x I (eficaz) de um RCT real

Figura 2.16 - Curva V x I (eficaz) de um RCT real.

No que concerne ao desempenho dinâmico do reator controlado por tiristores, serão feitas aqui somente as principais anotações básicas sobre o assunto, não entrando na parte específica de modelos, pois este é o tema principal do presente trabalho e será tratado detalhadamente a partir do Capítulo 5.

Como se sabe, a resposta de um tiristor a um determinado comando eletrônico é extremamente rápida, já que, em se tratando de um elemento de estado sólido, ele não apresenta retardos de tempo de ordem mecânica, e mesmo suas constantes de tempo elétricas são desprezíveis. Desta forma, desde que se polarize corretamente seu gatilho de disparo e seus polos de condução, a corrente passará a fluir quase que instantaneamente. Tendo em mente estas considerações, vê-se imediatamente que qualquer retardo de tempo na resposta de um RCT dependerá, quase que exclusivamente, de seus sistemas de medição e controle.

O sistema de medição, de fato, apresenta retardo, devido às indutâncias e resistências próprias dos TC's e TP's que o compõem, e também devido aos filtros eventualmente necessários. É a soma destes com o retardo programado no sistema de controle que fornece o tempo total de resposta da unidade. Vale ressaltar que a constante de tempo dos sistemas de medição e disparo, quando somadas, são de cerca de um ciclo. Sendo assim, o sistema de controle deve ser tal que, para grandes variações, não introduza atrasos que venham a comprometer os desempenhos requeridos para estes casos. Já em variações menores, o controle deverá ter um maior retardo, a fim de evitar oscilações que possam ser amplificadas pela rapidez de resposta. É normalmente assim que todos os controles de RCT são concebidos.

Além do que foi exposto acima, pode-se dizer que, de princípio, o RCT terá já um atraso provável da ordem de meio ciclo. Isto se deve ao fato de que, caso haja um distúrbio no sistema logo após iniciado o semiciclo de condução de uma das válvulas em antiparalelo, somente no semiciclo seguinte é que existirá condições de se fazer qualquer mudança efetiva no ângulo de disparo dos tiristores.

Quanto aos demais números, o sistema de medição e proteção é responsável por um atraso da ordem de 3/4 a 1 ciclo. Sendo assim, em média, os reatores controlados por tiristores atuarão num tempo mínimo não menor do que 15 ou 20 ms. No entanto, este número ainda é por demais rápido, podendo causar problemas quando acoplado [illegible] sistema elétrico. Por esta razão os RCT's já

instalados e em operação acrescentam ao seu sistema de controle um determinado retardo, que dá um tempo de resposta total da ordem de 40 a 50 ms, exceto frente a grandes distúrbios, quando, como já foi dito, o sistema de controle quase não introduzirá retardos.

Os tempos acima apresentados são, sem dúvida, os mais rápidos existentes para os sistemas de controle de tensão até hoje utilizados. E vale notar que tal velocidade permite até mesmo que os C.E.'s equipados com reatores controlados por tiristores possam influir no comportamento transitório de um sistema elétrico , além, é lógico, de contribuir para o amortecimento das oscilações de potência no período dinâmico. Com estas considerações, pode-se formar uma primeira visão do desempenho dinâmico de um RCT.

Para condições de curto-circuito, como já foi dito anteriormente, o C.E., seja ele qual for, age como um elemento passivo, não contribuindo em nada para a corrente do ponto em falta. Mas, mesmo assim, fica a dúvida de se o RCT, sendo um equipamento de controle extremamente rápido, terá alguma influência durante a falta e logo após sua eliminação — o mais provável que ocorra nesta situação é que ele se desligue, pois a tensão do sistema cairá, sendo natural que o reator seja retirado do sistema numa tentativa do sistema de controle de elevar a tensão. Esta é a regra geral, mas existem várias exceções. Alguns controles de RCT são desenvolvidos para, no caso de queda súbita de tensão, abandonar o controle trifásico e passar a controlar a maior tensão das três fases. Como no caso de falta monofásica é possível que se verifique sobretensão nas fases sãs, pode acontecer do RCT passar a operar no seu extremo de máxima absorção de reativo. E como esta, outras opções existem ou podem ser projetadas a fim de atender a certos requisitos específicos do sistema a que o C.E. será conectado.

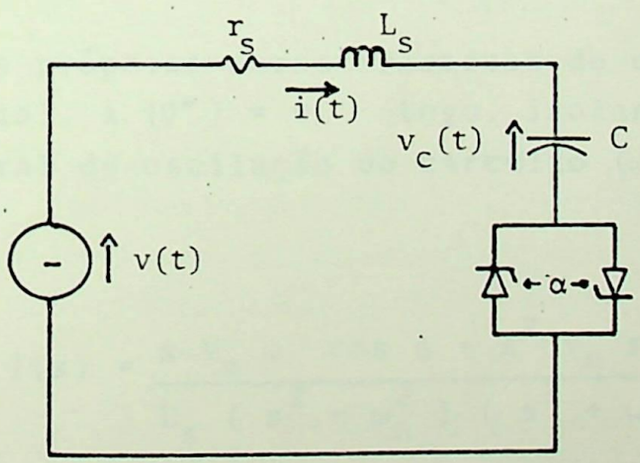
Para o funcionamento logo após o curto-circuito as opções oferecidas por um reator controlado por tiristores são também muito variadas, tudo dependendo de como estão dotados seus sistemas de controle. A título de exemplo, serão citados dois casos do sistema elétrico brasileiro. O C.E. a ser instalado em Manaus-AM disporá de um sistema de memória que, tão logo o curto-circuito seja eliminado, levará os componentes controláveis do equipamento para o ponto de funcionamento em que se encontravam no momento imediatamente anterior ao defeito. Já o compensador estático de Cuiabá-MT, contará com um sistema que, tão logo se verifique uma queda acentuada de tensão, colocará o compensador funcionando com um valor de admitância pré-determinado , e este será o valor inicial após o curto-circuito.

Para finalizar, pode-se dizer que o RCT é um equipamento que permite uma grande versatilidade de operação, dependendo essencialmente das características impressas a seu sistema de controle para desempenhar um papel adequado dentro de um sistema elétrico de potência.

2.1.2 - Capacitor Chaveado por Tiristores (CCT)

O capacitor chaveado por tiristores é, por ser chaveado e não controlado, o componente variável de um C.E. que exerce um controle discreto, dependendo do número de unidades chaveadas a maior ou menor proximidade deste com um sistema de controle contínuo. Deve-se questionar neste momento se realmente só o chaveamento pode ser aplicado aos capacitores e não o controle contínuo, como nos reatores. Para responder a esta pergunta faz-se necessário estudar o comportamento deste equipamento de controle em maiores detalhes.

Como foi feito para o RCT, far-se-á, agora, a análise das equações que regem o comportamento do capacitor chaveado por tiristores frente ao seu sistema elétrico. Para fins de simplicidade, o sistema a ser desenvolvido será monofásico e terá a configuração da Figura 2.17.



onde,
r_s = resistência equivalente do sistema
L_s = indutância equivalente do sistema
C = capacitância do CCT

Figura 2.17 - Sistema elétrico ideal, para análise de funcionamento de um CCT

Seja a fonte de tensão $v(t) = V_m \operatorname{sen} \omega t$, e os tiristores sendo disparados em α. Isto é equivalente a se ter $v(t) = V_m \operatorname{sen}(\omega t + \alpha)$ disparando os tiristores no instante zero. Isto posto, tem-se a se

guinte equação no tempo para o circuito enfocado:

$$V_m \operatorname{sen}(\omega t + \alpha) = r_s\, i(t) + L_s \frac{d\, i(t)}{d\, t} + \frac{1}{C} \int i(t)\, dt \qquad (2.10)$$

Para diminuir a complexidade das equações no desenvolvimento a seguir, pode-se considerar r_s como nula. No entanto, não deverá ser esquecido que seu efeito principal será o de atenuar as oscilações provenientes dos modos naturais da composição entre reatores e capacitores. Desta forma, 2.10 se transforma em:

$$V_m \operatorname{sen}(\omega t + \alpha) = L_s \frac{d\, i(t)}{d\, t} + \frac{1}{C} \int i(t)\, dt \qquad (2.11)$$

Passando para o domínio da freqüência,

$$\frac{V_m\, \omega \cos \alpha}{s^2 + \omega^2} + \frac{s\, V_m \operatorname{sen} \alpha}{s^2 + \omega^2} = L_s \{ s\, I(s) - i(0^+) \} + \frac{1}{s\, C}\, I(s) + \frac{v_c\, (0^+)}{s} \qquad (2.12)$$

Pelas próprias características do circuito (existência de uma indutância), $i\,(0^+) = 0$. Logo, isolando I(s) e definindo a freqüência natural de oscilação do circuito (ω_n) como, $\omega_n^2 = 1/L_s C$, obtém-se:

$$I(s) = \frac{s\, V_m\, \omega \cos \alpha + s^2\, V_m \operatorname{sen} \alpha}{L_s\, (s^2 + \omega_n^2)\, (s^2 + \omega^2)} - \frac{v_c\, (0^+)}{L_s (s^2 + \omega_n^2)} \qquad (2.13)$$

voltando para o domínio do tempo chega-se a:

$$i(t) = \frac{V_m\ \omega\ \cos\ \alpha}{L_s(\omega_n^2 - \omega^2)} \{\cos\ \omega t - \cos\ \omega_n t\} - \frac{V_m\ \ \text{sen}\ \alpha}{L_s(\omega_n^2 - \omega^2)} \{\omega\ \text{sen}\ \omega t -$$

$$- \omega_n\ \text{sen}\ \omega_n t\} - \frac{v_c\ (0^+)}{L_s\ \omega_n}\ \text{sen}\ \omega_n t \qquad (2.14)$$

Seja ainda,

$$n = \sqrt{\frac{1/\omega C}{\omega L_s}} = \frac{\omega_n}{\omega} \qquad (2.15)$$

$$i_m = \frac{V_m}{\frac{1}{\omega\ C} - \omega L_s} = \frac{V_m}{1/\omega C}\ \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \qquad (2.16)$$

Rearranjando 2.14 a partir de 2.15 e 2.16 , obtém-se finalmente:

$$i(t) = i_m\ \cos(\omega t + \alpha) - \frac{n}{1/\omega C} \{v_c(0^+) - V_m\ \frac{n^2}{n^2 - 1}\ \text{sen}\alpha\}\ \text{sen}\omega_n t -$$

$$- i_m\ \cos\ \alpha\ \cos\ \omega_n t \qquad (2.17)$$

A partir da equação acima vê-se que o chaveamento dos capacitores de um CCT pode provocar transitórios de corrente à freqüência ω_n. No entanto, além do fato de nos sistemas reais existirem resistências que amortecerão as oscilações em ω_n, se o chaveamento for feito sob certas condições, estas oscilações não existirão, obtendo-se uma corrente i(t), no semiciclo de condução de cada tiristor, somente com a componente fundamental em ω (freqüência industrial).

As condições acima referidas, tiradas por observação direta da equação 2.17, são:

$$\alpha = \begin{cases} 90^0 - \text{valvúla 1} \\ 270^0 - \text{válvula 2} \end{cases} \quad ; \quad v_c(0^+) = \begin{cases} \frac{V_m/\omega C}{1/\omega C - \omega L_s} - \text{válvula 1} \\ \frac{-V_m/\omega C}{1/\omega C - \omega L_s} - \text{válvula 2} \end{cases} \qquad (2.18)$$

Estas condições parecem ser dificilmente alcançadas, mas isto é um engano, pois em operação normal de um CCT, como se mostrará a seguir, estas condições são as contidas em cada chaveamento.

Como se sabe, a corrente num capacitor excitado por uma fonte de tensão senoidal, em regime permanente, encontra-se 90^{o} adiantada em relação à tensão, conforme a Figura 2.18.

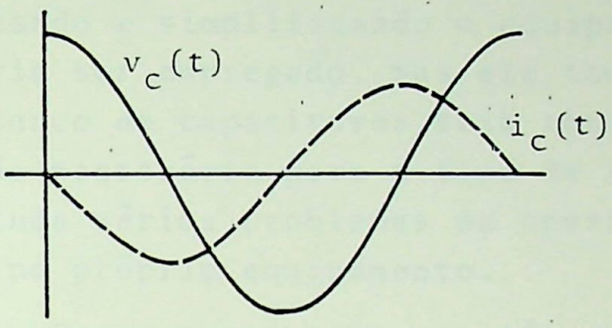


Figura 2.18 - Tensão e corrente em um capacitor

Assim sendo, quando a corrente estiver passando por um zero, a tensão estará em um de seus picos. Ora, a corrente estando no zero significa, para um CCT, que uma válvula estará encerrando seu semiciclo de condução. E, se neste mesmo instante a outra estiver pronta a conduzir, ela o fará. Isto mostra que as válvulas deverão ser disparadas com um ângulo de 90^{o}, o que permitirá que o capacitor fique todo o tempo conectado ao sistema. E assim, tem-se satisfeita a primeira condição de 2.18. A segunda condição pode ser tirada da relação tensão máxima X corrente máxima em um capacitor, e do fato dos picos de tensão ocorrerem quando a corrente é nula.

$$v_{c\ max} = i_{c\ max} \cdot 1/\omega C \qquad (2.19)$$

Quando $i_{c\ max}$ é relacionada com o circuito da Figura 2.17 constata-se que ela fica sendo igual a i_m. Logo,

$$v_{c\ max} = i_m \cdot 1/\omega C = V_m \cdot \frac{1/\omega C}{\frac{1}{\omega C} - \omega L_s} \qquad (2.20)$$

O que vem exatamente a satisfazer a segunda condição de não se gerar transitórios de corrente na freqüência natural de oscilação do conjunto capacitância do CCT — indutância do sistema.

E como os transitórios obtidos no chaveamento dos capacitores fora das condições acima, desde que repetidos a cada ciclo, podem ser extremamente prejudiciais tanto ao equipamento quanto ao sistema, só se utiliza capacitores chaveados por tiristores, e não controlados. Neste ponto, surge então a dúvida, de por que não se utiliza uma válvula de diodos em paralelo com uma válvula de tiristores, barateando e simplificando o equipamento. Na verdade, este arranjo poderia ser empregado, mas ele tem o inconveniente de não permitir que o banco de capacitores seja totalmente desconectado do sistema, condição necessária para o tipo de aplicação ora enfocada. Isto causaria ainda sérios problemas na operação de um sistema elétrico, bem como no próprio equipamento.

Outro ponto a se questionar é que, até agora, falou-se somente do CCT já operando. Mas, quando ele for ser energizado, apresentando $v_c(0^+) = 0$, dever-se-á aceitar um transitório de corrente que envolve, obrigatoriamente, uma componente à freqüência natural de oscilação das capacitâncias e reatâncias do sistema. Para minimizar o efeito desta componente em ω_n, o ângulo de disparo do tiristor que irá conduzir deverá ser de 0^o. E, pela própria influência dos amortecimentos dos sistemas elétricos, 1/4 de ciclo após esta energização a tensão e corrente do capacitor já estarão na freqüência industrial, podendo disparar-se a outra válvula já com ângulo de 90^o ou 270^o, como mostra a Figura 2.19(a), na página seguinte.

Pode acontecer ainda que o sistema apresente uma súbita variação de tensão, não permitindo que as condições de 2.18 sejam satisfeitas simultaneamente. Neste caso, fica-se com a opção de manter o ângulo de disparo fixo em 90^o, ou disparar o tiristor quando a diferença entre a tensão armazenada no capacitor e a tensão do sistema sobre os tiristores for nula. Segundo os resultados apresentados na Referência 6 , Capítulo 4, é mais provável que os menores transitórios de corrente se verifiquem disparando-se a válvula que deverá conduzir no instante em que a tensão nos seus terminais seja zero. E é esta a solução adotada na prática, conforme pode comprovar a Referência 7 . Contudo, isto só será possível quando a nova tensão de pico do sistema for maior que a tensão armazenada no capacitor. Quando há uma queda de tensão, o melhor caso possível se dá com o disparo dos tiristores a 90^o. Ambas as ocorrên

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

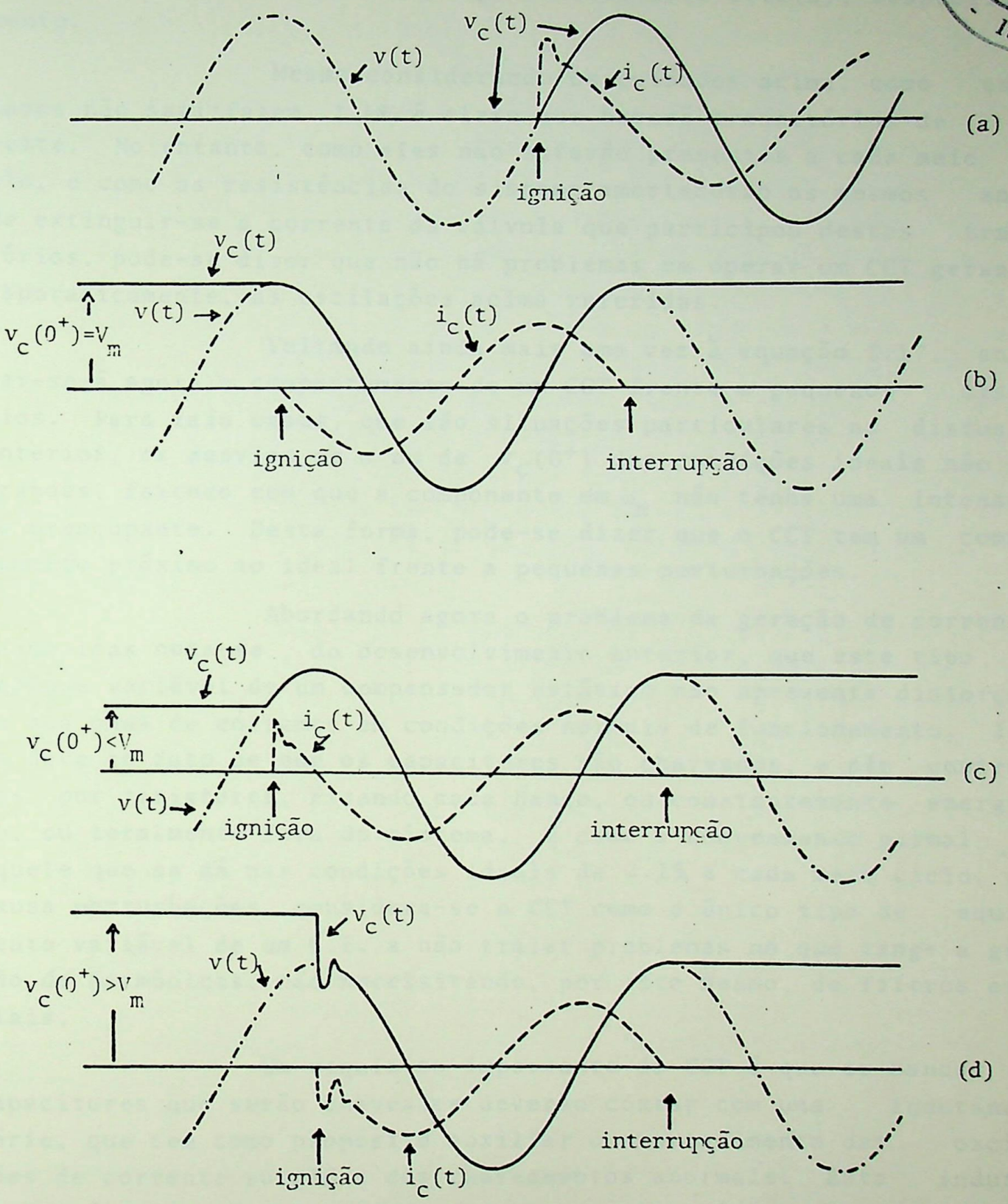


Figura 2.19 - Comportamento do CCT em diversas situações:
(a) energização ;
(b) regime permanente ;
(c) aumento de tensão no sistema ;
(d) diminuição de tensão no sistema.

cias acima são mostradas nas Figuras 2.19(c) e 2.19(d), respectivamente.

Mesmo considerando os cuidados acima, como estes casos não satisfazem 2.18, é claro que haverá transitórios de corrente. No entanto, como eles não estarão presentes a cada meio ciclo, e como as resistências do sistema amortecerão os mesmos antes de extinguir-se a corrente da válvula que participou destes transitórios, pode-se dizer que não há problemas em operar um CCT gerando, esporadicamente, as oscilações acima referidas.

Voltando ainda mais uma vez à equação 2.17, analisar-se-á agora o comportamento de um CCT frente a pequenos distúrbios. Para tais casos, que são situações particulares na discussão anterior, os desvios de α ou de $v_c(0^+)$ das condições ideais não são grandes, fazendo com que a componente em ω_n não tenha uma intensidade preocupante. Desta forma, pode-se dizer que o CCT tem um comportamento próximo ao ideal frente a pequenas perturbações.

Abordando agora o problema de geração de correntes harmônicas nota-se , do desenvolvimento anterior, que este tipo de unidade variável de um compensador estático não apresenta distorções na sua onda de corrente em condições normais de funcionamento. Isto se deve ao fato de que os capacitores são chaveados, e não controlados por tiristores, ficando cada banco, ou constantemente energizado, ou totalmente fora do sistema. E como o chaveamento normal , aquele que se dá nas condições ideais de 2.18, a cada meio ciclo, não causa perturbações, considera-se o CCT como o único tipo de equipamento variável de um C.E. a não trazer problemas no que tange a geração de harmônicas, não necessitando, por isto mesmo, de filtros especiais.

Um requisito importante do CCT é que os bancos de capacitores que serão chaveados deverão contar com uma indutância série, que tem como propósito auxiliar o amortecimento das oscilações de corrente surgidas dos chaveamentos anormais. Esta indutância será calculada, para cada diferente aplicação, com o intuito de adequar o valor de "n" da equação 2.17 de forma a proporcionar os menores níveis de distorção possíveis na faixa de variação normal no sistema. Sendo assim, a indutância "Ls" a ser considerada em 2.15 vem da soma da indutância própria do sistema com a indutância série do banco de capacitores chaveados por tiristores.

Em termos práticos, considera-se que um CCT terá

tas, ou em elevação, não há com que se preocupar, pois o normal é que os capacitores sejam desligados. E isto se consegue sem maiores problemas, simplesmente deixando de enviar sinal ao gatilho dos tiristores, o que fará com que os bancos deixem de operar tão logo a corrente passe por um zero, quando uma das válvulas deixará de conduzir e a outra não terá tensão no gatilho que lhe permita iniciar a condução. Mas, quando a tensão do sistema começa a baixar, os capacitores se fazem necessários, sendo mais uma vez chamados a atuar. Sendo assim, caso os capacitores não tenham ficado fora de operação por muito tempo, é provável que a tensão do mesmo seja algo maior que a do sistema, não chegando, entretanto, a obter-se relações $v_c(0^+)/V_m$ maiores que 1.1p.u.E como nestes casos a solução é disparar com $\alpha = 90^o$, é conveniente que o valor de "n" fique na faixa de 3 a 6, o que permitirá que a componente à freqüência natural chegue no máximo a 50% da magnitude da componente a freqüência industrial, e isto nos primeiros milésimos de segundo, antes do amortecimento do sistema atuar convenientemente.

Tendo "n" na faixa acima indicada, garantir-se-á também que as oscilações não serão grandes, tanto para a energização inicial dos capacitores, quanto no caso deles terem a sua tensão remanescente já bem abaixo da tensão do sistema, desde que se utilize as formas de chaveamento já indicadas anteriormente. Neste ponto, convém destacar que, mesmo deixando um banco de capacitores carregado, com o tempo ele irá perdendo energia, pois suas próprias resistências internas permitirão esta fuga de carga.

Outro ponto importante na escolha da indutância que ficará em série com o capacitor, é evitar a ressonância do CCT com as correntes harmônicas eventualmente circulantes no sistema a que ele será conectado. E isto pode ser conseguido a partir de uma escolha adequada do valor da mesma.

Com as considerações acima, pode-se dizer que os principais aspectos básicos do funcionamento de um capacitor chaveado por tiristores monofásicos foram vistos. No entanto, ele normalmente funcionará em sistemas trifásicos. Mas quanto a isto, não há maiores problemas, pois, como ele funcionará somente em duas posições, ligado ou desligado, a análise monofásica pode ser extendida à de um banco de capacitores convencional, o que não modifica em nada as conclusões anteriores.

Partindo para a análise do comportamento à freqüência fundamental, o enfoque inicial ficará com o desempenho a regime

permanente. Como o CCT é um elemento que opera com quantidades discretas de compensação reativa, é lógico que ele não será capaz de exercer uma ação contínua de controle de tensão. Se este tipo de elemento variável for o único de um sistema de compensação estática, fica claro que o controle a ser exercido limitar-se-á a manter a tensão do barramento controlado dentro de uma determinada faixa. Se a tensão estiver atingindo seu limite inferior, e supondo que a modulação do CCT está convenientemente adequada às naturais limitações do sistema elétrico, assunto que será tratado em detalhe no Capítulo 4, um novo banco de capacitores será chaveado ao sistema através de seus tiristores. Isto provocará uma imediata elevação de tensão, não devendo, contudo, chegar a ultrapassar o limite máximo permitido para o barramento controlado. No caso oposto verificar-se-á o desligamento de uma unidade.

Para a explicacão acima, ficou explícita a idéia de que não se exige de tal C.E. uma ação de controle contínua. Existem, entretanto, situações em que além de se necessitar somente a injeção de reativo no sistema, se pede que o C.E. exerça um controle praticamente contínuo. Neste caso, poder-se-ia pensar em diminuir à potência das unidades chaveadas, aumentando, conseqüentemente, o número das mesmas, até um ponto em que o chaveamento de cada uma delas provoque uma alteração tão pequena na tensão do sistema que se possa considerar como contínua a ação de controle do C.E., mas isto sairia extremamente caro. Para esta situação a Referência 8 sugere um procedimento algo diferente, mas que pode minimizar sobremaneira o número de unidades chaveadas e permanecer com as características de regulação desejada. A idéia é, determinada a potência máxima que pode ser chaveada sem alterar a característica de continuidade requerida, fazer com que a modulação dos bancos chaveados sigam uma progressão binária desta unidade mínima, de forma que a soma de todos os bancos dê o máximo de reativo desejado. Por exemplo, caso se queira um C.E. de 0 a 60 MVAr, cuja variação máxima seja de 2 MVAr, pode-se instalar bancos de 2, 4, 8, 16 e 32 MVAr. Com isso, consegue-se a variação em passos de 2 MVAr, como desejado, através da combinação adequada destes bancos. O sistema de controle deste tipo de CCT é mais complexo que o convencional, mas pode ser obtido sem grandes esforços adicionais.

Deve-se acrescentar ainda que o CCT é mais comumente usado em conjunto com outras unidades de impedância variável de um C.E., como será visto no Capítulo 5. Desta forma, não é sempre que o CCT agirá conforme acima, pois seu controle poderá estar

ção estática como um todo.

As considerações acima cobrem as respostas do CCT em regime permanente, podendo compreender pequenas e lentas variações no sistema, devidas às naturais variações das cargas. Já sua resposta a maiores e mais bruscas mudanças de tensão, que corresponde à característica dinâmica, é substancialmente diferente do que foi dito para o regime permanente. Aqui, um sistema de medição e controle, que é semelhante ao descrito para o RCT, compara a tensão controlada com a de referência, e, conforme a magnitude do sinal de erro, o comportamento do compensador seguirá uma estratégia de controle ditada pelas características do sistema elétrico a que está conectado. Existem situações em que, apesar da tensão baixar bastante, a atitude mais recomendável é interromper os pulsos de disparo para os tiristores, evitando possíveis sobretensões caso haja uma rejeição de carga após a brusca queda de tensão. Para elevações instantâneas de tensão os pulsos são automaticamente interrompidos, desconectando todos os bancos de capacitores em, no máximo, 25 milisegundos após o início e detecção do distúrbio, já considerando os retardos de medição e disparo. Por esta rapidez, o CCT poderá influir bastante já no período transitório. Mas, como normalmente nestas condições ele é desligado, sua atuação fica mais restrita ao período dinâmico, como se verá a seguir.

Passados os instantes iniciais das grandes perturbações, onde os controles convencionais de um CCT são desprezados em favor de soluções pré-estabelecidas, quase que instantâneas, que procurem manter a integridade dos equipamentos, o CCT pode voltar a assumir um importante papel no amortecimento das oscilações dinâmicas. Como ele tem a capacidade de energizar ou desenergizar rapidamente grandes quantidades de capacitores, é possível que ele consiga manter a tensão de seu barramento controlado dentro de estreitos limites de variação, garantindo uma maior capacidade de transmissão de potência entre sistemas de geração interligados. Um exemplo deste tipo de aplicação pode ser encontrado na Referência 8.

E para finalizar estas primeiras considerações específicas sobre os capacitores chaveados por tiristores, ver-se-á seu funcionamento frente a um curto-circuito. Ora, como neste caso há uma brusca queda de tensão em pelo menos uma fase, ele entrará naquelas condições especiais em que o sistema de controle normal deixa de atuar, vindo a valerem as instruções especiais que cada aplicação exija. E, pelo que já foi dito, em tais casos o CCT é normalmente

rante uma falta. Além do mais, mesmo que ele não fosse desconectado, não haveria qualquer contribuição de sua parte por se tratar de um elemento passivo.

Resumindo as principais características dos capacitores controlados por tiristores, quando estes operam isoladamente, pode-se dizer que:

- No regime permanente eles não apresentam condições de exercer controle contínuo de tensão, pois trabalham com chaveamento de unidades discretas de capacitores;
- Quando operando normalmente, sem ser no momento de energização ou durante grandes perturbações no sistema, não introduzem transitórios no chaveamento de suas unidades;
- Como só trabalham chaveando bancos de capacitores, sem controlá-los, não introduzem correntes harmônicas no sistema;
- Podem ser as unidades variáveis de um C.E. de mais rápidas respostas, principalmente frente a grandes perturbações.

Com isto, conclui-se que os CCT's são equipamentos não muito versáteis no controle de regime permanente, mas que podem ser, e realmente são, de grande valia no suporte de reativo e amortecimento de oscilações quando ocorrem grandes perturbações nos sistemas elétricos de potência.

2.1.3 - Reator de Núcleo Saturado (RNS)

Este terceiro tipo de unidade variável de um compensador estático difere bastante dos tipos já apresentados, pois não se serve dos tiristores ou mesmo de qualquer sistema de controle a fim de exercer sua função básica. Além disto, outro ponto que o distingue dos anteriores é o fato de ser um elemento não linear, enquanto que os outros se utilizam somente de componentes lineares. Isto posto, pode-se dizer que o reator de núcleo saturado é um componente de C.E. que, por trabalhar em condições normais já em sua faixa de saturação, consegue manter a tensão do barramento em que se encontra conectado dentro de uma determinada faixa de regulação, utilizando-se para tanto da variação do seu intercâmbio de corrente, e portanto de potência reativa, com o sistema dentro de suas caracte

rísticas operativas não lineares. É claro que, como se trata de um reator, quando opera isolado como um C.E., o RNS só tem condições de absorver potência reativa, não podendo por si mesmo suprir necessidades de reativo, transitórias ou permanentes, que o sistema venha a apresentar.

O reator de núcleo saturado, assim como o RCT, tem condições de exercer uma ação contínua de controle, variando sua absorção de reativo de maneira uniforme, conforme as necessidades encontradas. Outro ponto importante nas características de um RNS é que ele é conhecido como o elemento variável de controle de tensão inerente. Isto significa que, como ele não apresenta um sistema específico que estabeleça uma certa lógica de controle, sua ação restringe-se ao controle de tensão de sua própria barra. Ele não tem condições de supervisionar qualquer outra variável do sistema, já que exerce sua função somente através de suas propriedades não lineares.

Historicamente, o reator a núcleo saturado (RNS) é o mais antigo dos meios de compensação estática controlável utilizado, pois sua tecnologia foi dominada muito antes do aparecimento dos sistemas de controle a estado sólido. Por volta de 1930 este equipamento já era exaustivamente estudado, sendo sua aplicação comercial já bastante difundida para instalações industriais. E mesmo na área de sistemas de potência, o reator de núcleo saturado já tinha aplicações previstas na primeira metade da década de 60.

No aspecto construtivo, o reator de núcleo saturado utiliza, na construção de seu núcleo, um material que apresenta as seguintes características principais:

- Alta permeabilidade magnética na região não saturada;
- Efeito desprezível da histerese;
- Baixa (e quase constante) permeabilidade na região saturada.

Normalmente emprega-se, para este fim, o aço de grãos orientados laminado a frio.

Baseando-se nos requisitos exigidos para o núcleo de um RNS, pode-se chegar à seguinte curva B x H:

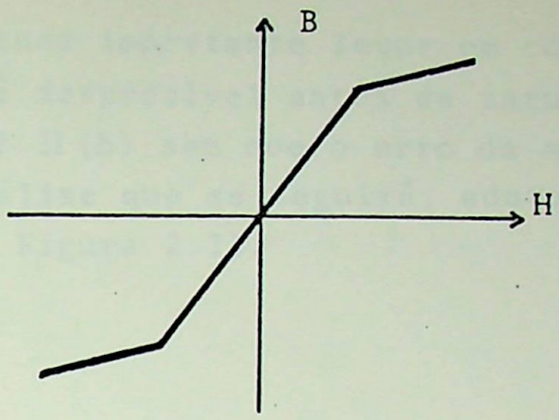
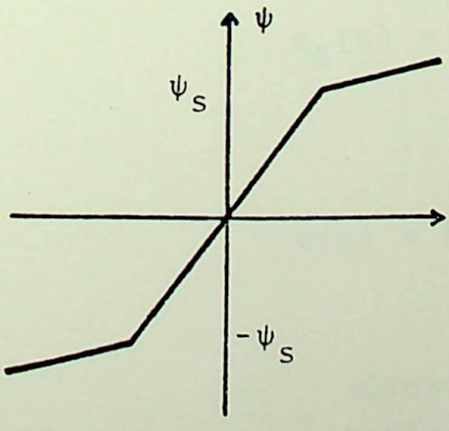


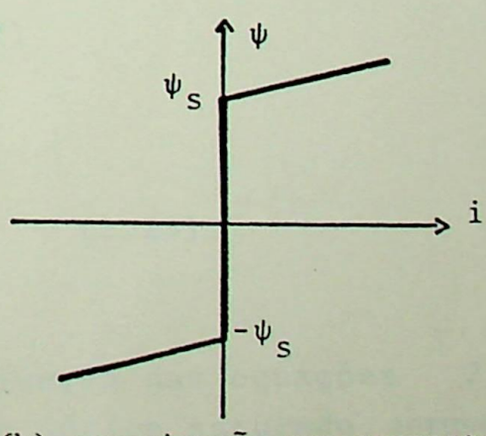
Figura 2.20 - Característica de magnetização de um Reator de Núcleo Saturado

Feitas as considerações acima e tendo conhecidas as características magnéticas do núcleo de RNS, pode-se partir para analisar o seu comportamento dentro de um sistema elétrico. Por questões de simplicidade, tal análise será iniciada para uma unidade monofásica. Mas, antes de iniciar a análise propriamente dita, convém transformar a curva da Figura 2.20 numa relação ψ x i, ou seja, fluxo magnético versus corrente. Ora, como se sabe (Referência 9, por exemplo) o fluxo magnético é diretamente proporcional a B, e a corrente i é diretamente proporcional a H. Sendo assim, considerando uma simples mudança de escala, pode-se transformar a curva B x H na curva ψ x i, chegando à Figura 2.21(a).



ψ_s = fluxo magnético de saturação

(a) real



(b) aproximação com corrente nula antes da saturação

Figura 2.21 - Característica ψ x i de um Reator de Núcleo Saturado

É ainda importante levar em conta que, comumente, a corrente no reator é desprezível antes da saturação. Isto permite utilizar-se a Figura 2.21(b) sem que o erro da aproximação traga prejuízos. Para a análise que se seguirá, adotou-se como ponto de partida o circuito da Figura 2.22.

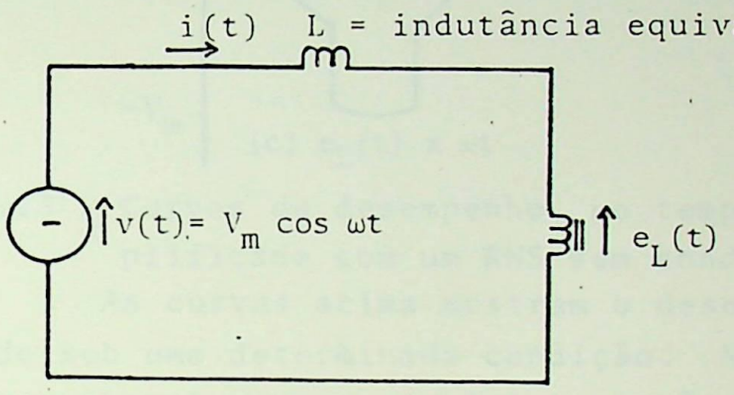


Figura 2.22 - Circuito simplificado para análise do RNS

O fluxo concatenado "λ" no reator da Figura 2.22 é dado por:

$$\lambda = N\psi \qquad (2.21),$$

onde "N" é o número de espiras do reator. Por inspeção do circuito adotado, e considerando a relação tensão x corrente em um indutor, pode-se escrever agora as seguintes equações:

$$e_L(t) = \frac{d\,\lambda(t)}{d\,t} \qquad (2.22)$$

e

$$v(t) = L\,\frac{d\,i(t)}{d\,t} + e_L(t) \qquad (2.23)$$

Considerando agora a junção das equações 2.22 e 2.23 com as características do reator de núcleo saturado, apresentadas na Figura 2.21(b), pode-se chegar às curvas de resposta no tempo da Figura 2.23, que supõe que a saturação é atingida em $\omega t = \pi/4$ RAD.

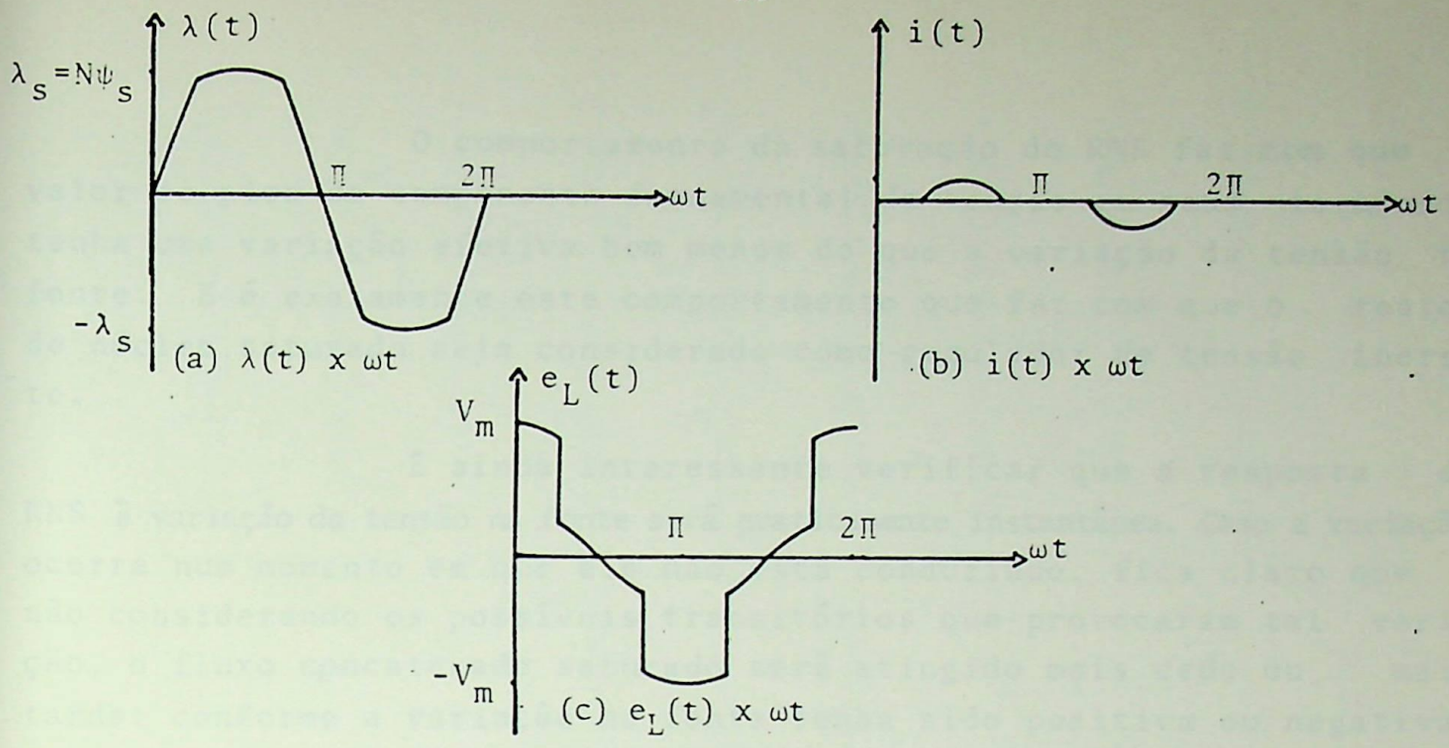


Figura 2.23 - Curvas de desempenho, no tempo, do circuito simplificado com um RNS sem conduzir até saturar

As curvas acima mostram o desempenho do reator de núcleo saturado sob uma determinada condição. No entanto, persiste a dúvida de como ele atua para regular a tensão em um estreito limite. Esta resposta é simples, pois caso haja um aumento na tensão da fonte, por exemplo, o que acontecerá é que o fluxo concatenado atingirá mais cedo o valor saturado. Sendo assim, o reator conduzirá por mais tempo e a tensão $e_L(t)$ terá sua descontinuidade mais cedo. A figura 2.24 mostra o comportamento de $e_L(t)$ na situação acima descrita e no caso da tensão da fonte diminuir.

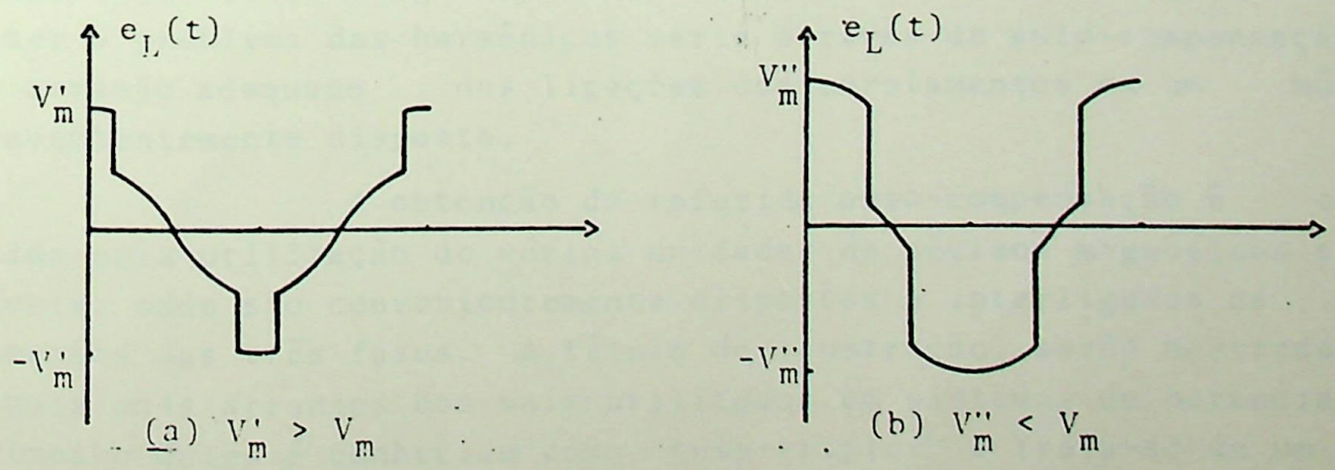


Figura 2.24 - Comportamento de $e_L(t)$ para diferentes tensões na fonte

O comportamento da saturação do RNS faz com que o valor de pico da componente fundamental da tensão em seus terminais tenha uma variação efetiva bem menor do que a variação da tensão na fonte. E é exatamente este comportamento que faz com que o reator de núcleo saturado seja considerado como regulador de tensão inerente.

É ainda interessante verificar que a resposta do RNS à variação da tensão na fonte será praticamente instantânea. Caso a variação ocorra num momento em que ele não está conduzindo, fica claro que, não considerando os possíveis transitórios que provocaram tal variação, o fluxo concatenado saturado será atingido mais cedo ou mais tarde, conforme a variação na fonte tenha sido positiva ou negativa, respectivamente. Já ocorrendo um distúrbio num instante de condução, o efeito observado será o da variação imediata do período em que o RNS fica neste modo, visando adaptá-lo de pronto às novas condições do sistema. Um maior detalhamento desta análise ficará a cargo do desenvolvimento matemático do Capítulo 5.

Observando as curvas de desempenho de um reator de núcleo saturado monofásico vê-se que se trata de um equipamento capaz de introduzir altos níveis de harmônicas no seu sistema elétrico. Isto leva a pensar imediatamente em soluções envolvendo filtros. No entanto, para este caso em específico, a adoção de tal solução acarreta uma série de riscos, podendo levar o conjunto RNS--Filtros a um grande número de pontos de ressonância. Além disto, a instalação de filtros requer investimentos adicionais que podem tornar-se bastante onerosos. Somando tudo isto ao fato de que o reator de núcleo saturado, para o presente enfoque, é instalado em sistemas trifásicos, chegou-se à conclusão de que a melhor forma de combater o problema das harmônicas seria através de auto-compensação pelo arranjo adequado das ligações dos enrolamentos em um núcleo convenientemente disposto.

A obtenção da referida auto-compensação é conseguida pela utilização de várias unidades de núcleos magnéticos saturáveis, onde são convenientemente dispostos e interligados os enrolamentos das três fases. A título de ilustração, serão mostrados a seguir dois arranjos dos mais utilizados em sistemas de potência. O primeiro deles é conhecido como "twin-tripler" e trata-se de um equipamento que conta com um mínimo de seis unidades, que tem as ligações feitas, por exemplo (existem várias maneiras de se proceder com estas ligações para obter os mesmos resultados), conforme a Figura 2.25.

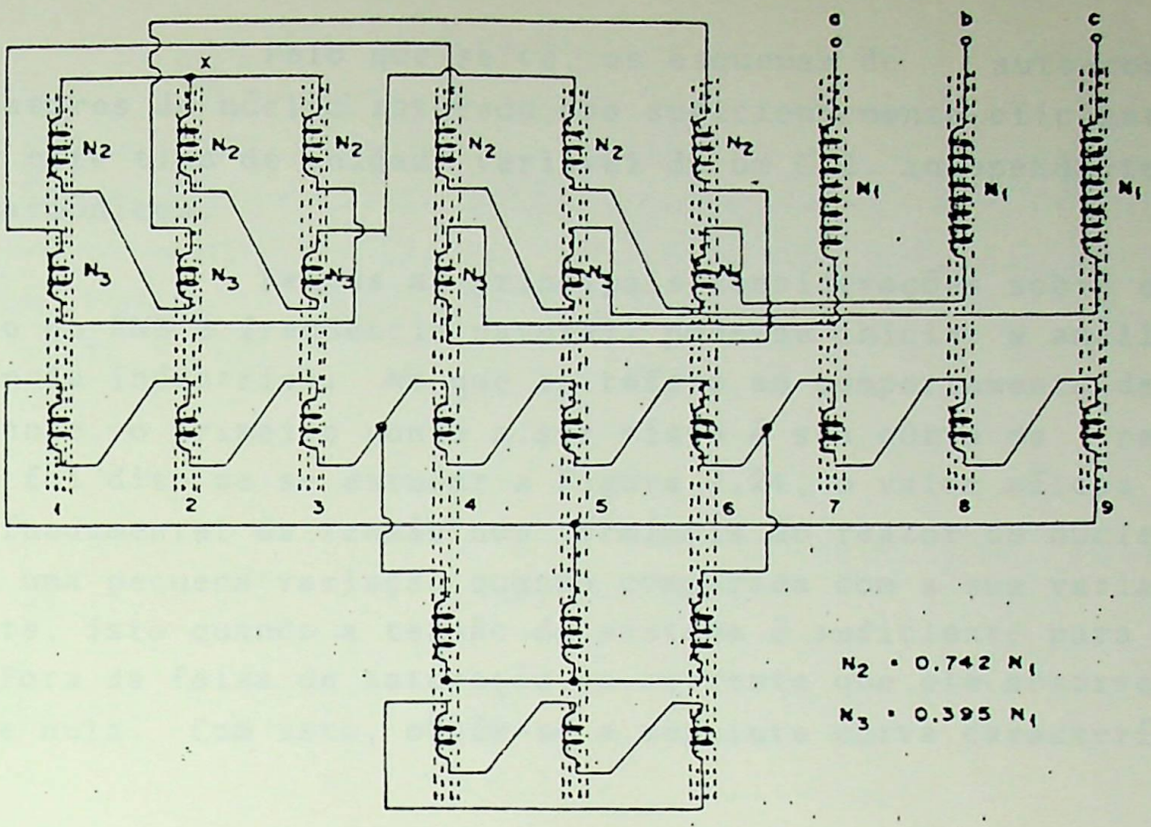


Figura 2.25 - Esquema de conexão de um RNS do tipo "Twin - Tripler"

Este arranjo faz com que só existam harmônicos de ordem $12K \pm 1$ (k = 1, 2, 3...), como mostra a Referência 5 . Isto significa que os primeiros e maiores harmônicos que surgirão são os 11º e 13º. E mesmo assim, na maioria dos casos, a intensidade deles não é prejudicial ao sistema, não exigindo filtros adicionais.

Outro tipo de arranjo largamente difundido é o "treble-tripler". Neste caso, nove unidades são utilizadas, sendo uma das ligações possíveis a mostrada na Figura 2.26. Nesta situação as harmônicas que aparecerão são de ordem $18K \pm 1$ (K = 1, 2, 3...).

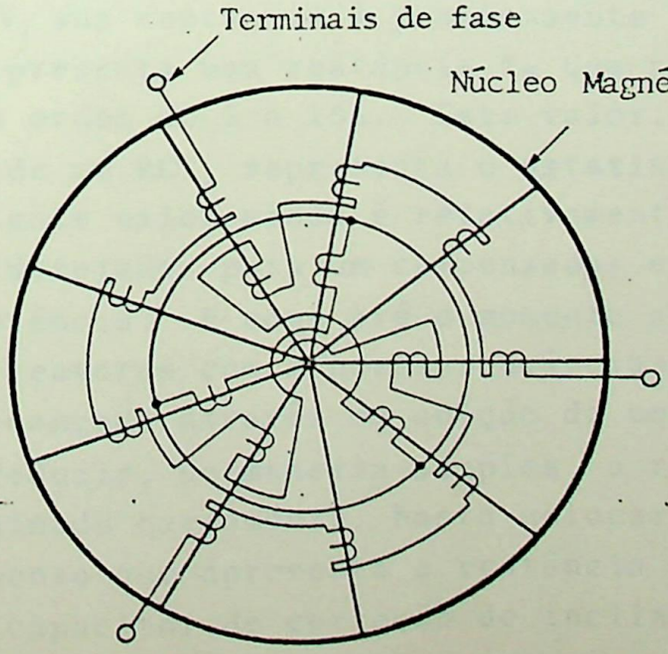
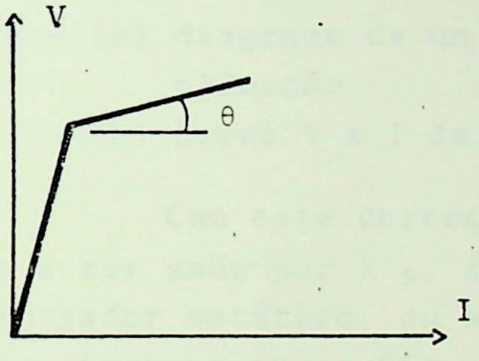


Figura 2.26 - Esquema de conexão de um RNS do tipo "Treble-Tripler"

Pelo que se vê, os esquemas de auto-compensação dos reatores de núcleo saturado são suficientemente eficientes para tornar este tipo de unidade variável de um C.E. independente de filtros harmônicos.

Feitas as principais considerações sobre o comportamento do RNS à freqüência natural, pode-se iniciar a análise na freqüência industrial. No que se refere ao comportamento de regime permanente, o primeiro ponto a ser visto é sua curva de regulação. No que foi dito ao se estudar a Figura 2.24, o valor eficaz da componente fundamental da tensão nos terminais do reator de núcleo saturado tem uma pequena variação quando comparada com a sua variação de corrente, isto quando a tensão do sistema é suficiente para saturá-lo. Fora da faixa de saturação, a corrente que ele absorve é praticamente nula. Com isto, obtém-se a seguinte curva característica V x I:



$\tan \theta = X_s$ = reatância saturada (incremental na zona de saturação)

V_j = tensão eficaz a partir da qual o reator satura (joelho de saturação)

Figura 2.27 - Curva V x I de valores eficazes para um Reator de Núcleo Saturado

A inclinação desta curva dá a reatância aparente do RNS na freqüência industrial. Sendo assim, pode-se dizer que abaixo de V_j sua reatância é praticamente infinita. Na zona de saturação ele apresenta uma reatância X_S que permanece praticamente constante, da ordem de 5 a 15%. Este valor, quando comparado com a mesma curva de um RCT, representa o estatismo deste equipamento. No entanto, este valor ainda é relativamente alto para os níveis de desempenho desejados para um compensador estático de sistemas elétricos de potência. E como até o momento ainda não foi possível construir-se reatores com menores reatâncias saturadas, a solução só pôde ser alcançada através da adição de um corretivo externo. Ora, para se reduzir, de maneira simples, a reatância indutiva vista de um determinado barramento, basta colocar um capacitor em série com o equipamento que apresenta a reatância indesejável. Foi assim que surgiu o capacitor de correção de inclinação (CCI), já mencionado no Capítulo 1 deste trabalho.

O efeito do capacitor de correção de inclinação se faz sentir na faixa normal de operação do RNS, ou seja, na parte saturada da curva. Para tensões abaixo do joelho de saturação, o efeito deste é desprezível, pois considera-se que a indutância do reator é praticamente infinita, não alterando em quase nada com a entrada do capacitor. Sendo assim, a curva V x I passa a ser como na Figura 2.28.

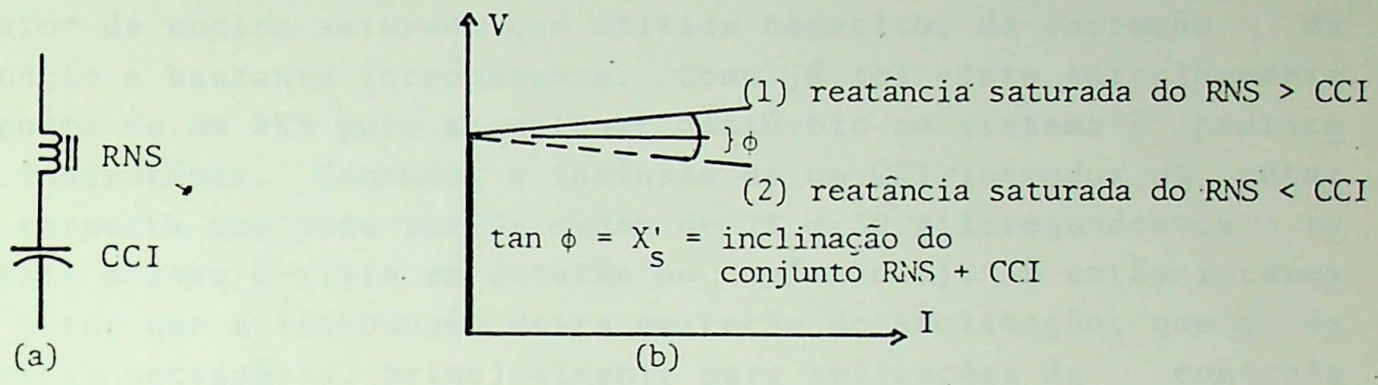


Figura 2.28 - (a) diagrama de um RNS com Capacitor de Correção de inclinação
(b) Curva V x I de valores eficazes

Com esta correção, o estatismo do conjunto, que agora passa a ser dado por X'_S, ficará dentro dos limites exigidos para um compensador estático, ou seja, da ordem de 3 a 7%. É também interessante observar que o CCI permite que o C.E. trabalhe com um estatismo negativo. No entanto, não se vislumbra aplicações práticas para esta última hipótese. Finalizando a análise de regime permanente, pode-se afirmar que o desempenho de um reator de núcleo saturado (entendendo-se agora que ele já contém implicitamente um capacitor de correção de inclinação) não deixa nada a desejar quando comparado com um reator controlado por tiristores.

Abrindo um parêntese na análise à freqüência industrial, vale ressaltar que a inclusão do CCI vem acompanhada de alguns cuidados construtivos especiais. Em primeiro lugar, é normal colocar-se filtros amortecedores em paralelo com o capacitor, a fim de evitar o risco de instabilidade subarmônica, principalmente em sistemas fracos (baixo nível de curto-circuito). É também muito comum o uso de um sistema de proteção para o capacitor de correção de inclinação. Este sistema tem dupla função:

. Evita que o capacitor seja submetido à sobretensões que ele não suportaria.

. Atuar curto-circuitando o capacitor, o que possi

bilitaria um aumento efetivo na reatância do C.E., permitindo que a tensão do sistema possa ser controlada mais convenientemente, pois o reator é sempre mais resistente a sobrecargas que o capacitor.

O comportamento dinâmico à freqüência fundamental do reator de núcleo saturado que utiliza capacitor de correção de inclinação é bastante interessante. Como já foi visto anteriormente, a resposta de um RNS puro a qualquer distúrbio no sistema é praticamente instantânea. Contudo, a inclusão de um CCI introduz um retardo na resposta que pode ser da ordem de 25 a 50 milisegundos (a razão deste atraso é vista em detalhe no capítulo 5). É então interessante notar que a introdução desta correção de inclinação, que é extremamente necessária, principalmente para aplicações de controle de tensão em sistemas de transmissão de grandes blocos de potência, além de tornar a construção do equipamento mais sofisticada, e até certo ponto mais frágil e mais onerosa, faz com que o tempo de resposta a um distúrbio seja aumentado.

Tratando-se o RNS de um sistema de controle de tensão inerente, não se pode esperar dele mais do que sua capacidade de operação. Sendo assim, sua atuação dinâmica limita-se ao controle de tensão de seu barramento. Deve-se destacar somente que, dependendo do tipo de proteção adotado para o CCI, ele poderá ser ligado ou desligado algumas vezes durante um distúrbio, dependendo da severidade das oscilações de tensão a que o sistema se vê submetido. E, é claro, há uma proteção que desconectará o RNS do sistema elétrico, caso ele seja forçado a suportar uma sobrecarga inadmissível.

Para curtos-circuitos, a atuação do RNS é semelhante ao dos equipamentos já enfocados. Por se tratar de um elemento passivo ele não tem maiores contribuições nas correntes de defeito. Vale só destacar que ele estará sempre presente, exercendo sua ação reguladora em cada fase independente de qualquer outra condição. E, estando o sistema desequilibrado, ele poderá introduzir harmônicos até mesmo não característicos enquanto persistir o defeito. Mas isto não é uma desvantagem, pois o sistema como um todo já apresentará tais distúrbios.

Por fim, deve-se dizer que o reator de núcleo saturado com capacitor de correção de inclinação tem desempenho e aplicação muito semelhantes ao de um reator controlado por tiristores. A

única desvantagem aparente do primeiro reside no fato dele não ter um sistema de controle que permita supervisionar outras variáveis além da tensão de seu barramento. Fora isto, a decisão entre um e outro dependerá muito do sistema de compensação estática como um todo, não havendo um roteiro básico que possa mostrar de imediato a opção a ser feita.

2.2 - Conclusões

Este capítulo procurou apresentar as principais características dos três principais equipamentos que oferecem a possibilidade de funcionar como uma espécie de elemento de impedância variável em um compensador estático. Como se viu, a real performance destes elementos não está numa efetiva variação de impedância, mas sim num processo de chaveamento controlado ou com características não lineares.

Pelo que foi analisado, os dois elementos de absorção de potência reativa atuam de forma contínua, geram correntes harmônicas e têm atuação dinâmica semelhante quanto ao tempo de resposta. O campo de aplicação de ambos é semelhante, ficando a principal diferença no fato do reator controlado por tiristores ter um sistema de controle que permite grande flexibilidade na escolha da variável a ser controlada, enquanto que o reator de núcleo saturado tem sua ação restrita ao controle de tensão de seu próprio barramento.

O elemento de geração de potência reativa apresentado, o capacitor chaveado por tiristores, além de ter uma função diferente, tem sua ação de controle exercida de forma diversa dos outros. A sua variação de impedância é discreta, não provoca circulação de correntes harmônicas no sistema, e a atuação dinâmica, que depende das características exigidas de seu sistema de controle, pode chegar a ser mais rápida que a das outras duas unidades.

No que se refere a perdas de potência ativa, as duas unidades de absorção apresentam um desempenho semelhante, e consomem mais do que os capacitores. No entanto, esta última comparação não é válida pois os primeiros absorvem reativo enquanto o último gera, significando que não há um parâmetro comum para fazer um paralelo.

Para complementar este capítulo, vale acrescentar que existem ainda outras unidades variáveis que podem ser empregadas [illegible]. Contudo, elas são muito menos empregadas

e por isto não foram aqui destacadas. Uma delas consiste no transformador controlado por tiristores, que é de todo semelhante ao reator controlado por tiristores, não merecendo, portando, maiores considerações. Outra interessante unidade, raramente utilizada, é o reator com saturação controlada por corrente CC, Referência 10 . Ele consiste de por em prática a idéia de se ter um sistema de controle num reator saturado, usando para tanto de uma fonte de corrente contínua ligada a um enrolamento secundário de um reator com núcleo magnético de fácil saturação. Mas, este tipo de controle mostrou-se muito complexo e de difícil execucão, ficando esta unidade sem campo, atualmente, para aplicações práticas.

Finalizando este capítulo, apresenta-se uma tabela resumindo as principais características de cada um dos equipamentos enfocados, devendo-se, no entanto, ressaltar que dela não se poderá chegar, de imediato, a qual tipo de unidade variável é a melhor. Esta conclusão ficará sempre na dependência de estudos para cada aplicação específica.

Tabela 2.1 - Comparação dos três principais tipos de unidades controláveis de um Compensador Estático

ITEM COMPARATIVO	REATORES CONTROLADOS POR TIRISTORES (RCT)	CAPACITORES CHAVEADOS POR TIRISTORES (CCT)	REATORES DE NÚCLEO SATURADO (RNS)
Construção	Válvula de tiristores e reatores lineares.	Válvula de tiristores e bancos de capacitores.	Reator com núcleo magnético de características especiais na faixa saturada.
Potência Reativa	Absorção.	Geração.	Absorção.
Tempo de Resposta	Rápido; dependendo, contudo, do nível de curto-circuito do sistema.	Bem rápido; dependendo, contudo, do nível de curto-circuito do sistema.	Muito rápido; dependendo, contudo, do nível de curto-circuito do sistema e do capacitor de correção de inclinação.
Harmônicos	Normalmente necessita de filtros.	Não gera harmônicas.	Baixa geração de harmônicas, raramente necessitando de filtros.
Perdas	Baixas, mas crescendo com a absorção de reativo.	Baixas, mas crescendo com a geração de reativo.	Baixas, mas crescendo com a absorção de reativo.
Flexibilidade (Ajuste de controle)	Excelente.	Muito boa.	Não tem.
Capacidade de Balancear as Fases.	Boa	Limitada.	Limitada.
Capacidade de Sobretensões.	Boa.	Limitada.	Boa, considerando proteção para o CCI.

ITEM COMPARATIVO	REATORES CONTROLADOS POR TIRISTORES (RCT)	CAPACITORES CHAVEADOS POR TIRISTORES	REATORES A NÚCLEO SATURADO (RNS)
Precisão na Compensação.	Excelente (regulação contínua).	Razoável (regulação discreta).	Boa (regulação contínua, mas dependente do CCI).
Conexão direta na alta tensão	Não pode.	Não pode.	Pode.
Operação durante energização de linhas.	Possível, desde que tenha válvulas e sistema de controle adequados.	Não se usa.	Sempre possível.
Transientes gerados durante sua energização.	Mínimos.	Alguns, mas sem importância para o sistema.	Alguns, mas sem importância para o sistema.

CAPÍTULO 3

ARRANJOS BÁSICOS DE COMPENSADORES ESTÁTICOS

Após o estudo detalhado dos principais tipos de unidades variáveis dos compensadores estáticos, reveste-se de relevado interesse o conhecimento das possíveis combinações que podem ser feitas entre tais unidades, e delas com compensações "shunts" fixas. Neste sentido, serão apresentados os arranjos mais usuais, tecendo-se comentários técnicos e econômicos sobre cada um. Além disto, serão discutidas as razões que tornam inaplicáveis certos arranjos. Por fim, serão abordadas soluções alternativas que vêm mesmo a substituir algum dos três tipos de unidades variáveis estudados no Capítulo 2.

Com o intuito de tornar mais simples a compreensão deste Capítulo, a ordem de abordagem dos arranjos será regida por cada tipo de unidade variável. Assim, serão vistos inicialmente os arranjos que envolvem reatores controlados por tiristores, a seguir aqueles com capacitores chaveáveis por tiristores e, terminando, os arranjos com reatores de núcleo saturado.

3.1 - Arranjos Básicos de Compensadores Estáticos envolvendo Reatores Controlados por Tiristores

A aplicação dos RCT's em sistemas elétricos de potência é a que vem sendo mais difundida nos dias de hoje. Isto se explica justamente pela grande facilidade com que se pode atender às exigências dos sistemas elétricos de potência através de C.E.'s contendo este tipo de unidade variável.

De uma forma genérica os reatores controlados por tiristores podem ser combinados entre si, com capacitores fixos, com capacitores chaveados por disjuntores, e com capacitores chaveados por tiristores. Na realidade, o mais comum é que exista no C.E. uma combinação de mais de duas das opções acima. A título de um primeiro exemplo, apresenta-se na Figura 3.1 o arranjo a ser adotado para o compensador estático que a ELETRONORTE instalará em Rio Branco - AC .

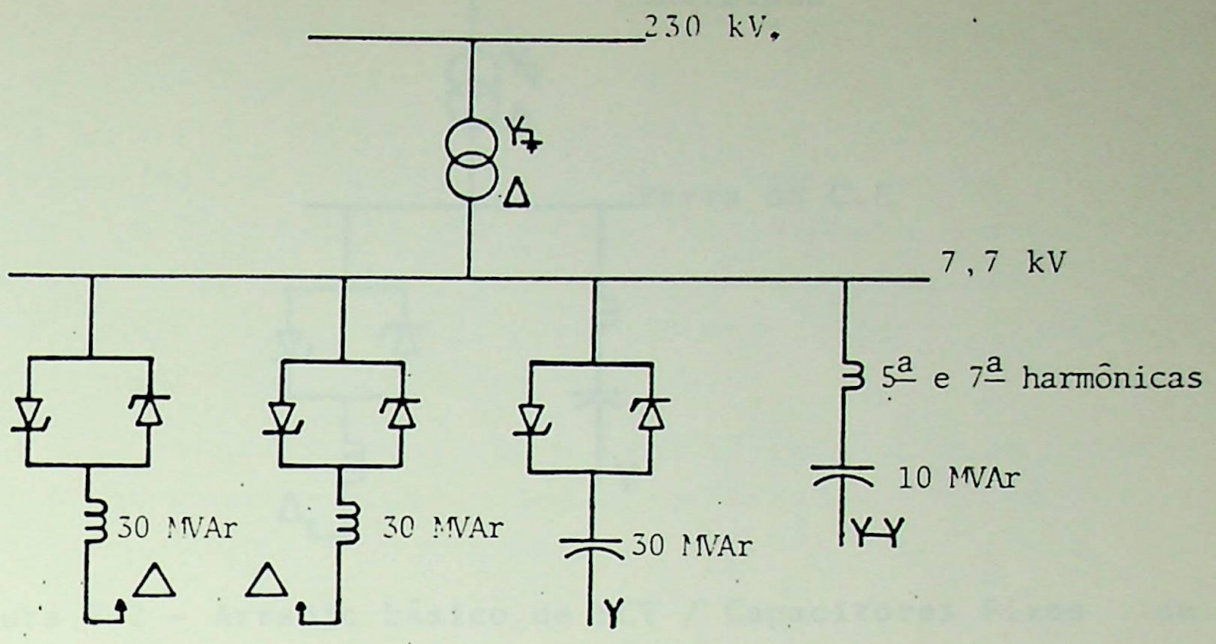


Figura 3.1 - Arranjo básico do Compensador Estático de Rio Branco - AC (Brasil), a ser instalado pela ELETRONORTE

A decisão quanto à forma mais adequada de arranjo será função dos seguintes fatores:

- Exigências de reativo do sistema em regime permanente
- Exigências de reativo do sistema em regime transitório
- Compromisso técnico-econômico entre os totais de MVAr exigidos e as capacidades de corrente e tensão das válvulas e demais equipamentos
- Aproveitamento do suporte de reativo já existente
- Custeio das perdas de energia e de ponta.

Nas análises que se seguem serão feitas considerações sobre cada um dos possíveis arranjos, destacando a forma como eles atendem cada um dos fatores acima, bem como procurando definir as melhores condições de aplicações de cada um deles.

3.1.1 - Reator Controlado por Tiristores com Capacitores Fixos

A forma básica deste arranjo é dada pela Figura 3.2.

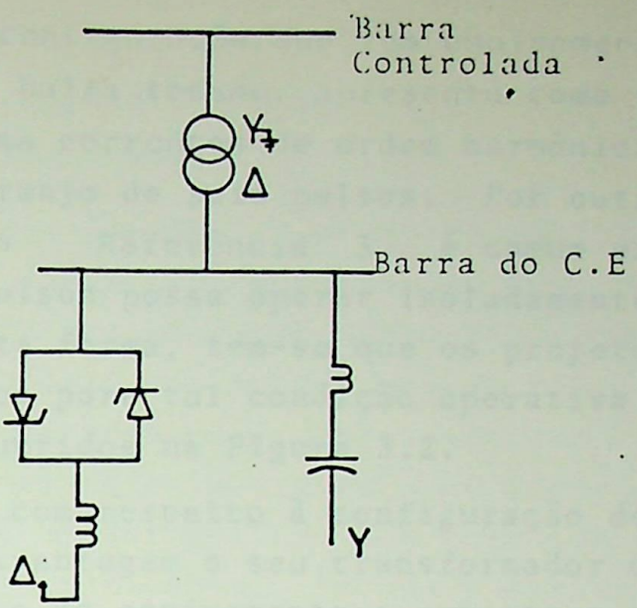


Figura 3.2 - Arranjo básico de RCT / Capacitores Fixos de seis pulsos

Na Figura 3.2 é mostrado um compensador estático de seis pulsos tendo um único reator controlado e um único banco de capacitores. Os próprios capacitores com correspondentes indutâncias de sintonização são também utilizados como filtros, pois os RCT's geram uma tal ordem de distorções harmônicas que apenas casos excepcionais deixarão de requisitar uma solução para atenuar este efeito.

Como variante poder-se-ia ter ainda mais de um banco de capacitores fixos, ou mesmo mais de um RCT, todos ligados ao mesmo barramento. Alternativamente, a fim de atenuar os efeitos harmônicos, seria possível construir compensadores estáticos de 12 pulsos. Seu arranjo básico é mostrado na Figura 3.3.

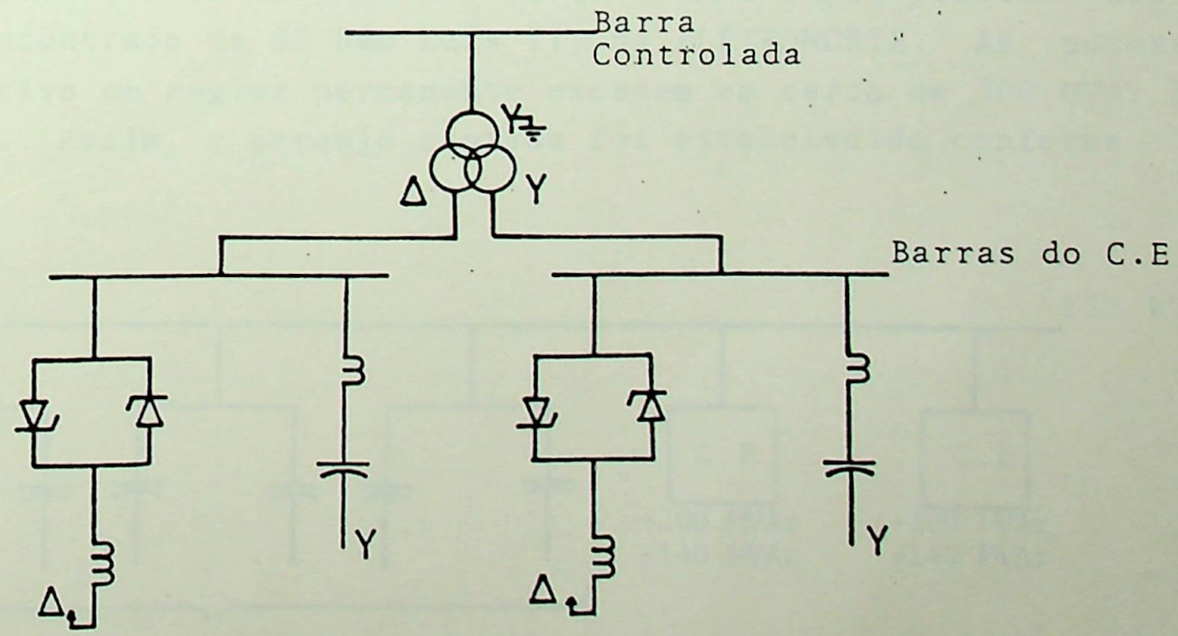


Figura 3.3 - Arranjo básico de RCT / Capacitores Fixos de 12 pulsos

Esta configuração, que tem equipamentos idênticos em cada uma das barras de baixa tensão, apresenta como vantagem o fato de só injetar no sistema correntes de ordem harmônica 12 ($k \pm 1$), contra 6 ($k \pm 1$) para o arranjo de seis pulsos. Por outro lado, conforme filosofia adotada na Referência 3, é comum exigir-se que cada ramo do C.E. de 12 pulsos possa operar isoladamente como um arranjo de seis pulsos. Desta forma, tem-se que os projetos dos filtros deverão ser executados para tal condição operativa, tornando-os idênticos aos filtros requeridos na Figura 3.2.

Ainda com respeito à configuração de doze pulsos, pode-se ressaltar como desvantagem o seu transformador de três enrolamentos, que eleva o custo do equipamento e aumenta o seu risco de falha.

Abstraindo-se agora do fato do C.E. ter seis ou doze pulsos, é importante verificar quais exigências de sistema são atendidas por este tipo de arranjo. Inicialmente, é evidente que a utilização de capacitores fixos, deixanto todo o controle da reatância por conta do RCT, faz com que a faixa do C.E. seja a mesma tanto em regime permanente quanto transitório. No caso das necessidades transitórias de reativo serem maiores do que as de regime, ou melhor, maiores do que aquelas que podem prescindir de até alguns segundos para serem atendidas, não há o que se criticar quanto à adoção deste arranjo. No entanto, ocorrendo o contrário pode-se afirmar que este C.E. conta com uma faixa de atuação rápida excedente, tornando-se uma solução anti-econômica. O ideal nesta situação seria dimensionar o C.E. para as necessidades transitórias, dotando-o ainda de um controle adicional que permitiria chavear unidades de compensação "shunt" tradicionais, em outros barramentos da SE. Um exemplo prático desta situação é encontrado na SE São Luís II, da ELETRONORTE. As necessidades de reativo em regime permanente excedem em cerca de 200 MVAr às transitórias. Assim, o arranjo adotado foi estabelecido conforme a Figura 3.4.

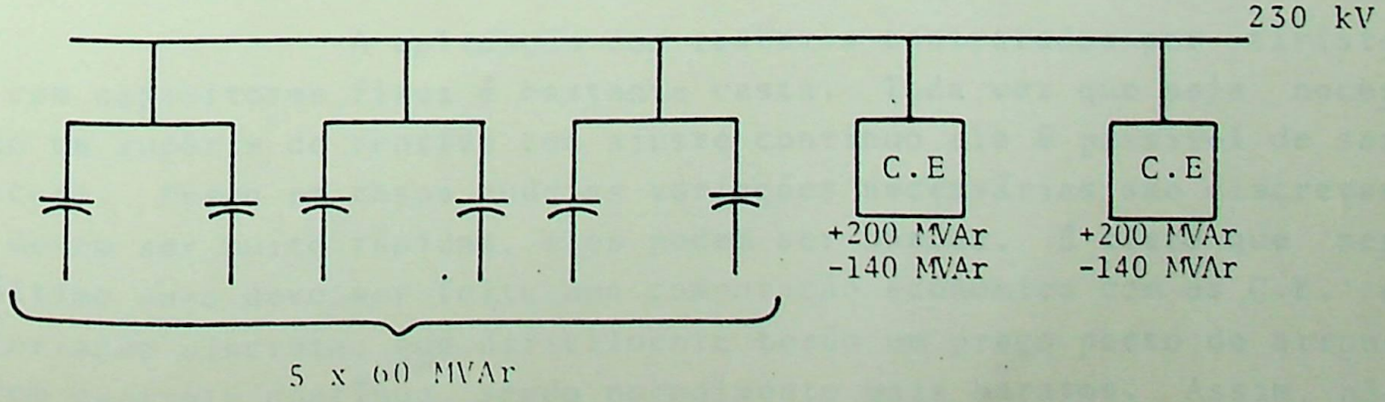


Figura 3.4 - Esquema de compensação reativa da SE São Luís II - ELN

Nesta configuração o chaveamento dos capacitores pode ser comandado pelo próprio controle do compensador.

Quanto ao número de reatores controlados por tiristores e de capacitores fixos que existirão no C.E., isto é determinado por um compromisso técnico-econômico considerando o dimensionamento da válvula de tiristores. Normalmente se procura fazer com que a válvula tenha sua corrente máxima próxima à capacidade dos tiristores que a compõem. Assim, tendo basicamente fixada a corrente e sabendo que cada tiristor só suportará um determinado valor de tensão (entre 1,5 kV e 4,5 kV, dependendo do fabricante), faz-se a análise se é melhor ter vários reatores menores, cada um com uma pequena válvula, mantendo menor a tensão da barra de baixa do C.E., ou se é melhor um único reator, com uma válvula maior e, conseqüentemente, uma tensão maior no barramento de baixa. Estas considerações, que cabem mais ao fabricante do que ao comprador, envolvem uma grande dose de dependência com a tecnologia disponível. Assim, para cada diferente fornecedor existirá uma solução diferente que atenda aos melhores requisitos técnicos dentro de um preço mínimo.

Com relação às perdas, o C.E. com RCT/capacitores fixos apresenta, a princípio, uma perda constante, que corresponde aos capacitores, sistema de refrigeração das válvulas, etc. A partir daí o acréscimo nas perdas será função do ponto de operação do equipamento, sendo que as perdas mínimas ocorrem no limite capacitivo e as perdas máximas no limite indutivo. A Figura 3.5, baseada na Referência 7, mostra na curva "a" as perdas do tipo de arranjo aqui enfocado, em por unidade de suas perdas máximas. Deve-se notar que a análise e custeio do desempenho frente às perdas só pode ser feita a partir do conhecimento do ciclo normal de operação do C.E., bem como dos custos de energia e ponta do sistema. E com estes resultados pode-se comparar este arranjo com outros possíveis. No item seguinte serão discutidas as condições que levam à escolha de um arranjo ou outro no tocante à perdas e ao custo total.

A aplicação dos reatores controlados por tiristores com capacitores fixos é bastante vasta. Toda vez que seja necessário um suporte de reativo com ajuste contínuo ele é passível de ser aplicado. Mesmo em casos onde as variações necessárias são discretas, mas devem ser muito rápidas, eles podem ser usados. É claro que neste último caso deve ser feita uma comparação econômica com os C.E.'s de variação discreta, que dificilmente terão um preço perto do arranjo com controle contínuo, sendo normalmente mais baratos. Assim, não levando em conta o fato de que a necessidade básica do sistema dita

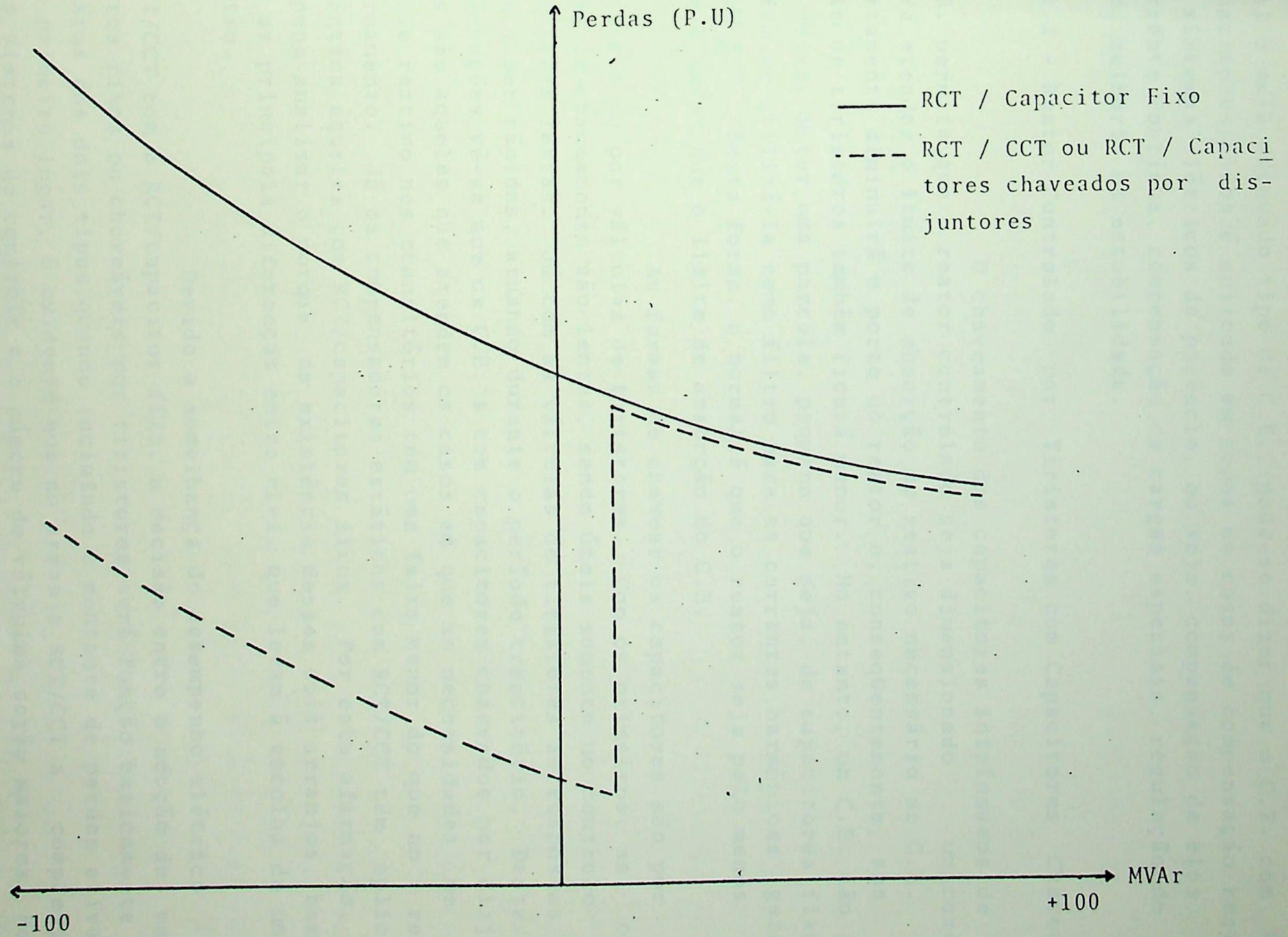


Figura 3.5 - Perdas normalizadas de Compensadores Estáticos

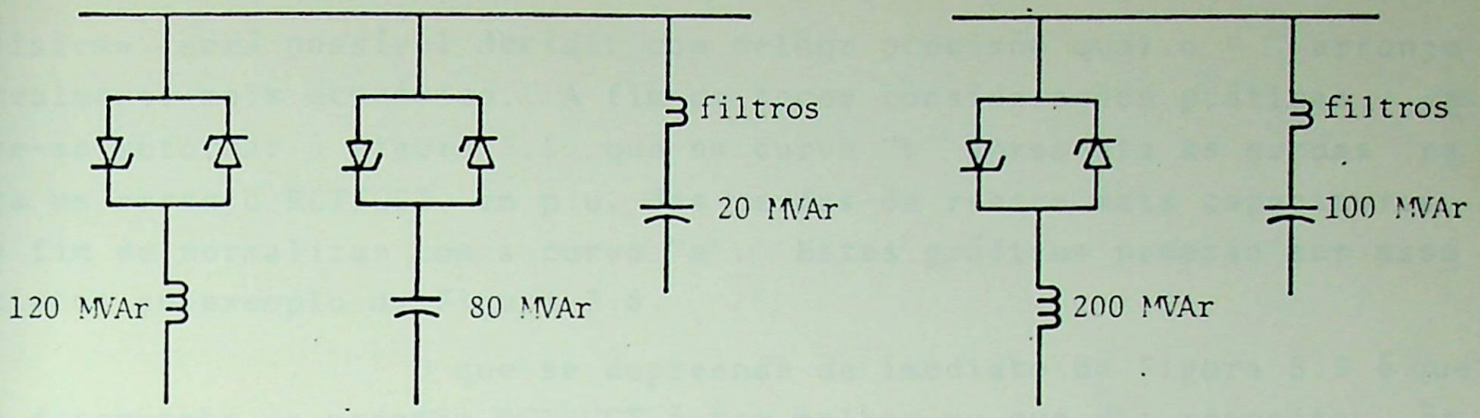
qual o mais adequado tipo de C.E., pode-se dizer que o C.E. com RCT/capacitores fixos é aplicado em todos os casos de compensação reativa de sistemas elétricos de potência, ou seja, compensação de elos de corrente contínua, compensação de cargas especiais, regulação de tensão, melhoria da estabilidade.

3.1.2 - Reator Controlado por Tiristores com Capacitores Chaveados

O chaveamento dos capacitores intrínsecos de um C.E. permite que o reator controlado seja dimensionado unicamente para atender o limite de absorção de reativo necessário ao C.E. Isto certamente diminuirá o porte do reator e, conseqüentemente, sua válvula de tiristores também ficará menor. No entanto, um C.E. não poderá deixar de ter uma parcela, pequena que seja, de capacitores fixos, a fim de utilizá-la como filtro para as correntes harmônicas geradas pelo RCT. Desta forma, o normal é que o reator seja pelo menos um pouco maior que o limite de absorção do C.E.

As formas de chavear os capacitores são por disjuntores ou por válvulas de tiristores. Com os primeiros, as operações de chaveamento são lentas, sendo úteis somente no controle de variações lentas. Já com as válvulas de tiristores as respostas passam a ser rápidas, atuando durante o período transitório. Destas considerações vê-se que os C.E.'s com capacitores chaveados por disjuntores são aqueles que atendem os casos em que as necessidades de controle reativo nos transitórios tem uma faixa menor do que no regime permanente. Já os compensadores estáticos com RCT/CCT têm aplicação idêntica aqueles com RCT/capacitores fixos. Por esta afirmação, vale a pena analisar o porquê da existência desses dois arranjos, bem como as principais diferenças entre eles, que levam à escolha de um ou outro.

Devido a semelhança do desempenho elétrico do RCT/CCT com o RCT/capacitor fixo, a decisão entre a adoção de capacitores fixos ou chaveáveis por tiristores será função basicamente dos custos dos dois tipos, quando incluindo o montante de perdas ativas. Em primeiro lugar, é evidente que no arranjo RCT/CCT a complexidade dos sistemas de controle e o número de válvulas serão maiores. Por outro lado, em cada válvula individual passará uma menor quantidade de reativo. Para melhor compreensão, analise-se o exemplo da Figura 3.6.



(a) arranjo RCT / CCT

(b) arranjo RCT / Capacitor Fixo

Figura 3.6 - Dois arranjos possíveis para um Compensador estático de +100, -100 MVAr

Supondo, como é normal, que se procure otimizar a corrente que passa pelas válvulas, é esperado que o valor em ampèr das correntes de ambos os reatores seja a mesma. Assim, a tensão do barramento da Figura 3.6 (b) terá que ser quase o dobro da tensão na Figura 3.6 (a). Por isto, pode-se dizer que o número de tiristores gastos no RCT/CCT não aumenta muito com relação ao arranjo com capacitor fixo. Logo, o aumento de custo restringir-se-á à duplicação da válvula em si (refrigeração, proteção, controle) dando, por outro lado, um ganho em isolamento, já que a tensão será mais baixa.

Pelas considerações acima, que dependem muito da tecnologia utilizada na construção do equipamento, é lícito afirmar que na escolha entre os dois arranjos acima, a decisão é muito mais econômica que técnica. Existirão fabricantes que defenderão um tipo ou outro pois suas tecnologias são diferentes, principalmente no que concerne aos tiristores. Pode-se acrescentar mesmo que existirão casos, como o da Figura 3.1, em que os fabricantes além de adotarem o arranjo RCT/CCT, proporão a adoção de mais de um reator e mais de um capacitor, pretendendo assim manter a tensão do barramento em valores baixos, a fim de conservar os projetos de válvulas que eles já dispõem.

Do que foi dito ficou uma indefinição, principalmente para quem comprará o equipamento, pois não é só o preço do equipamento que determina seu real custo. Os montantes das perdas de potência ativa durante toda a vida útil dele deverão ser acrescidas ao preço nominal do equipamento. E com este fator complementar, tendo determinadas as faixas de operação do C.E durante sua permanência no

sistema, será possível decidir com melhor precisão qual o arranjo realmente mais econômico. A fim de tecer considerações práticas, deve-se retornar à Figura 3.5, que na curva "b" apresenta as perdas para um arranjo RCT/CCT, em p.u. das perdas do reator mais capacitores, a fim de normalizar com a curva "a". Estes gráficos poderão ser associados ao exemplo da Figura 3.6.

O que se depreende de imediato da Figura 3.5 é que o desempenho do arranjo RCT/CCT é bem melhor no que diz respeito às perdas. Para operação totalmente capacitiva, os dois arranjos são equivalentes, mas para operação em flutuação, ou mesmo indutiva, a diferença de perdas é bastante sensível. Sendo assim, caso o RCT/CCT já seja o equipamento de menor preço, não há o que se analisar. No entanto, sendo um arranjo com capacitor fixo o mais barato, há que se acrescer a ele, bem como aos demais arranjos analisados, o custo de perdas (energia e ponta, conforme critério do adquirinte), a fim de subsidiar melhor a escolha.

Ainda sobre perdas, deve-se ressaltár que quanto maior for o número de capacitores chaveados, seja por tiristores ou disjuntores, maior será a diferença entre as curvas na Figura 3.5.

Por fim, vale tecer alguns comentários que distinguirão um pouco o campo de aplicação do RCT/CCT daqueles com capacitores fixos. É na utilização do C.E. como reator de linha durante energizações. Neste caso, quanto menos capacitores estirevem presentes no instante inicial, tão melhor será o desempenho obtido, não importando que eles estejam ou não plenamente compensados pelos reatores controlados. Riscos de sobretensões extras por falha de disparo na válvula do reator deixarão de existir, assim como serão eliminadas as influências dos capacitores nas distorções das ondas dos primeiros instantes. Desta forma, em energizações de linha o RCT/CCT é mais recomendável que o RCT/capacitor fixo. No entanto, não há nenhuma razão que desaconselhe totalmente a utilização deste segundo arranjo.

3.2 - Arranjos Básicos de Compensadores Estáticos envolvendo Capacitores Chaveados por Tiristores

Este tipo de unidade variável tem sua aplicação restrita a dois arranjos. O primeiro, conforme discutido em 3.1.2, é em paralelo com o reator controlado por tiristores, permitindo que juntos exerçam uma regulação contínua. O segundo arranjo, se assim se pode dizer, é sem combinação com qualquer outro tipo de componente re[illegible] só gerará reativo, exercerá uma re[illegible]

regulação discreta, e não injetará correntes harmônicas no sistema . Os comentários a seguir ficarão restritos a este segundo arranjo , pois o primeiro teve suas características já comentadas.

O mais importante a se analisar na escolha de um C.E. composto somente por capacitores chaveados por tiristores é justamente o conjunto de razões que levaram a ela. Em primeiro lugar, é interessante ver quando ele não seria escolhido. Toda vez que o sistema necessite de regulação contínua, mesmo que somente na faixa capacitiva, é mais vantajosa a adoção de um RCT em paralelo com capacitores fixos. No caso da geração de reativo poder ser discreta mas consistir numa exigência de regime permanente, a compensação capacitiva "shunt" tradicional deverá ser, indiscutivelmente, a solução adotada.

Do apresentado restou apenas uma razão básica para adoção do CCT puro — a necessidade de blocos de geração de reativo no regime transitório. E é justamente aí a grande aplicação do capacitor chaveado por tiristores. Para começar, pode-se citar a necessidade de absorver reativos apresentada pelos elos de corrente contínua. Durante oscilações dinâmicas o elo CC poderá exigir grandes quantidades de reativo num instante e pequenos valores logo a seguir. O equipamento realmente eficaz neste suprimento será o CCT, embora arranjos com o RCT também possam ser usados. Mas aí volta-se ao caso em que se utiliza reatores e capacitores em paralelo quando realmente só os capacitores são necessários. Outra aplicação importante é na manutenção da estabilidade em interligações de sistemas de corrente alternada. As grandes oscilações de potência exigirão respostas rápidas em seu amortecimento, não influindo se o equipamento é de regulação discreta ou contínua. E como geralmente tais problemas necessitam de suporte de reativo capacitivo, os C.E.'s somente com capacitores chaveados por tiristores encontram aí um outro excelente campo de aplicação, como pode ser visto na Referência 8.

Com base na análise acima, fica claro que a aplicação de um CCT puro ficará evidente a partir da necessidade do sistema que será apenas de geração de reativo, no regime transitório, e em quantidiscretas. E como ele certamente é mais econômico que um arranjo envolvendo outros equipamentos, fica imediata a conclusão por sua utilização.

Finalizando, ficou faltando considerar os capacitores chaveados por tiristores num arranjo com reatores fixos. Ora, este arranjo não tem sentido de existir pois é mais simples utilizar

mais efetivos e não comprometerão os custos do CCT. Assim a existência de reatores na subestação em que haja um CCT é considerada necessidade do sistema, não fazendo parte do compensador estático.

3.3 - Arranjos Básicos de Compensadores Estáticos envolvendo Reatores de Núcleo Saturado

As formas mais usuais de emprego dos reatores de núcleo saturado em sistemas elétricos de potência são em paralelo com capacitores fixos, ou ainda sem nenhum capacitor. Quando empregados num arranjo com capacitores fixos, eles normalmente ficam instalados no enrolamento de baixa tensão de um transformador que interligará o C.E. ao sistema. E neste caso seu desempenho será semelhante ao compensador empregando um reator controlado por tiristores, ressalvando-se apenas o fato do RNS ser um equipamento de controle intrínseco.

A aplicação do reator de núcleo saturado de forma isolada, possível graças aos seus tipos de ligação, que eliminam as correntes harmônicas, permite uma maior flexibilidade na sua instalação. Nesta situação ele poderá ser conectado diretamente à alta tensão, podendo fazer o papel de um reator de linha que libera o carregamento capacitivo da mesma para o sistema quando necessário. Durante energizações e rejeições ele se comportará de maneira semelhante a um reator comum.

A combinação do RNS com capacitores chaveados por tiristores não é usada pelas razões que se seguem. Ambos são equipamentos de resposta muito rápida mas que têm formas de controle totalmente diferentes. Isto tornaria praticamente impossível coordenar os dois equipamentos para atuarem com um único objetivo. Uma maneira de sanar este problema seria retardando a atuação do CCT, que passaria a responder só após o esgotamento das possibilidades do RNS. Ora, isto seria usar um equipamento sofisticado e caro bem abaixo das suas reais disponibilidades. Para esta forma de operação é mais razoável instalar um pequeno sistema supervisor que comandaria o chaveamento, por disjuntores, dos capacitores em paralelo com o reator de núcleo saturado.

Concluindo, vale notar que o reator de núcleo saturado, quando em aplicações que só exijam consumo de reativo, embora teoricamente apresentem-se mais vantajosos que os reatores controlados por tiristores, não são muito utilizados em sistemas elétricos de

ram sua difusão nesta área, além da natural dependência que se teria de praticamente um único fabricante em âmbito mundial (GEC).

3.4 - Arranjos não Convencionais para Compensadores Estáticos

Além da abordagem anterior, envolvendo os três tipos básicos de unidades controladas de compensadores estáticos estudadas no Capítulo 2, existem algumas possibilidades de construção de equipamentos que apresentem características de controle ou de equipamentos algo diferente, a fim de satisfazer as necessidades do sistema da forma mais econômica possível.

Em primeiro lugar pode-se adotar um arranjo de C.E. composto somente por reatores chaveados por tiristores. Sua aplicação é voltada para o regime transitório quando não há necessidade de um controle contínuo, e o sistema apresenta excesso de reativo. A vantagem desta filosofia é eliminar a necessidade de filtros e tornar o sistema de controle mais simples. Como limitação pode-se destacar o fato de que no regime permanente ele não poderá ser considerado no controle de tensão de forma contínua e efetiva, assemelhando-se aos capacitores chaveados por tiristores.

Outro tipo de compensador estático possível é o transformador controlado por tiristores, cujo diagrama é apresentado na Figura 3.7.

Sua filosofia de funcionamento consiste em usar as válvulas de tiristores para aplicar curtos-circuitos nos enrolamentos secundários. É lógico que nestas condições a reatância do transformador deverá ser adequada para atender as exigências de controle do sistema. Este esquema, assim como o RCT, exigirá filtros em algum barramento próximo. Sua grande vantagem está em utilizar um equipamento que já deveria existir de qualquer forma num C.E., eliminando a necessidade de aquisição do reator. Além disto, este equipamento poderia ser usado mais facilmente na substituição de reatores de linha. Como desvantagem, pode-se destacar a dificuldade construtiva do transformador, visando atender as condições requisitadas no tipo de operação a que será submetido.

A inclusão deste item objetivou complementar as informações que estão sendo aqui fornecidas. Contudo, deve-se destacar que estes dois tipos de equipamentos ainda tem poucas aplicações ; o primeiro, porque é difícil encontrar um sistema que precise exatamente do seu tipo de atuação; e o segundo, porque ainda não foram superadas, de forma satisfatória e econômica, os problemas envolvendo o projeto do transformador, bem como as dificuldades do tipo de opera

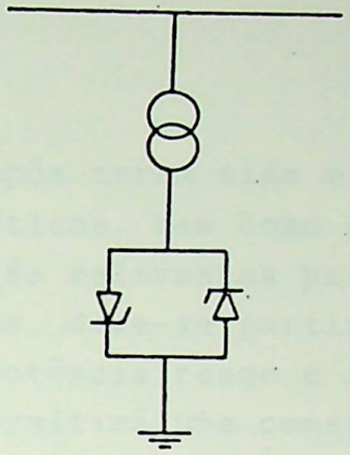


Figura 3.7 - Transformador Controlado por Tiristores

3.5 - Conclusões

A suscinta apresentação deste capítulo permite verificar que o reator controlado por tiristores é, das unidades variáveis de um compensador estático, a mais versátil. Sua aplicabilidade é genérica, e atinge a grande maioria das necessidades dos sistemas elétricos de potência, podendo mesmo ser usado em situações onde não seria o mais recomendado, desde que se utilizem certos recursos na alocação de filtros.

A utilização básica dos capacitores chaveados por tiristores é em paralelo com os reatores controlados por tiristores, ou isolados, na solução de problemas transitórios dos sistemas elétricos.

Os reatores de núcleo saturado, apesar de bastante próximos aos reatores controlados por tiristores, apresentando mesmo situações onde seriam, sem dúvida alguma, os mais indicados, ainda não foram muito bem aceitos na área de sistemas de potência, pelas dificuldades de manutenção e reparo oriundas dos arranjos necessários aos seus enrolamentos.

CAPÍTULO 4

INTERAÇÃO DOS COMPENSADORES ESTÁTICOS COM O SISTEMA ELÉTRICO

Após terem sido mostrados os principais tipos de compensadores estáticos, bem como suas características sob os diversos aspectos que são relevantes para a devida avaliação do desempenho de cada um deles, deve-se partir para a verificação de como um sistema elétrico de potência reage e influi no comportamento destes equipamentos. Isto permitirá uma constatação simples da aplicabilidade ou não de um C.E. em determinadas condições, assim como uma primeira aproximação das susceptâncias máxima e mínima que serão necessárias, tanto em condições normais quanto para as emergências consideradas. Para tal, serão desenvolvidas algumas metodologias bem simples, baseadas em equivalentes do sistema elétrico sob as diversas condições de funcionamento, e num modelo genérico de compensador estático.

Antes de iniciar o assunto principal deste capítulo, é essencial recordar que um sistema de compensação estática é composto somente por elementos passivos, o que vale dizer que sua atuação depende de existirem fontes geradoras de tensão no sistema, pois ele por si só não tem tal capacidade. Isto mostra de imediato que a atuação de um C.E. depende bastante das características do seu ponto de instalação. E neste particular, a proximidade elétrica das gerações, o que equivale dizer o nível de curto-circuito do local de instalação, é um item de relevada importância, como poder-se-á deduzir de imediato pelos estudos efetuados a seguir.

4.1 - O Equivalente do Sistema Elétrico de Potência

Um dos grandes problemas de engenharia de sistemas de potência consiste, justamente, em obter-se equivalentes de rede simples e que possam ser aplicados nos mais diversos tipos de estudo. Até o presente momento é possível afirmar que ainda não foi encontrado um equivalente que atenda satisfatoriamente os dois requisitos acima de forma simultânea. Normalmente, os fenômenos mais complexos exigirão equivalentes mais elaborados e, portanto, às vezes, muito longe da simplicidade almejada. Entretanto, para o objetivo perseguido nesta etapa, é possível obter-se um equivalente bastante simples e que se tem mostrado válido para todo o equacionamento a ser desen

volvido.

A base teórica do equivalente adotado é o teorema de Thevénin. Ele estabelece que um circuito elétrico pode ser representado por uma impedância equivalente, tomada a partir dos pontos estudados, considerando-se todos os elementos ativos do circuito em repouso, em série com uma fonte de tensão de valor igual à tensão entre os dois pontos de interesse, antes de sofrer influência dos testes que aí serão aplicados, como mostra a Figura 4.1. A utilização deste equivalente implica em não se desejar informações de comportamento além daquelas obtidas nos pontos terminais. É claro que os sistemas elétricos de potência funcionam com tensões senoidais trifásicas, no entanto, adotando-se uma representação monofásica à frequência industrial, e em por unidade (p.u.), é aceitável a aplicação deste teorema.

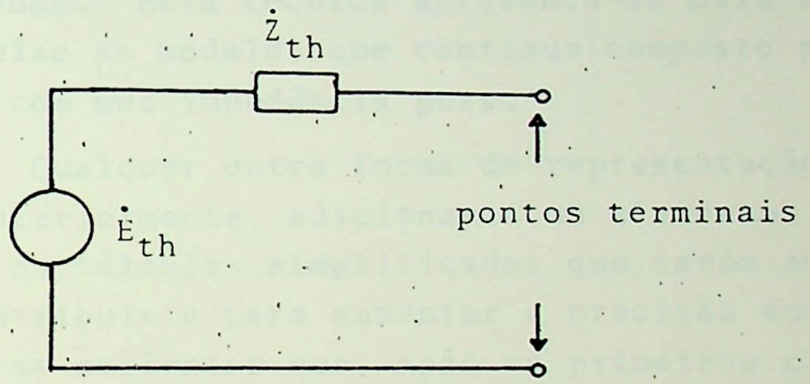


Figura 4.1 - Equivalente de Thevénin visto pela barra do CE

Obs.: As grandezas representadas com um ponto sobre elas, assim como na Figura 4.1, são fasoriais e as com barra são complexos. As demais serão escalares.

Para este caso em específico tem-se a impedância equivalente de Thevénin ($\bar{Z}_{th}$), obtida a partir do ponto de instalação do C.E. (sem incluí-lo) considerando todas as tensões internas das unidades geradoras como nulas, e a tensão equivalente de Thevénin ($\dot{E}_{th}$) que é a tensão do mesmo ponto sendo nula a susceptância do C.E. Contudo, a obtenção de $\bar{Z}_{th}$ não é, a princípio, tão simples quanto pode parecer, pois o comportamento das cargas não é exatamente o de uma impedância constante, o que tornaria quase impraticável representar $\bar{Z}_{th}$ por uma impedância pura. A fim de contornar este problema, utilizam-se algumas aproximações, cuja primeira é considerar $\bar{Z}_{th}$ sendo a impedância de curto-circuito usual ($\bar{Z}_{cc}$) do ponto de instalação do C.E.

A aproximação acima implica basicamente em despre

zar o efeito das cargas e elementos "shunt" existentes no sistema , frente ao conjunto formado pelas impedâncias-série das linhas e indutâncias dos transformadores. $\bar{Z}_{cc}$ é de fácil obtenção, pois vem diretamente do nível de curto-circuito do barramento. A utilização deste dado no presente trabalho só é aceitável na falta de informações mais detalhadas, pois, como é citado na referência 11, a validade de se desprezar as cargas nos cálculos de curto-circuito está, a princípio, no fato de serem as correntes de carga normalmente muito menores do que as correntes de falta. E, como é lógico, não é este o caso quando se varia a susceptância de um compensador estático.

Uma aproximação mais razoável consiste justamente em se considerar as cargas como sendo compostas unicamente de impedâncias constantes, e as máquinas representadas por suas reatâncias subtransitórias, pois a análise que se fará aqui considera efeitos instantâneos de variação, onde predominam as constantes subtransitórias das máquinas síncronas. Esta técnica apresenta-se mais razoável, sem trazer nenhum prejuízo ao modelo, que continua composto por uma fonte de tensão em série com uma impedância pura.

Qualquer outra forma de representação de cargas , além das citadas anteriormente, adicionaria um elemento complicador não desejável para os cálculos simplificados que serão aqui apresentados e que pouco contribuiria para aumentar a precisão dos resultados perseguidos. Deve-se salientar que, após os primeiros cálculos manuais, recorre-se então a estudos digitais, ou mesmo analógicos, onde as condições de representação das cargas e dos demais elementos componentes de um sistema elétrico de potência podem ser sofisticadas ao máximo.

É ainda importante tecer mais alguns comentários sobre a utilização de $\bar{Z}_{cc}$ para o equivalente do sistema, pois em grande parte das aplicações será esta a informação disponível nos cálculos iniciais. Os sistemas de transmissão da atualidade são bem extensos, o que força a colocação de reatores nos terminais das linhas a fim de compensar cerca de 40 a 60% do carregamento "shunt" das mesmas para evitar problemas de sobretensões. Além disto, procura-se evitar o transporte de potência reativa pelas linhas, significando que as cargas têm suas necessidades de reativo compensadas localmente. Sendo assim, é de se supor que o balanço final entre indutâncias e capacitâncias "shunt" nos sistemas elétricos seja tal que haja um cancelamento de efeito, o que equivale dizer não existirem capacitores ou indutores ligados à terra, do ponto de vista de cálculo de uma impedância equivalente. E como o C.E. trabalha é com potência reativa, não se pode afirmar a priori que a utilização de $\bar{Z}_{cc}$ invalide os re

sultados. Pelo contrário, a princípio esta é uma aproximação razoável e que deverá levar a resultados não muito longe das reais necessidades do sistema elétrico de potência enfocado.

4.2 - As Equações e Curvas de Funcionamento a Regime Permanente

Esquematicamente, a união do compensador estático com o modelo de sistema adotado pode ser mostrada pela Figura 4.2.

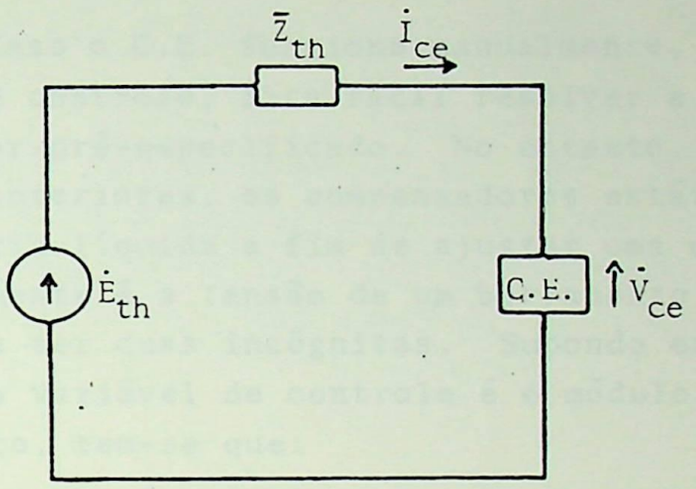


Figura 4.2 - União do equivalente de Thevénin com o Compensador Estático

A impedância de Thevénin é, para os sistemas elétricos de potência, eminentemente indutiva, o que significa que, caso o C.E. funcione como um capacitor (fornecendo reativo), a tensão $\dot{V}_{ce}$ seria maior que $\dot{E}_{th}$, e no caso de indutor (absorção de reativo), menor. Suponha-se, agora, que para um determinado valor de $\bar{Z}_{th}$ o compensador estático varie sua susceptância do máximo capacitivo ao máximo indutivo, sem preocupação com controle de tensão. Neste caso obtém-se a curva da Figura 4.3, que dá o módulo de $\dot{V}_{ce}$ em função do módulo de $\dot{I}_{ce}$.

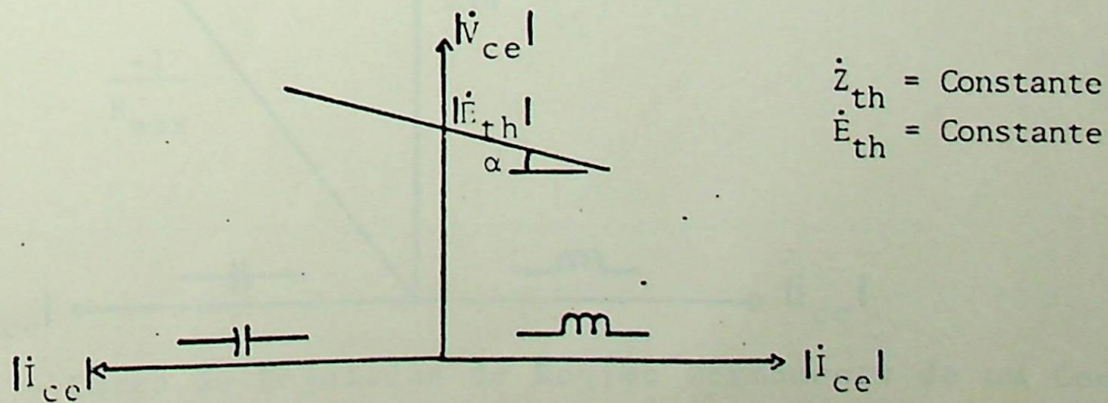


Figura 4.3 - Influência da variação de susceptância do C.E. na tensão de seu barramento para uma determinada condição de operação do sistema

Da Figura 4.2 pode-se tirar a equação fasorial que descreve a Figura 4.3.

$$\dot{V}_{ce} = \dot{E}_{th} - \bar{Z}_{th}\dot{I}_{ce} \quad (4.1), \text{ onde,}$$

$$\dot{I}_{ce} = \dot{V}_{ce} \times jB_{ce} \quad (4.2)$$

$$\text{Logo, } \dot{V}_{ce} = \dot{E}_{th}/(1 + jB_{ce} \times \bar{Z}_{th}) \quad (4.3)$$

Caso o C.E. funcione manualmente, isto é, sem um sistema automático de controle, fica fácil resolver a equação acima , pois B_{ce} será um valor pré-especificado. No entanto, como já ficou claro nos capítulos anteriores, os compensadores estáticos funcionam variando sua admitância líquida a fim de ajustar uma certa variável de controle, que normalmente é a tensão de um barramento. Sendo assim , a equação 4.3 passa a ter duas incógnitas. Supondo então, para o caso aqui analisado, que a variável de controle é o módulo da tensão do barramento do estático, tem-se que:

$$B_{ce} = f\ (|\dot{V}_{ce}|) \quad (4.4).$$

A variação do B_{ce} a fim de manter $|\dot{V}_{ce}|$ dentro de certos limites dá uma curva tensão versus corrente, que genericamente pode ser visualizada pela Figura 4.4 .

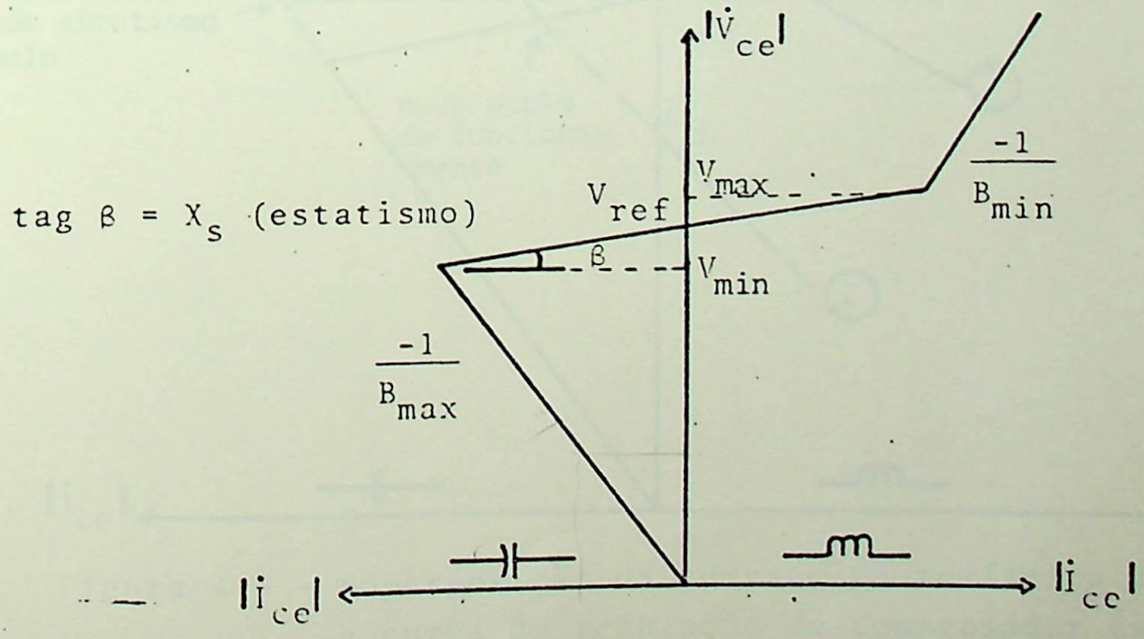


Figura 4.4 - Curva de Regulação de Regime Permanente de um Compensador Estático genérico

Esta curva é descrita pelas seguintes equações:

$$\text{se } |\dot{V}_{ce}| > V_{máx}: \quad \dot{V}_{ce} = \frac{\dot{I}_{ce}}{jB_{mín}} \qquad (4.5)$$

$$\text{se } V_{mín} \leq |\dot{V}_{ce}| \leq V_{máx}: \quad \dot{V}_{ce} = V_{ref} + jX_s\dot{I}_{ce} \qquad (4.6)$$

$$\text{se } |\dot{V}_{ce}| < V_{mín}: \quad \dot{V}_{ce} = \frac{\dot{I}_{ce}}{jB_{máx}} \qquad (4.7)$$

Das considerações acima, torna-se evidente que a solução para o ponto de funcionamento do compensador estático será dada pela superposição das curvas das Figuras 4.3 e 4.4, o que equivale dizer, pela equação 4.1 em conjunto com 4.5, ou 4.6, ou 4.7, conforme a situação.

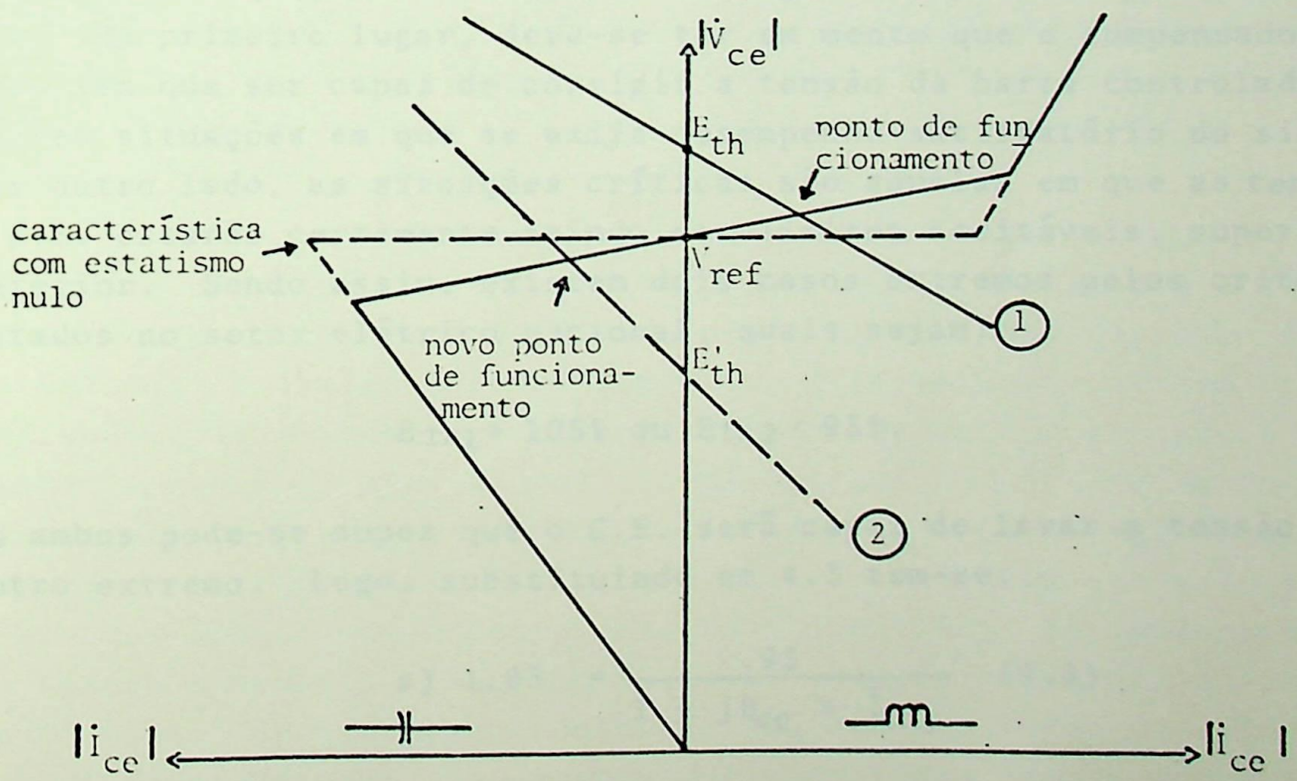


Figura 4.5 - Superposição da curva característica do sistema com a curva de regulação do Compensador Estático

É neste ponto que se começa a constatar a real forma de atuação do C.E., bem como as razões de algumas de suas características, como o estatismo. Qualquer alteração na configuração do sistema faz com que $\dot{E}_{th}$ e $\bar{Z}_{th}$ variem, significando, inicialmente, uma grande modificação em $\dot{V}_{ce}$, como pode ser visto no exemplo da Figura 4.5, quando o sistema muda da curva 1 para a 2. No entanto, devido a atuação do compensador, o novo ponto real de funcionamento não terá uma tensão muito diferente do antigo.

A diferença que existe entre as tensões dos pontos de funcionamento é ditada pelo estatismo "X_s". Caso este valor fosse nulo não haveria diferenças, mas seria muito mais fácil atingir os limites de susceptância do C.E. nas naturais variações da rede, pois as mudanças de susceptância exigidas seriam maiores, como mostra a Figura 4.5. Além deste importante papel, que dita a regulação do equipamento em regime permanente, o "X_s" também tem uma importante atuação na resposta dinâmica, como será mostrado nos capítulos seguintes.

A análise simplificada desenvolvida a partir do equivalente de Thevénin permite, também, verificar a adequacidade dos limites escolhidos para o C.E. Para tanto, bastará mais uma vez utilizar-se da equação 4.3, através de algumas hipóteses bastante realistas. Em primeiro lugar, deve-se ter em mente que o compensador estático tem que ser capaz de corrigir a tensão da barra controlada nas piores situações em que se exija desempenho satisfatório do sistema. Por outro lado, as situações críticas são aquelas em que as tensões sem o C.E. estarão certamente saindo dos limites aceitáveis, superior ou inferior. Sendo assim, existem dois casos extremos pelos critérios adotados no setor elétrico nacional, quais sejam:

$$E_{th1} > 105\% \text{ ou } E_{th2} < 95\%.$$

Em ambos pode-se supor que o C.E. será capaz de levar a tensão até o outro extremo. Logo, substituindo em 4.3 tem-se:

$$\text{a) } 1.\emptyset 5 = \frac{.95}{1 + jB_{ce} \times \bar{Z}_{th1}} \quad (4.8)$$

$$\text{b) } .95 = \frac{1.05}{1 + jB_{ce} \times \bar{Z}_{th2}} \quad (4.9)$$

seja ainda $\bar{Z}_{th} = jX_{th}$ (4.10), sendo X_{th} indutivo. Com isto obtém-se:

$$a)\ B_{ce} = \frac{0,095}{X_{th1}} \qquad (4.11)$$

$$b)\ B_{ce} = -\frac{0,105}{X_{th2}} \qquad (4.12)$$

Falando novamente em termos de potência de curto-circuito, supondo mais uma vez que a impedância de Thevénin possa ser substituída pela impedância de curto-circuito, as equações 4.11 e 4.12 levam a seguinte conclusão:

- As potências nominais de um compensador estático, inferior ou superior, não devem ser muito menores do que 10% das potências de curto-circuito que existirão nas situações em que eles serão necessários para corrigir os níveis de tensão de um extremo a outro da faixa admissível pelos critérios (± 5% do valor nominal foi o critério adotado no presente caso).

É claro que as conclusões acima só são válidas com base nas condições de contorno especificadas. Contudo, a metodologia apresentada é o ponto mais importante do que foi posto, pois ela continua válida em qualquer situação que apareça para primeiro estudo de dimensionamento de um compensador estático.

Conveniente se faz ainda ressaltar que a conclusão acima não é tão severa quanto pode parecer à primeira vista — valores nominais em cerca de 10% da potência de curto-circuito local . Na verdade, o limite máximo capacitivo é normalmente ditado para certas condições de emergência, onde o nível de curto-circuito é razoavelmente menor do que em configuração normal. O limite máximo indutivo deve-se basicamente a situações de rejeição ou energização. Nestas, não se exige que o C.E. consiga levar a tensão até o limite inferior, mas somente a certos níveis mais aceitáveis (normalmente 110% da tensão nominal). Isto também reduz consideravelmente a exigência da conclusão apresentada. Desta forma, deve-se reforçar a idéia de que os números acima são meramente ilustrativos, sendo importante uma análise específica para cada caso.

4.3 - Algumas Conclusões sobre o Comportamento Dinâmico

A metodologia simplificada apresentada

permite uma análise dinâmica detalhada do compensador estático, ou mesmo a determinação de alguns de seus parâmetros básicos.

No entanto, é possível chegar-se às orientações que permitirão estabelecer as premissas que deverão ser adotadas nos ajustes iniciais do sistema de controle de um C.E. Além disto, ver-se-á, de forma concreta, o porquê da importância do nível de curto-circuito do sistema no desempenho dos C.E.'s. Os propósitos acima são atingidos de forma bem simples, a partir da análise da equação 4.3 sob um novo prisma. Em primeiro lugar, considerando $\bar{Z}_{th}$ puramente indutivo, pode-se reescrever (4.3) da seguinte forma:

$$|\dot{V}_{ce}| = \frac{E_{th}}{1 - B_{ce} X_{th}} . \qquad (4.13)$$

Diferenciando, agora, esta equação com relação à B_{ce}, tem-se:

$$\frac{\partial |\dot{V}_{ce}|}{\partial B_{ce}} = E_{th} \frac{X_{th}}{(1 - B_{ce} X_{th})^2} . \qquad (4.14)$$

Considerando ainda que X_{th} pode ser aproximada pela impedância de curto-circuito, e que em p.u. o inverso desta fornece a potência de curto-circuito (S_{cc}), obtém-se:

$$\frac{\partial |\dot{V}_{ce}|}{\partial B_{ce}} \simeq E_{th} \frac{S_{cc}}{(S_{cc} - B_{ce})^2} \qquad (4.15)$$

Após isto, diferencia-se 4.13 com relação a X_{th}.

$$\frac{\partial |\dot{V}_{ce}|}{\partial X_{th}} = E_{th} \frac{B_{ce}}{(1 - B_{ce} X_{th})^2} \qquad (4.16)$$

Ou, ainda,

$$\frac{\partial |\dot{V}_{ce}|}{\partial X_{th}} \simeq E_{th} \frac{B_{ce} S_{cc}^2}{(S_{cc} - B_{ce})^2} . \qquad (4.17)$$

Recordando a conclusão do item 4.2, que recomenda adotar-se a potên

cia do C.E. não menor que 10% de S_{cc}, e contando com o fato de que sempre se procura dimensionar um equipamento dentro das necessidades, e não além delas, é possível supor que $S_{cc} >> B_{ce}$. Com isto, a equação 4.15 pode ser novamente aproximada para:

$$\frac{\partial |\dot{V}_{ce}|}{\partial B_{ce}} \simeq \frac{E_{th}}{S_{cc}} . \qquad (4.18)$$

Da mesma forma, aproxima-se 4.17 por:

$$\frac{\partial |\dot{V}_{ce}|}{\partial X_{th}} \simeq E_{th} \; B_{ce} . \qquad (4.19)$$

De 4.18 chega-se à importante conclusão, que já vinha sendo referida e utilizada desde o começo deste trabalho, de que realmente a atuação do compensador estático depende muito do nível de curto-circuito do seu ponto de instalação. O efeito da variação da susceptância do C.E. na tensão do seu barramento é inversamente proporcional a S_{cc}. Logo, em sistemas com altos níveis de curto-circuito será necessária uma grande faixa de variação da susceptância do estático, a fim de que ele possa ser efetivo.

Outro ponto importante a se considerar é que os sistemas elétricos não apresentam sempre um mesmo S_{cc}. Durante contingências de linhas de transmissão, geradores, compensadores síncronos, compensação série, etc., é normal que se verifiquem níveis de curto-circuito bem abaixo daqueles em condições normais. Por outro lado, é justamente durante as principais contingências do sistema que os suportes controláveis de reativo se fazem mais importantes, seja simplesmente para controlar as tensões ou até mesmo para garantir a estabilidade entre sistemas de geração interligados. Sendo assim, o compensador estático deve estar ajustado para responder da forma mais eficiente possível durante os defeitos. Utilizando-se mais uma vez da equação 4.18, vê-se que ajustando o controle do C.E. para responder adequadamente em situações com baixos S_{cc}, em condições normais ele atuará mais lentamente. Caso se proceda de maneira inversa, o sistema de controle do estático responderá rápido demais durante contingências, podendo acarretar "over-shoots", ou mesmo prejudicar a estabilidade do sistema. Por estas razões, é usual regular o C.E. para que ele tenha a resposta ideal durante os defeitos mais críticos, ou seja, com menores níveis de curto-circuito.

Já as conclusões que podem ser tiradas a partir

de 4.17 ou 4.19 devem ser vistas com bastante reserva, pelas razões apresentadas a seguir. O equivalente de Thevénin, como foi explicado no início do capítulo, admite uma determinada configuração da rede , com um determinado despacho das unidades geradoras e uma determinada carga na barra do C.E. Nestas condições, diz-se que $\dot{E}_{th}$ é a tensão da barra do compensador quando este tem sua susceptância nula. Por esta definição, vê-se que uma mudança de configuração na rede certamente influenciará em $\dot{E}_{th}$. Logo, tem-se que a tensão de Thevénin é função de X_{th}. E como as deduções aqui mostradas consideraram $\dot{E}_{th}$ constante, é de se esperar uma certa fragilidade das equações agora em questão.

Apesar de tais limitações, é possível chegar-se a algumas conclusões úteis a partir de 4.19. A principal delas é que a tensão $\dot{V}_{ce}$ tem uma taxa de variação aproximadamente constante com relação às alterações da rede. Isto implica no fato de que o ajuste do sistema de controle do C.E., feito para os maiores X_{th}, não deixarão de atender as necessidades do sistema em outras situações menos prejudiciais. Além disto, fica evidente que para as naturais variações de carga, o que implica em pequenas variações em X_{th}, o C.E. poderá atender com presteza suas funções. Um segundo ponto interessante é a dependência da taxa de variação de $\dot{V}_{ce}$ com o ponto de funcionamento do compensador estático. Este fato é bastante importante durante rejeições de carga, pois mostra que poderão existir sobretensões instantâneas independente da rapidez de atuação do C.E. Para evitar este tipo de problema faz-se necessário um esquema de proteção e controle que evite a ida da susceptância do estático para valores elevados em situações de provável rejeição de carga.

4.4 - Conclusões

Este capítulo serviu para mostrar, de forma objetiva e suscinta, a forte interação entre um compensador estático e o sistema elétrico a que ele é conectado. Apesar da simplicidade do método utilizado — o equivalente de Thevénin — viu-se de forma bem clara que o compensador estático depende muito dos níveis de curto-circuito de seu local de instalação, tanto para determinar suas susceptâncias máxima e mínima, quanto para ajustar o sistema de controle. No caso dos limites, a análise desenvolvida levou a resultados quantitativos que servem como primeira aproximação, devendo haver confirmação através de simulações de fluxo de carga. Já com relação ao sistema de controle, ou seja, quanto ao desempenho dinâmico do C.E. , os resultados foram apenas qualitativos, indicando que a melhor situação para ajuste dos parâmetros dos estáticos será aquela em que o nível de curto-circuito for mais baixo.

Por fim, é importante alertar que a metodologia de análise utilizada emprega uma série de simplificações, sendo, portanto, recomendável sua aplicação apenas em algumas considerações iniciais, não podendo jamais substituir estudos e simulações mais completos.

CAPÍTULO 5

MODELAGEM DOS COMPENSADORES ESTÁTICOS PARA SIMULAÇÕES DIGITAIS

O tratamento dado nos nos capítulos anteriores aos compensadores estáticos sempre referiu que a escolha de uma determinada combinação de unidades controláveis ou fixas, seus valores nominais, filtros e até mesmo a definição entre um C.E. e outros tipos de compensação reativa, dependem de uma série de estudos. E, na maioria das vezes, estes estudos serão realizados através de simulações por computadores digitais. As simulações analógicas — bem mais caras e trabalhosas — ficam para um ajuste final dos equipamentos adotados, isto após uma série de parâmetros já estarem convenientemente definidos . Sendo assim; é de extrema importância que sejam vistos os principais modelos de compensadores estáticos para os mais importantes estudos digitais exigidos — incluindo suas vantagens, limitações, área de aplicabilidade, etc.

Neste capítulo, serão discutidos os modelos aplicáveis aos seguintes estudos:

. Fluxo de carga
. Curto-Circuito
. Penetração harmônica
. Simulações dinâmicas à freqüência industrial
. Transitórios eletromagnéticos à freqüência natural.

Deve-se salientar que o assunto principal deste trabalho é a modelagem de C.E.'s para estudos dinâmicos. Desta forma, este item será desenvolvido com muito mais detalhes que os demais . Contudo, não seria possível deixar de incluir rápidas explanações sobre os outros tipos de estudo, com referências bibliográficas adequadas, sob pena de deixar lacunas de informações no escopo global do que vem sendo apresentado.

5.1 - Modelagem para Estudos de Fluxo de Carga

Os estudos de fluxo de carga refletem o estado de um sistema elétrico de potência para uma determinada configuração de

res estáticos, o que se faz é determinar o ponto de operação dado pelo cruzamento da curva V X I do C.E. com a curva V X I da barra do C.E., conforme mostrado na Figura 4.5 do Capítulo 4. No entanto, os programas comumente usados para fluxo de carga não têm como simular a curva V X I de um C.E. diretamente. Eles contam apenas com três tipos de representação de barras, que têm condições de representar os equipamentos tradicionais de compensação de reativo. Estes tipos são:

. Barra δ - V - Chamada de barra "swing", é aquela que fornece a referência angular do sistema e compensa o balanço de potência ativa, tendo fixos, portanto, o ângulo e a tensão;

. Barra P - V - É a barra onde são colocados os compensadores síncronos ou geradores. Ela mantém fixas sua tensão e sua potência ativa;

. Barra P - Q - É a barra de carga. Mantém fixas as potências ativa e reativa.

Além destas características, os programas de fluxos de carga podem simular os limites de geração e absorção de uma unidade síncrona, tornando uma barra P - V em uma barra P - Q quando um dos limites é atingido, mantendo a potência reativa fixa no valor violado. E mais, a compensação "shunt" (reatores e capacitores fixos) é representada como impedância constante através de sua inclusão na matriz de admitâncias do sistema.

Do exposto, vê-se que existem limitações para representar corretamente um compensador estático dentro de um fluxo de carga. Em primeiro lugar, o controle de tensão de um barramento só pode ser feito deixando-a fixa e não controlada dentro de determinados limites. Logo, não há, a princípio, como representar o estatismo. Isto não se constitui, no entanto, num grande problema. O estatismo é, normalmente, da ordem de 2 a 4%. Desta forma, admitir-se que dentro da faixa nominal de controle de um C.E. ele mantém a tensão fixa, é uma aproximação bastante razoável, não comprometendo em nada os resultados de uma simulação de fluxo de carga, principalmente em estudos de planejamento. Logo, representar o C.E. por uma barra P - V dentro de sua faixa nominal é uma forma aceitável de incluí-lo num fluxo

Por outro lado existem estudos, principalmente operativos, que necessitam bastante da representação do estatismo. Isto ocorre em situações onde se procura definir uma estratégia ótima de reserva de potência reativa dentro do sistema. A determinação adequada dos estatismos dos diversos C.E.'s da rede propiciará uma distribuição equitativa do suprimento ou absorção de reativo durante as condições normais e emergências. Isto evita mesmo que um C.E. venha a gerar em demasia enquanto outro, próximo à área do primeiro, possa estar flutuando ou, ainda, absorvendo potência reativa. Para estes casos, o compensador estático pode ser representado conforme a Figura 5.1.

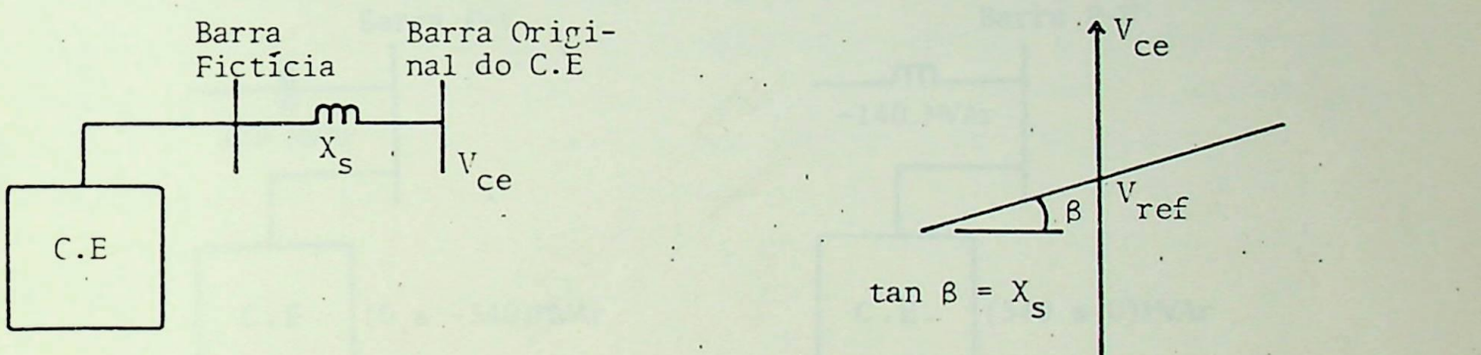
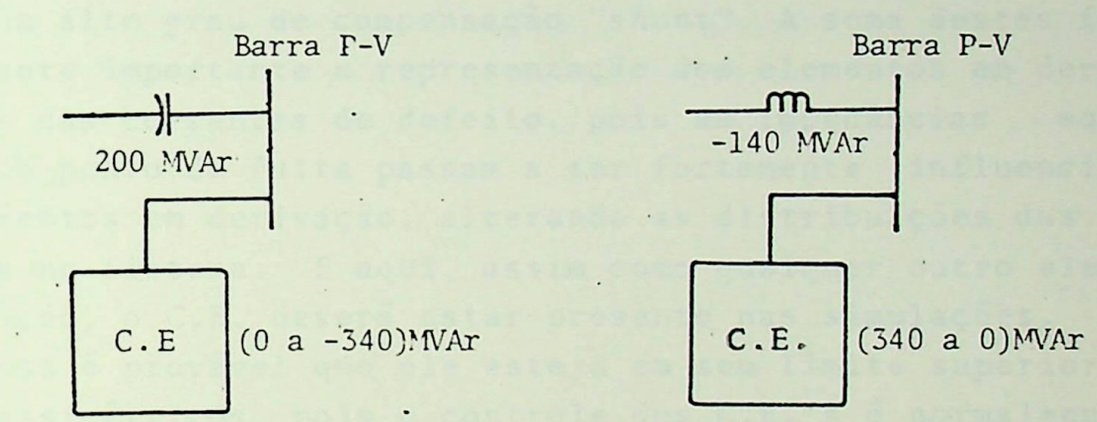


Figura 5.1 - Representação de Compensadores Estáticos com estatismo em Fluxo de Carga

Nesta representação, a barra fictícia será do tipo P - V, tendo sua tensão controlada no valor da tensão de referência do C.E.. X_s será uma reatância indutiva de valor porcentual igual ao valor porcentual do estatismo, referidos a uma mesma base de potência. A barra originalmente controlada pelo C.E. passa agora a ser uma barra de carga comum (P - Q). Assim, é facilmente verificável que quando o C.E. estiver absorvendo reativo a tensão da sua barra original será maior que a tensão de referência, e quando gerando será menor. O quanto maior ou menor, isto é ditado por X_s. Logo, tem-se realmente a simulação da característica V x I do C.E. dentro de sua faixa nominal.

O problema seguinte que pode se apresentar para simular um C.E. em fluxo de carga dá-se quando um dos limites nominais é atingido. Se o compensador estático contar com um sistema de controle que limite sua geração ou absorção de reativo ao valor nomi

potência constante, não haverá problemas, pois é assim que o fluxo de carga faz normalmente. No entanto, a maioria dos C.E.'s tornam-se uma impedância fixa ao atingirem um de seus limites. E esta condição não há como representar-se diretamente no programa. Para resolver isto, tem que se ter uma idéia inicial de como será exigido o compensador. No caso dele vir certamente a gerar reativo, o mais interessante a fazer é colocar seu limite capacitivo como uma impedância fixa na barra e subtrair dos limites originais esta quantidade de reativo. Por exemplo, suponha-se um C.E. de +200, -140 MVAr. Ele pode ser simulado como um capacitor fixo de 200 MVAr e os seus limites controlados de reativo serão de 0 a -340 MVAr. A Figura 5.2 mostra o esquema deste exemplo tanto para geração quanto absorção máximas.



a) Exigência provável de geração máxima

b) Exigência provável de geração mínima

Figura 5.2 - Representação de Compensadores Estáticos em fluxos de Potência que poderão exigir um de seus limites

Do que foi apresentado fica claro que não existe, na maioria dos programas de fluxo de carga existentes, uma forma precisa de representação de compensadores estáticos. No entanto, conforme as reais necessidades, e conhecendo-se um pouco do provável comportamento dos casos a serem simulados, é possível lançar-se mão de artifícios que permitam representar um C.E. com o nível de detalhes requerido, a fim de que sua característica real de funcionamento (curva V x I) seja reproduzida quase que totalmente. Vale salientar que tais recursos dão resultados tão satisfatórios que, até o momento, não se pensou em incluir um modelo específico de C.E. nos programas de fluxo de carga usados no setor elétrico.

5.2 - Modelagem para Estudos de Curto-Circuito

Os cálculos de curto-circuito, conforme já abordado no Capítulo 4, normalmente desprezam os elementos passivos "shunt" existentes na rede. Isto se deve ao fato de que as correntes de falta são normalmente muito maiores do que as correntes de carga em condições normais (Referência 11). Desta forma, sendo os compensadores estáticos um tipo especial de equipamento, que não deixa de ser um elemento passivo "shunt" como qualquer outro, não há necessidade de representá-lo na maioria das simulações de curto-circuito.

Por outro lado, existem sistemas com níveis de curto-circuito tão baixos que a relação corrente de carga/corrente de falta já não é insignificante. Normalmente estes sistemas contam ainda com um alto grau de compensação "shunt". A soma destes fatores torna bastante importante a representação dos elementos em derivação nos cálculos das correntes de defeito, pois as impedâncias equivalentes vistas do ponto de falta passam a ser fortemente influenciadas pelos elementos em derivação, alterando as distribuições das correntes de falta no sistema. E aqui, assim como qualquer outro elemento de compensação, o C.E. deverá estar presente nas simulações. Como em tais casos é provável que ele esteja em seu limite superior, mesmo em curtos assimétricos, pois o controle dos C.E.'s é normalmente trifásico, pode-se representá-lo por sua reatância capacitiva limite, tanto em seqüência positiva, quanto negativa e zero, dependendo do tipo de ligação das mesmas. Quando o limite do C.E. não for atingido, deve-se pesquisar o ponto médio de operação em que o C.E. estará durante a falta, e então colocar uma impedância correspondente a tal ponto .

A modelagem do parágrafo anterior é válida para programas que utilizam componentes simétricas e, portanto, ainda não têm um alto grau de precisão. Quando se deseja resultados mais apurados, como para ajustes de relés por exemplo, será necessário recorrer a uma representação trifásica do sistema, e portanto do compensador estático. E aí, caso o controle seja monofásico e não se tenha certeza de violação de um dos limites, ter-se-á que fazer um método de tentativa e erro na representação do C.E., que continuará a ser por impedância constante.

Outra forma de se obter grande precisão é realizar o estudo de curto-circuito num programa de simulação eletromagnética, que comporta o mais detalhado modelo de compensador estático possível, como será discutido mais adiante, no item 5.5.

Para concluir, vale ressaltar que a grande maioria dos casos de curto-circuito a serem estudados caem nas considerações iniciais deste item, ou seja, não há necessidade de representar os compensadores estáticos.

5.3 - Modelagem para Estudos de Penetração Harmônica

Conforme já ficou patente no Capítulo 2, existem possibilidades de um compensador estático introduzir distorções harmônicas dentro de um sistema elétrico. Mais especificamente, se o C.E. contar com um reator controlado por tiristores ou, em menor escala, com um reator de núcleo saturado, ele certamente introduzirá correntes harmônicas. Desta forma, o C.E. deverá ser modelado como uma fonte de corrente que injete no sistema seus mais críticos níveis de correntes para cada freqüência harmônica. Maiores detalhes quanto a obtenção dos níveis de harmônicas características e não características, bem como a modelagem exata da fonte de corrente, podem ser obtidos na Referência 12.

Neste item pretende-se mais especificamente discutir alguns pontos a serem considerados nos estudos harmônicos. Em primeiro lugar, existem normas que estabelecem índices a serem obedecidos relativamente às distorções de tensão e corrente (para o Brasil, ver Referência 13). Estes limites visam evitar que cargas desequilibradas ou distorcidas prejudiquem sistemas de comunicação telefônica, o abastecimento aos demais consumidores, etc. Desta forma, os estudos de compensadores estáticos devem visar eliminar qualquer efeito que ele individualmente possa trazer ao sistema ou ao seu próprio funcionamento. Para tanto, é provável que filtros devam ser instalados e sintonizados de forma a eliminar as harmônicas que violem os critérios de suprimento.

Além disto, é importante verificar que o C.E. não viole os critérios considerando não só a sua injeção de correntes harmônicas, mas também a dos outros consumidores, pois ele não é um consumidor, mas sim um equipamento instalado pela concessionária a fim de melhorar a sua qualidade de serviço. Isto implica que o C.E. terá, certamente, que atender os critérios individuais e os critérios dos vários geradores de harmônicos em conjunto. Pode ser que ocorram casos em que seja desvantajoso corrigir no próprio conjunto de filtros do compensador estático um problema de distorção de todos os consumidores. No entanto, isto deve ser verificado, bem como apontada a melhor solução técnica e econômica.

Além das exigências acima, um outro item de importância é a configuração da rede a ser considerada. Não se pode simplesmente utilizar a curva de impedâncias harmônicas na barra do C.E. É importante verificar a possível ocorrência de pontos de ressonâncias em barras distantes. De preferência uma representação detalhada do sistema seria o ideal. No entanto, como nem sempre isto é possível, deve-se ter certeza que os equivalentes sejam colocados em locais onde a influência do C.E. já seja desprezível. E a configuração utilizada para determinação do desempenho individual do compensador deverá ser utilizada também para se considerar as outras fontes harmônicas.

Concluindo, vale reforçar o ponto de que os estudos de penetração harmônica para os compensadores estáticos, embora não incluam nenhuma técnica nova, devem levar em conta os consumidores e outros equipamentos que também sejam fontes de harmônica, a fim de que o C.E. possa contribuir para manutenção dos índices aceitáveis de distorções totais.

5.4 - Modelagens para Simulações Dinâmicas à Freqüência Industrial

O assunto a ser desenvolvido neste item servirá de base para os capítulos seguintes deste trabalho, com vistas à adaptação em um programa digital de simulação dinâmica à freqüência industrial de modelos de compensadores estáticos. O primeiro ponto a ser abordado em tal sentido consiste na discussão do objetivo dos modelos a serem formados.

Em primeiro lugar, é evidente do que já foi apresentado até aqui que os compensadores estáticos têm um comportamento dinâmico que não é instantâneo. A resposta desses equipamentos terá sempre uma constante de tempo mínima que dependerá dos sistemas de medição, controle e disparo, ou ainda das características intrínsecas dos equipamentos usados. Sendo assim, é razoável partir-se do princípio de que os C.E.'s podem ter sua atuação dinâmica descrita por equações diferenciais. E mais, como é costume dentro dos programas digitais trabalhar-se com sinais de erros, representando máquinas e controles por diagramas de blocos, nada mais normal do que procurar adaptar os modelos dos C.E.'s a este tipo de representação.

Além do tratamento matemático, é de interesse saber que tipos de sinais serão adotados como entrada e saída dos modelos. Sendo os estáticos equipamentos que atuam essencialmente como reguladores de tensão, nada mais natural do que tomar a tensão de seu barramento controlado como principal entrada. No entanto, os siste

mas de controle podem admitir ainda uma série de sinais adicionais (corrente, potência, freqüência, etc.) que auxiliarão no desempenho do compensador. Por isto, todos os modelos tratarão a tensão como sinal de controle, mas não descartarão a hipótese de entrada de outros sinais. Quanto ao sinal de saída, já foi bastante discutido o fato dos C.E.'s serem tratados como susceptâncias variáveis. Assim, é natural que, a princípio, a saída dos modelos seja trabalhada de forma a mostrar uma susceptância, desde que isto não venha contra o equacionamento básico do programa.

Por fim, antes de tratar dos modelos propriamente ditos, deve-se definir o grau de complexidade que será dado a cada modelo. Como se sabe, as simulações à freqüência industrial, por tratarem fenômenos de grande complexidade de forma mais objetiva, simples e rápida, assumem normalmente uma série de simplificações. Algumas delas são:

- Representação de linhas por parâmetros concentrados;
- Impedâncias não variam com a frequência;
- Supõem que o sistema esteja equilibrado, representando somente os dados de seqüência positiva;
- As equações diferenciais das máquinas síncronas são simplificadas;
- A maioria dos equipamentos são considerados não saturáveis;
- Não se tem um conhecimento preciso do comportamento das cargas.

Além das simplificações adotadas, deve-se ter em mente que tais programas consideram todos os elementos da rede (reatores , capacitores, cargas, linhas, etc.) como estando em regime permanente a cada passo de integração. Sendo assim, não há sentido em se representar os fenômenos transitórios dos componentes físicos dos C.E.'s, ficando todo o trabalho de modelagem concentrado no sistema de controle.

Adotanto então esta linha de modelos simples e genéricos, pode-se dividir os compensadores estáticos, ou mais especificamente, suas unidades variáveis, em duas partes: os C.E.'s com controle externo e os C.E.'s com controle intrínseco. Como foi visto no Capítulo 3, não existe motivo teórico que não permita a junção destes dois tipos de unidades variáveis num único compensador [illegible]

o presente não se tem referência sobre a junção dos mesmos. Portanto, a divisão adotada é bastante prática, e é a partir dela que serão desenvolvidos os modelos dinâmicos.

5.4.1 - Modelos Dinâmicos para Compensadores Estáticos com Controle Externo

Os compensadores estáticos com controle externo são constituídos por reatores controlados por tiristores e/ou capacitores chaveados por tiristores. O comando de regulagem das unidades variáveis chega até seus tiristores através de circuitos eletrônicos que, embora considerem as características básicas dos elementos que controlam, não têm nenhuma ligação direta com os mesmos. É por isto que tais tipos de C.E. são classificados como de controle externo.

Para efeito de análise, os controles externos de compensadores estáticos podem ser divididos basicamente em três partes distintas:

. Sistema de Medição
. Sistema de Regulação
. Sistema de Disparo.

Cada um destes sistemas, que serão detalhados a seguir, para executarem seus objetivos necessitam de uma série de equipamentos e circuitos eletrônicos, confeccionados em cartões removíveis do painel de controle. Cada cartão lida com muito mais dados e informações do que pode parecer a princípio, e cada circuito dentro do cartão tem suas respostas e constantes de tempo características. De forma genérica, a interligação entre os três sistemas pode ser dada pela Figura 5.3.

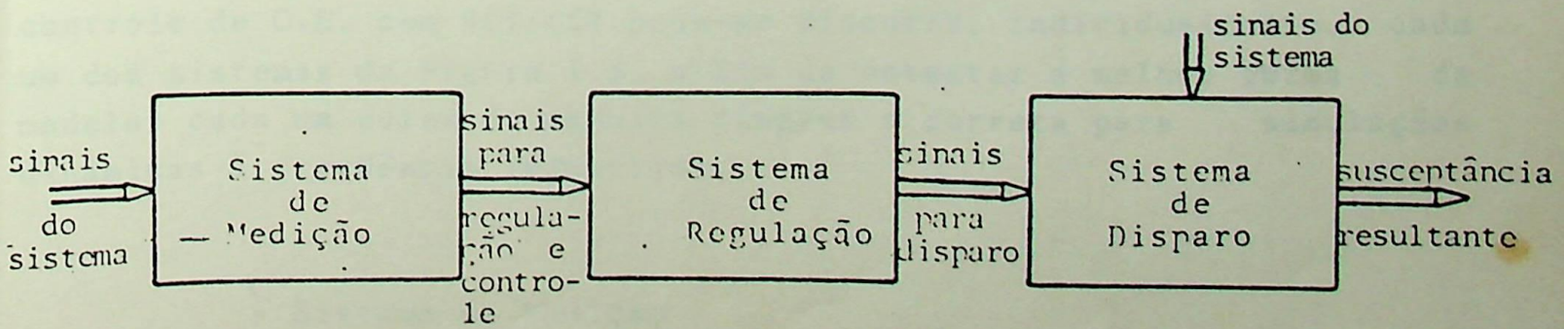


Figura 5.3 - Esquema básico de controle de um Compensador Estático com controle externo

Antes de iniciar a explanação detalhada da Figura 5.3, deve-se ressaltar que a presente apresentação tratará, a princípio, de um C.E. com reator controlado por tiristores e capacitor chaveado por tiristores, por ser o controle mais genérico e completo. No final deste item serão vistas as particularizações que levam à modelagem dinâmica de unidades com um só tipo de susceptância variável.

O sistema de controle do tipo de C.E. ora estudado normalmente atua como regulador de tensão. Neste sentido ele monitora a tensão da barra controlada através do sistema de medição, que transforma os sinais recebidos em sinais compatíveis com a eletrônica do sistema de regulação. Tais sinais são usualmente gerados de forma a refletir a condição trifásica do sistema, seguindo a filosofia da maioria dos compensadores estáticos de sistemas de potência, que é exercer um controle trifásico. Após este passo, o sistema de regulação compara o sinal proporcional à tensão do barramento com um sinal proporcional à tensão de referência (usualmente ajustável entre +5 e -10% da tensão nominal da barra controlada). O erro desta comparação é levado a um amplificador que tem como saída a variação da susceptância total do C.E. O regulador controla, ainda, através de outros sinais vindos do sistema de medição, a condição de operação dos capacitores e dos reatores. A partir destes dados, verifica-se a necessidade ou não de chavear bancos de capacitores a fim de atender a susceptância oriunda do erro de tensão, mantendo uma margem de folga no ângulo de disparo do reator, desde que possível, certamente. Com isto, os sinais que saem do sistema regulador indicam a necessidade ou não de chavear-se capacitor(es), bem como a susceptância que deverá assumir o conjunto de reatores. O sistema de disparo recebe estes sinais e, através de unidades de sincronismo, faz com que os pulsos de disparo dos tiristores sejam enviados nos instantes adequados para cada uma das fases, de forma a satisfazer as condições de disparo nos pontos das ondas de tensão que não causem distúrbios ao sistema nem prejudiquem os equipamentos, conforme discutido no Capítulo 2.

Após esta suscinta descrição do funcionamento do controle de C.E. com RCT/CCT pode-se discutir, individualmente, cada um dos sistemas da Figura 5.3, a fim de detectar a melhor forma de modelar cada um deles de maneira simples e correta para simulações dinâmicas à freqüência industrial.

- Sistema de Medição

corrente da barra controlada e da barra do C.E. através de enrolamentos secundários de transformadores de potencial e corrente. A partir daí estes sinais são trabalhados de diversas formas, que dependem da filosofia de projeto de cada fabricante, a fim de fornecer os dados necessários ao exato controle do C.E. De maneira geral pode-se precisar, independentemente do fabricante, algumas das principais funções do sistema de medição. Em primeiro lugar, é comum que os sinais de tensão das fases da barra controlada sejam tratados de maneira a fornecer um único sinal para formação do erro de controle. A forma mais usual de se conseguir isto é transformando os sinais alternados em um único sinal contínuo. Para tanto, retifica-se a tensão de cada fase por uma ponte de onda completa, composta por elementos ativos. A soma das saídas retificadas de cada fase dará um sinal equivalente à retificação através de uma ponte de seis pulsos, das tensões das três fases da barra controlada.

O sinal contínuo, assim obtido, apresenta ainda um "ripple" de freqüência 6 vezes maior que a da tensão controlada. Para diminuir o efeito desta perturbação, acopla-se ao somador das três fases retificadas um filtro, em geral um passa baixa. Esta melhoria do sinal contínuo, necessária para o sistema de controle, tem como desvantagem a introdução de um retardo da ordem de 2 a 5 milisegundos no processo de retificação. De forma esquemática, a medição descrita é dada pela Figura 5.4.

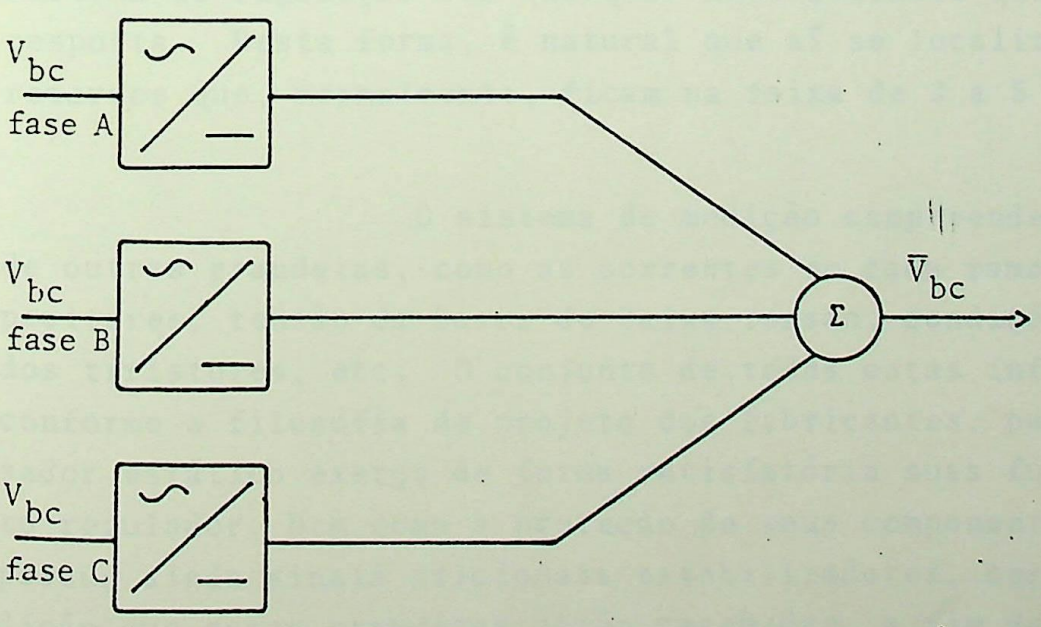


Figura 5.4 - Obtenção do sinal contínuo proporcional à tensão da barra controlada

A utilização de pontes retificadoras ativas nestes tipos de medição visam eliminar as quedas de tensão existentes em pontes de diodos. Com isto, pretende-se eliminar as possíveis diferenças nas características dos diodos, evitando o mascaramento de perturbações na tensão da barra controlada.

Outra importante medida tomada do compensador estático é a corrente reativa fundamental intercambiada com o sistema. A partir desta informação é que vários tipos de controle (ASEA, SIEMENS, CGEE-ALSTHOM) geram o estatismo do C.E. A maneira usual de se obter este sinal é através da multiplicação de uma tensão proporcional à corrente, e em fase com esta, por uma tensão 90^{o} adiantada em relação à tensão da barra controlada. Esta operação produz um sinal de tensão contínua com um "ripple" de duas vezes a freqüência do sistema. Procedendo-se a seguir a soma deste sinal com sinais equivalentes das duas outras fases, demonstra-se facilmente que o sinal resultante é proporcional à corrente reativa, e será puramente contínuo. Logo, a reprodução da corrente do C.E. no sistema de controle é feita de forma indireta, e objetiva chegar-se a um sinal de tensão contínua proporcional à parte reativa da corrente. Este sinal chamado I_{ce} reflete a situação média das três fases, sendo positivo para operação capacitiva do C.E., e negativo para operação indutiva.

A obtenção das grandezas acima é feita através de uma série de circuitos eletrônicos que, na maioria dos fabricantes consultados, exigem filtros para que os sinais de controle cheguem ao sistema de regulação sem qualquer interferência que prejudique sua resposta. Desta forma, é natural que aí se localizem alguns pequenos retardos que, normalmente, ficam na faixa de 2 a 5 milisegundos.

O sistema de medição compreende ainda uma série de outras grandezas, como as correntes em cada ramo dos reatores e capacitores, tensão da barra de baixa tensão, condições de temperatura dos tiristores, etc. O conjunto de todas estas informações é usado, conforme a filosofia de projeto dos fabricantes, para que o compensador estático exerça de forma satisfatória suas funções de equipamento regulador, bem como a proteção de seus componentes. Caso o C.E. possua ainda sinais adicionais estabilizadores, será no sistema de medição que essas grandezas serão recebidas, a fim de gerar os sinais compatíveis com a eletrônica de comando, utilizando-se de recursos similares aos já descritos.

Por fim, para completar as noções de tempo de retardo do sistema de medição, vale ressaltar que os sinais obtidos da

alta tensão passam por divisores capacitivos, filtros de freqüências indesejáveis para os sistemas de controle (conforme Referência 14) , etc. Considerando a constante de tempo mais significativa(polo dominante) dos sistemas de retificação e amplificação, estima-se um retardo da ordem de 15 a 20 milisegundos nos sistemas de medição dos compensadores estáticos. A representação deste efeito dentro da modelagem do C.E. por diagramas de bloco pode ser feita por um polo com constante de tempo T_m, como mostra a Figura 5.5

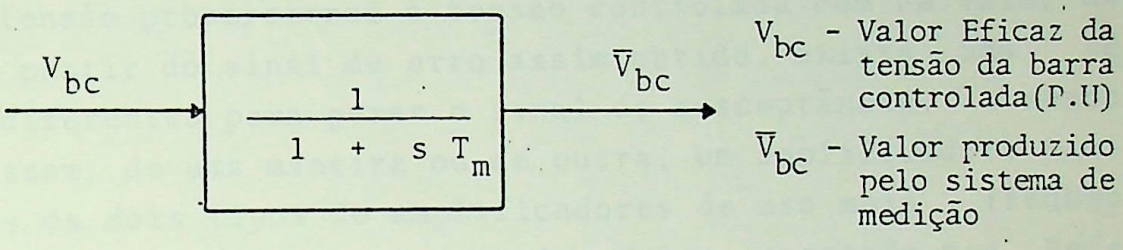


Figura 5.5 - Representação do retardo da medição por diagrama de blocos

A razão da adoção de V_{bc} como um valor em p.u. da tensão eficaz do barramento controlado se deve à forma de representação dos sistemas elétricos em programas de estabilidade. Eles trabalham somente com a representação da seqüência positiva e em valores por unidade.

- Sistema de Regulação

Para os propósitos deste item, ou seja, obtenção de modelos de compensadores estáticos para simulações dinâmicas à freqüência industrial, o sistema de regulação é, sem dúvida alguma, o quesito de maior interesse. É ele quem determina o desempenho do C.E. frente a perturbações no sistema, e é nele que se encontram os parâmetros passíveis de ajuste. Sendo assim, é natural que o presente trabalho passe a dedicar uma especial atenção a este ponto.

Como já foi dito no início, o sistema de regulação pode ser dividido numa parte que cria o valor de susceptância necessária para o C.E. exercer seu papel controlador, e numa segunda que trabalha com o valor gerado na primeira parte e determina a parcela de susceptância que caberá aos capacitores chaveáveis e qual caberá aos reatores controláveis. Quanto à modelagem da primeira parte, ela é ditada basicamente pela filosofia de controle adotada por cada fabricante, sendo nela que se encontra o regulador propriamente dito. Por isto, esta parte será chamada de regulador de tensão, e será agora abordada com maiores detalhes.

O regulador de tensão inicia sua função comparando o sinal de tensão proporcional à tensão controlada com um valor de referência. A partir do sinal de erro assim obtido, existe uma série de formas diferentes para gerar o sinal de susceptância, sendo que todos utilizam, de uma maneira ou de outra, um amplificador. Aqui serão abordados os dois tipos de amplificadores de uso mais freqüente nos compensadores estáticos. O primeiro deles, apontado nas Referências 10 e 15, utiliza basicamente uma filosofia que consiste de um circuito com um polo de constante de tempo T e ganho K e dois circuitos "lead-lag" em série com o primeiro. A finalidade destes dois últimos é de ajustar as margens de fase e de ganho do C.E. dentro do sistema de forma a evitar instabilidade e, o mais importante, até mesmo aumentar a estabilidade através do amortecimento de oscilações dinâmicas existentes. Em termos de diagrama de blocos, este regulador é dado pela Figura 5.6.

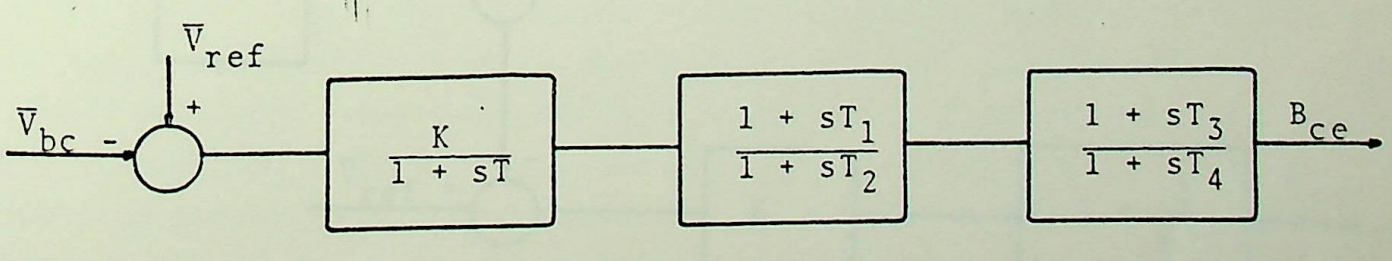


Figura 5.6 - Representação de um regulador de tensão linear por diagrama de blocos

Reguladores com este tipo de filosofia são ditos lineares Outra característica importante é que o estatismo da curva V x I de regime permanente é dado pelo ganho do amplificador. As funções de transferência que compõem a Figura 5.6 formam um sistema do tipo 0, isto é, para uma entrada em degrau haverá um erro de regime permanente, que é função de K. É este erro que possibilita a existência do estatismo em reguladores com esta filosofia. Mais adiante, quando o modelo do C.E. ficar completo e forem discutidas suas constantes, o assunto do estatismo voltará a ser analisado.

A outra filosofia de construção do circuito amplificador, a ser enfocada, consiste em se utilizar um arranjo que o torne um controle do tipo proporcional integral (PI). Neste caso, o sistema regulador não terá como produzir o estatismo por suas próprias características, pois um circuito PI não apresenta erro de regime. Por esta razão, e tendo em conta a necessidade do estatismo, recorre-se à criação de um sinal proporcional à corrente reativa do C.E. a fim de obter-se o estatismo. Tal recurso é conhecido por "droop" de corrente. A representação por diagrama de blocos deste caso é dada na Figura 5.7, conforme as Referências 16, 17 e 18 .

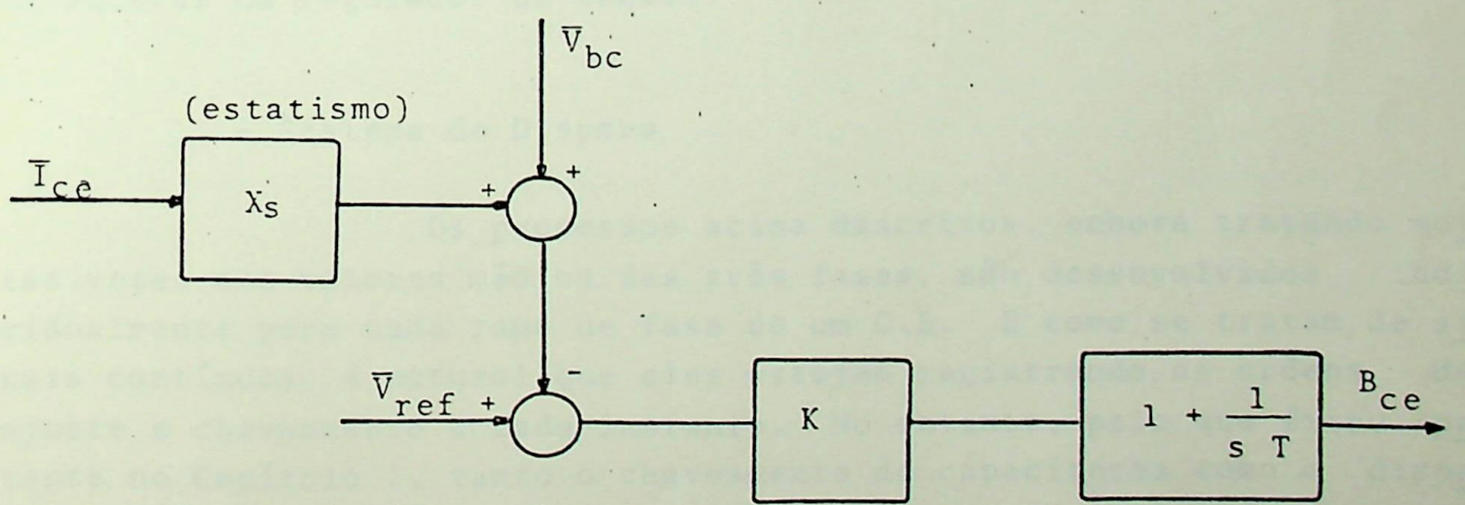


Figura 5.7 - Representação de um regulador de Tensão com "droop" de corrente

A segunda parte do sistema de regulação, que trabalha o sinal B_{ce} para identificar a atuação de chaveamento de capacitores e ajuste dos reatores controláveis, tem grandes diferenças entre fabricantes. Alguns controlam a corrente nos reatores e a partir do momento que esta se aproxime de uma das faixas limites de operação do ângulo de disparo, usualmente entre 90° e 140°, conforme discutido no Capítulo 2, constata-se a necessidade de chaveamento dos capacitores. Faz-se então a diferença entre o montante a ser chaveado e o B_{ce} desejado, ficando o restante como ordem de ajuste para os reatores. A partir daí ambos os sinais são enviados para o sistema de disparo.

Outros fabricantes controlam a susceptância fornecida pelos capacitores, comparam com B_{ce} e, a partir daí, geram os sinais para os reatores. Neste caso, também é respeitada a faixa normal de disparo, já referida no parágrafo anterior. Feita a comparação, os sinais de ajuste e controle são enviados ao sistema de disparo, de maneira semelhante ao outro sistema.

Em termos de representação, fica praticamente transparente para as simulações dinâmicas este processo de divisão de B_{ce} entre capacitores e reatores, pois o funcionamento do C.E. é tal que o comportamento visto do sistema será de variação contínua da susceptância. Sendo assim, não há necessidade de representar esta função num modelo dinâmico. Esta idéia é ainda mais reforçada considerando-se que as constantes de tempo aqui envolvidas são desprezíveis frente àquelas do regulador de tensão.

- Sistema de Disparo

Os processos acima descritos, embora tratando muitas vezes com valores médios das três fases, são desenvolvidos individualmente para cada ramo de fase de um C.E. E como se tratam de sinais contínuos, é natural que eles estejam registrando as ordens de ajuste e chaveamento a cada instante. No entanto, pelo que ficou patente no Capítulo 2, tanto o chaveamento de capacitores como o disparo da válvula de reatores têm um momento correto de serem feitos, a fim de não criarem perturbações para o sistema elétrico, nem prejudicarem seus componentes. E mais, um sinal proporcional a uma susceptância não é o desejável para o controle dos reatores, mas sim um sinal que traduza um ângulo de disparo.

Todas as necessidades acima apontadas são satisfeitas pela parte do controle didaticamente chamada de sistema de di-

paro. É claro que também é aqui que serão gerados os pulsos que irão para os gatilhos dos tiristores, a fim de que se dê o disparo dos mesmos.

O início do processo de disparo pode ser atribuí a uma unidade de sincronismo. Nesta unidade faz-se o controle do momento adequado a partir do qual os tiristores poderão ser disparados de forma a atender as condições exigidas para o funcionamento normal do C.E. Além disto, toda vez que ocorrerem distúrbios de freqüência, é na unidade de sincronismo que serão detectados estes problemas e ditadas as melhores formas de disparo durante os transitórios que dão origem às distorções na tensão do sistema. Com isto, evita-se o envio de sinais de disparo em momentos indevidos.

Os sinais vindos do sistema de regulação são tratados de maneira distinta. A ordem de chaveamento de capacitores vai para o gerador de pulsos dos gatilhos dos tiristores, que serão enviados tão logo chegue o momento oportuno, conforme indicado pela unidade de sincronismo. Já o sinal de ajuste dos reatores, deverá passar antes por uma unidade que transforma um valor de susceptância em um valor de ângulo. A partir daí, o sinal de ângulo segue caminho idêntico ao descrito para o sinal dos capacitores.

A forma de representar esta etapa nas simulações dinâmicas é muito controvertida. O que acontece é que os circuitos envolvidos têm retardos desprezíveis, mas a atuação reguladora pode ser atrasada conforme o instante em que os sinais de correção cheguem ao sistema de disparo. Isto se dá devido ao fato dos pulsos só poderem ser enviados em determinados momentos. Daí resulta que, em média, existirá um atraso da ordem de 2 a 4 milisegundos. A forma de inclusão deste valor no diagrama é que traz dúvidas. Existem autores que a representam pela equação de tempo morto no domínio da freqüência — e^{-sT_d} . Outros, Referência 15 , por considerarem que o atraso se dá aleatoriamente, dão um atraso menor na forma anterior, usando uma constante de tempo T_b da ordem de um milisegundo, e dividem esta por um polo com constante de tempo relacionada ao retardo médio de disparo —

$$\frac{e^{-sT_b}}{1 + sT_d} \qquad (5.1).$$

Por fim, existem publicações (Referências 10 e 14) que adotam apenas a representação por um polo, considerando que o retardo do sistema de disparo é pequeno frente a outras constantes de tempo, devendo-se, portanto, simplificar sua representação para não carregar o modelo. O presente trabalho adotará esta última filosofia. Assim, tem-se na Figura 5.8 a representação do sistema de disparo.

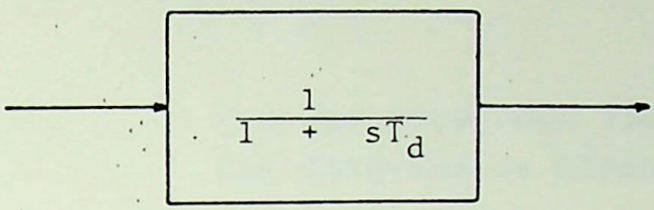


Figura 5.8 - Representação do sistema de disparo por diagrama de blocos

- Limites de Susceptância

Um outro ponto que deve ser considerado nos compensadores estáticos com controle externo é a forma como se comporta sua regulação na operação nos limites de susceptância. Para efeitos dinâmicos não importa se o C.E. tem ou não um limitador de potência reativa de regime permanente, conforme sugerido em 5.1. Aqui ele operará como uma susceptância fixa ao atingir um de seus limites. O controle deste tipo de operação é feito no sistema de regulação, que evita o acúmulo de erro nos integradores quando os limites estão sendo atingidos, e não permite que sinais maiores que os compatíveis com as dimensões do C.E. sejam enviados ao sistema de disparo.

Pelo exposto, a modelagem dos limites deve ser feita através de um limitador, como na Figura 5.9, alertando-se que a representação matemática do C.E. deverá considerar que não há acúmulo de erro nos integradores para operação nos limites.

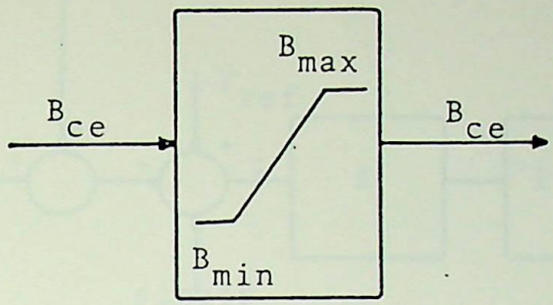


Figura 5.9 - Representação dos limites de susceptância por diagrama de blocos

- Montagem de Modelos

Após as considerações sobre as diversas etapas do controle externo de um compensador estático, pode-se montar os diagramas de bloco que os representam para simulações dinâmicas à frequência industrial. Como primeiro passo, pode-se descartar a diferença entre sinais alternados e contínuos, pois os programas de estabilidade representam a rede em valores por unidade das grandezas eficazes, somente em seqüência positiva. Sendo assim, pode-se unir todas as partes para obtenção dos diagramas de blocos das Figuras 5.10 e 5.11.

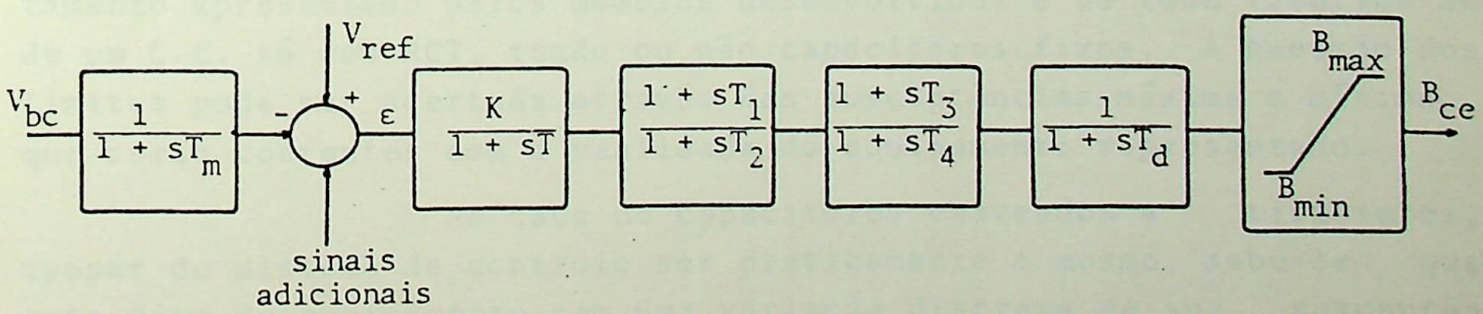


Figura 5.10 - Diagrama de blocos de um Compensador Estático com controle externo e com regulador linear

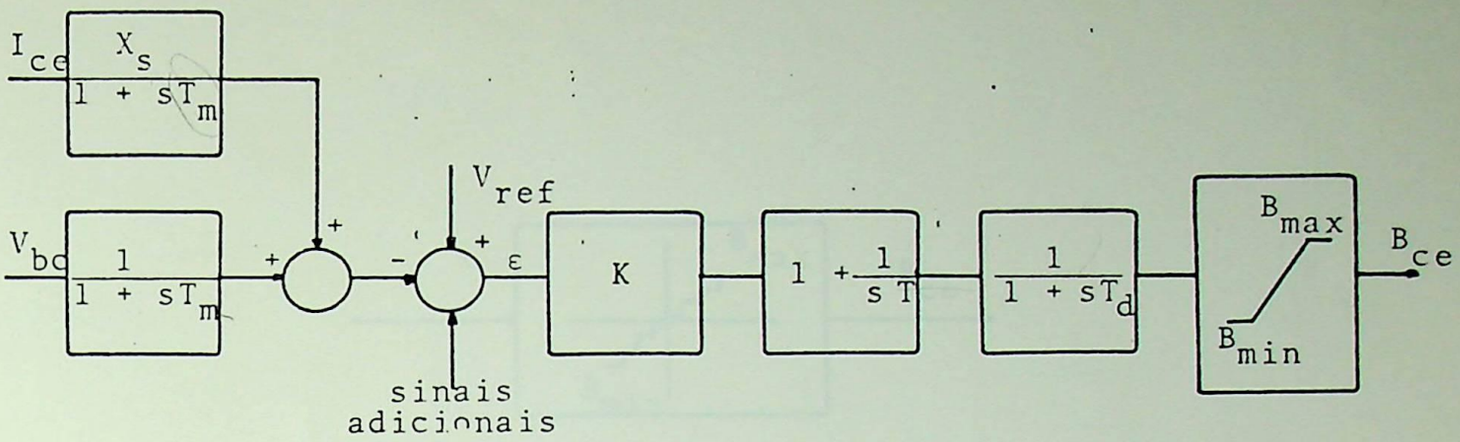


Figura 5.11 - Diagrama de blocos de um Compensador Estático com controle externo e com "droop" de corrente

A inclusão de sinais adicionais nos diagramas se deve ao fato de que esta possibilidade nunca deve ser esquecida quando se encontrarem problemas de amortecimento das oscilações dinâmicas.

O passo seguinte consiste em se procurar as formas de representação de compensadores estáticos que tenham somente reatores controlados por tiristores ou capacitores chaveados por tiristores . Em primeiro lugar, é importante notar que a filosofia básica de controle não se altera. Como diferença, tem-se apenas uma simplificação do sistema como um todo. Sendo assim, é de se esperar que não surjam modificações de grande vulto nos dois modelos já apresentados.

Para o C.E. somente com reator controlado por tiristores, os modelos das Figuras 5.10 e 5.11 são suficientes. Isto se deve ao fato de que nas representações obtidas já se considera uma variação contínua das susceptâncias, e não se faz uma distinção específica dos momentos de chaveamentos de capacitores. Logo, o comportamento apresentado pelos modelos desenvolvidos é de todo idêntico ao de um C.E. só com RCT, tendo ou não capacitores fixos. A questão dos limites pode ser acertada através das susceptâncias máxima e mínima , que serão coerentes com a realidade do equipamento representado.

No caso de capacitores chaveados a tiristores, apesar do sistema de controle ser praticamente o mesmo, sabe-se que este tipo de equipamento tem uma variação discreta de sua susceptância. Por isto, os diagramas apresentados, embora possam ser quase que integralmente aproveitados, deverão incluir um discretizador que tenha amplitude dos degraus compatível com a dimensão das unidades chaveáveis. Sugere-se a adoção do bloco da Figura 5.12 para ser acoplado à saída do C.E., substituindo o limitador, pois ele mesmo desempe-

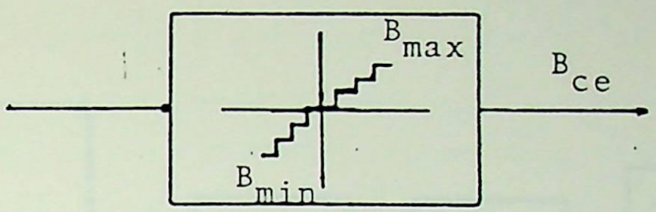


Figura 5.12 - Discretizador para C.E's somente com capacitores chaveados por tiristores

Um outro ponto de interesse é procurar simplificar os modelos apontados, sem perder o desempenho básico dos C.E.'s, a fim de economizar tempo de processamento em estudos para uma primeira análise. Nestes ainda não haverá definição do tipo de C.E., e muito menos da sua filosofia de controle. Portanto, modelos simples e genéricos se tornam extremamente aplicáveis.

Para começar, pode-se desprezar, em qualquer dos modelos, o retardo de disparo com constante de tempo "T_d ". Para a Figura 5.10, como o polo dominante é o do regulador, pode-se desprezar ainda o retardo de medição. E, concluindo, como o modelo ainda não terá um ajuste refinado, pode-se prescindir dos dois, ou pelo menos de um, dos blocos "lead-lag". Com isto, chega-se à Figura 5.13.

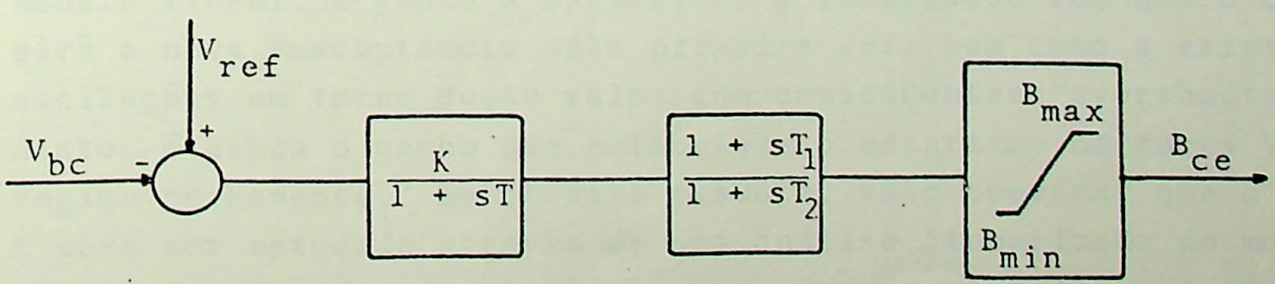
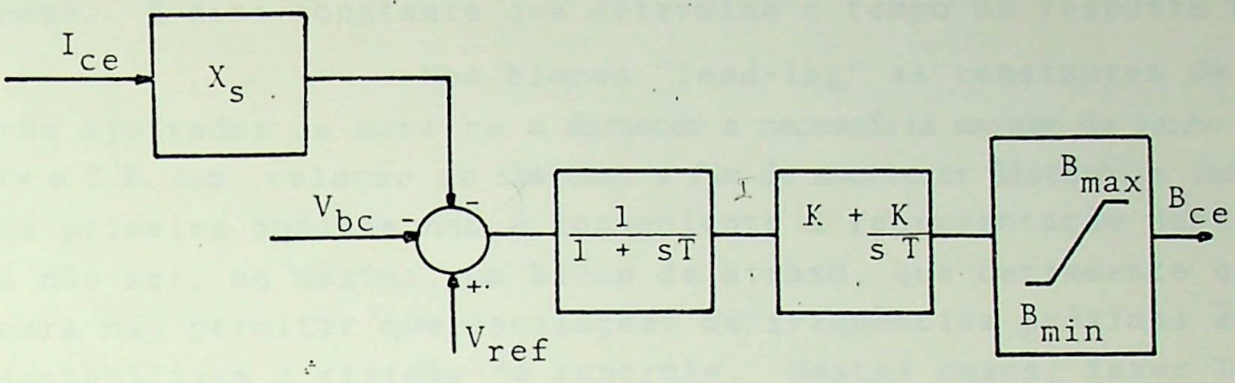
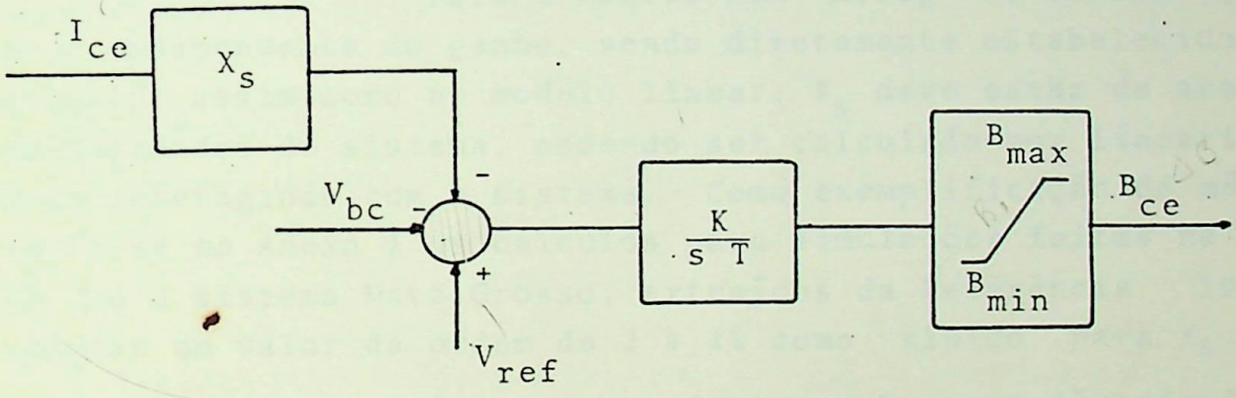


Figura 5.13 - Simplificação do diagrama de blocos da Figura 5.10

O diagrama de blocos da Figura 5.11 pode ser simplificado a partir da consideração de que T ≅ Tm, pelo procedimento da Figura 5.14.



1ª. etapa



2ª. etapa

Figura 5.14 - Simplificação do diagrama de blocos da Figura 5.11

Por fim, deve-se tecer alguns comentários a respeito dos ganhos e constantes de tempo dos modelos apresentados. No modelo linear, o ganho K estabelece a velocidade com que o C.E. atingirá a nova susceptância pela primeira vez, bem como a existência de oscilações em torno desse valor, com conseqüentes "overshoots". Além disto, é ainda o ganho que estabelece o estatismo da curva V x I de regime permanente. Sobre este assunto, vale comentar que o valor de K deve ser estudado através de uma análise linearizada do modelo simplificado do C.E. interagindo com o sistema elétrico. A linearização deve ser feita em torno de um ponto de operação definido, e a partir daí se estudar o valor de K mais adequado para fornecer o estatismo desejado frente às impedâncias do sistema. Este assunto será desen

volvido de forma detalhada no item 5.4.3. Como se vê, o ganho K depende de várias condicionantes, sendo difícil apontar um valor típico.

Já a constante de tempo T, apesar dela ser ajustável, para atender as necessidades do sistema elétrico, pode-se dizer que ela ficará numa faixa de 30 a 100 milisegundos no modelo linear. É esta constante que determina o tempo de resposta do C.E.

Nos blocos "lead-lag" as constantes de tempo serão ajustadas de maneira a fornecer a necessária margem de ganho e de fase para o C.E. com relação ao sistema, a fim de amortecer distúrbios indesejáveis. Numa primeira análise não é conveniente a representação destes blocos, a não ser, no máximo, um bloco de atraso, que certamente existirá, para não permitir que oscilações de freqüências próximas à da rede desestabilizem o sistema de controle. Nestes casos, fazer T_1 = 0,1 seg. e T_2 = 1 seg. é uma representação bastante típica.

Para o modelo com "droop" de corrente, o estatismo é independente do ganho, sendo diretamente estabelecido por X_s. No entanto, assim como no modelo linear, X_s deve estar de acordo com as necessidades do sistema, podendo ser calculado por linearização do modelo interagindo com o sistema. Como exemplificação do método, apresenta-se no Anexo I os cálculos para simulações feitas na ELETRONORTE com o sistema Mato Grosso, extraídos da Referência 19. Pode-se apontar um valor da ordem de 2 a 4% como típico para X_s.

A constante de tempo T, como já referida, deve ficar entre 15 e 20 milisegundos para cancelar o efeito da medição. E, por último, o valor de K determinará a rapidez da resposta do C.E. Esta constante depende dos requisitos do sistema, e tem uma forma típica de cálculo apontada no Anexo I. Como valores típicos, deve-se adotar uma faixa de 2 a 4 em grandezas por unidade.

Finalizando, ressalta-se o fato de que todas as constantes utilizadas nos diagramas de blocos dos modelos de compensadores estáticos com controle externo são ajustáveis através dos próprios painéis de controle ou, pelo menos, por pequenas modificações nos cartões da eletrônica de comando.

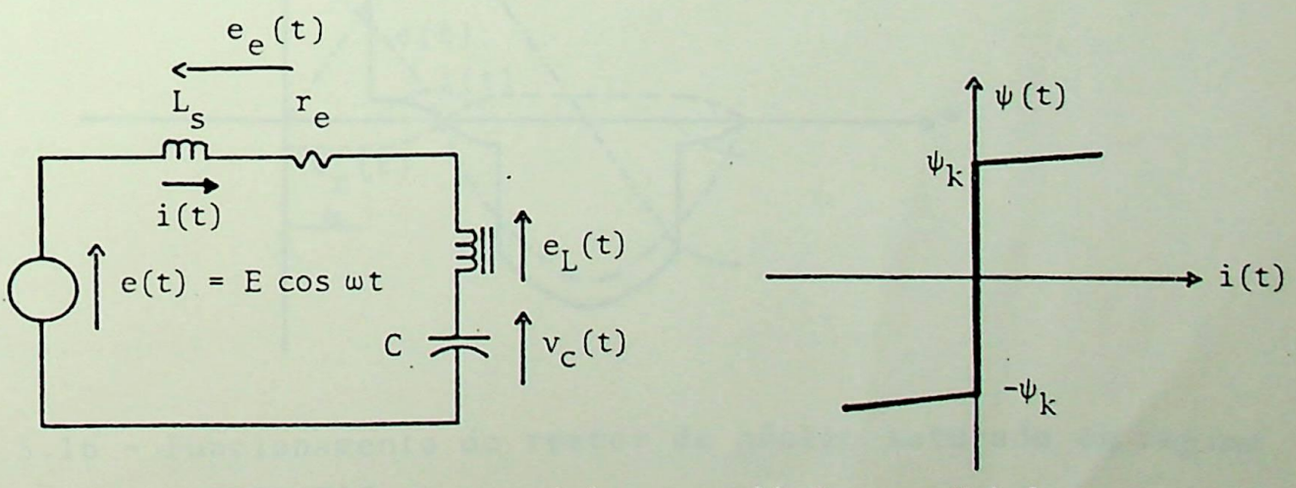
5.4.2 - Modelo Dinâmico para Compensadores Estáticos com Controle Intrínseco

Como já foi exposto nos Capítulos 1 a 3, os C.E.'s com controle intrínseco são aqueles que não têm um elemento indepen

dente que execute uma determinada lógica de regulação. Pelo contrário, a ação de controle será exercida, nesta situação, através das próprias características dos componentes passivos do compensador. Pelo que já se observou, os reatores de núcleo saturado (RNS) são os elementos que mais se prestam a este propósito. E, no caso, para que eles tenham uma melhor característica de regulação empregam-se quase sempre os capacitores de correção de inclinação (CCI). Portanto, no que segue, fica implícito que um RNS será sempre associado a um CCI.

Em vista das características acima, a obtenção de um modelo dinâmico nos moldes requeridos só será possível através da análise detalhada das equações que regem o funcionamento de um reator de núcleo saturado. E considerando que os programas digitais de estabilidade modelam apenas a seqüência positiva e utilizam valores eficazes, é natural que, após enfocado o comportamento no tempo, sejam feitas uma série de considerações que permitam chegar a um modelo tão simples quanto os apresentados para os C.E.'s com controle externo.

Para facilitar a análise que se segue, o circuito utilizado será monofásico, ressaltando-se apenas que nos sistemas trifásicos somente a componente fundamental das correntes a que se chegar aqui é que irão para o sistema elétrico. E mais, a hipótese formulada no Capítulo 2 de que até atingir o valor de saturação o reator não conduz e, após isto, ele conduz com uma reatância constante, será utilizada. Sendo assim, tem-se que o sistema objeto deste desenvolvimento é dado pela Figura 5.15. Nela vê-se ainda a curva ψ X i do reator saturado.



a) Circuito simplificado a ser estudado b) Curva ψ X i do reator saturado

Figura 5.15 - Sistema para desenvolvimento das equações do reator de núcleo saturado

A partir do circuito dado, pode-se escrever a seguinte equação no tempo:

$$e(t) = e_L(t) + \frac{1}{C} \int i(t)\, dt + L_e \frac{d\, i(t)}{d\, t} + r_e\, i(t) \qquad (5.2)$$

onde, $e_L(t) = \frac{d\, \psi(t)}{d\, t}$ (5.3)

A fim de simplificar as próximas equações, se convencionará que as variáveis em minúscula estão no domínio do tempo, e as maiúsculas no domínio da freqüência, sendo "s" o operador diferencial de Laplace.

Considerando o circuito da Figura 5.15 (a) funcionando em regime permanente, as curvas das diversas variáveis aí explicitada, bem como a do fluxo concatenado no reator, são mostradas na Figura 5.16. A partir delas, fica simples acompanhar os próximos passos desta análise.

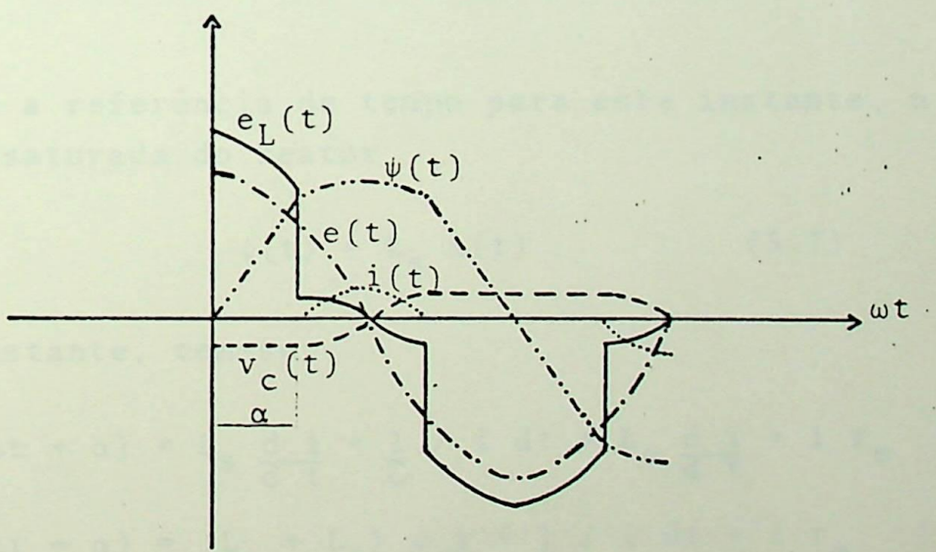


Figura 5.16 - Funcionamento do reator de núcleo saturado em regime permanente

Conforme adotado na Figura 5.16, $\psi(0) = 0$. Então, pela Figura 5.15 (b) obtém-se que $i(0) = 0$. Logo, até que ψ atinja seu valor saturado, tem-se:

$$\frac{d\,\psi}{d\,t} = e - v_c \qquad (5.4)$$

Sendo v_c um valor constante dado por $v_c(0^+)$, enquanto o reator não conduz. Logo,

$$\psi(t) = \int_0^t E \cos \omega\lambda \, d\lambda - \int_0^t v_c(0^+) \, d\lambda = \frac{E}{\omega} \operatorname{sen} \omega t - v_c(0^+)\, t \qquad (5.5)$$

E se no instante em que o fluxo saturado ψ_k é atingido $\omega t = \alpha$, ψ passa a ser dado por:

$$\psi\left(\frac{\alpha}{\omega}\right) = \psi_k = \frac{E}{} \operatorname{sen} \alpha - \frac{v_c(0^+)\,\alpha}{\omega} \qquad (5.6)$$

Deslocando a referência de tempo para este instante, e sabendo que na região saturada do reator

$$\psi(t) = L_s\, i(t)\,, \qquad (5.7)$$

com L_s constante, tem-se:

$$E \cos(\omega t + \alpha) = L_s \frac{d\,i}{d\,t} + \frac{1}{C} \int i\, dt + L_e \frac{d\,i}{d\,t} + i\, r_e \qquad (5.8) \therefore$$

$$E \cos(\omega t + \alpha) = (L_s + L_e) \frac{d\,i}{d\,t} + \frac{1}{C} \int i\, dt + i\, r_e \qquad (5.9)$$

Aplicando a transformada de Laplace, sabendo que $i(0^+) = 0$, obtém-se:

$$E \left\{\frac{s \cos \alpha - \omega \operatorname{sen} \alpha}{(s^2 + \omega^2)}\right\} = sI(L_s + L_e) + \frac{I}{s\,C} + \frac{v_c(0^+)}{s} + I r_e \qquad (5.10)$$

Seja ainda $L_s + L_e = L$, então:

$$I\left(sL + \frac{1}{sC} + r_e\right) = E\left\{\frac{s\cos\alpha - \omega\,\mathrm{sen}\,\alpha}{(s^2+\omega^2)}\right\} - \frac{v_c(0^+)}{s} \qquad (5.11)\therefore$$

$$I\left(s^2LC + sCr_e + 1\right) = E\left\{\frac{s^2C\cos\alpha - sC\omega\,\mathrm{sen}\,\alpha}{(s^2+\omega^2)}\right\} - Cv_c(0^+) \qquad (5.12)\therefore$$

$$I\left(s^2 + s\frac{r_e}{L} + \frac{1}{LC}\right) = \frac{E}{L}\left\{\frac{s^2\cos\alpha - s\omega\,\mathrm{sen}\,\alpha}{(s^2+\omega^2)}\right\} - \frac{v_c(0^+)}{L} \qquad (5.13)\therefore$$

$$I = \frac{E\cos\alpha}{L}\left\{\frac{s\,(s - \omega\tan\alpha)}{(s^2+\omega^2)\left\{\left(s + \frac{r_e}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC} - \frac{r_e^2}{4L^2}\right\}}\right\} +$$

$$- \frac{v_c(0^+)/L}{(s^2 + s\,r_e/L + 1/LC)} \qquad (5.14)$$

Voltando agora para o domínio do tempo:

$$i(t) = \frac{E\cos\alpha}{L}\left\{\omega\sqrt{\frac{1+\tan^2\alpha}{(a^2+b^2-\omega^2)^2 + 4a^2\omega^2}}\;\mathrm{sen}(\omega t + \alpha + \phi_1) + \right.$$

$$\left. - \frac{1}{b}\sqrt{\frac{(a^2 - b^2 + \omega\tan\alpha a)^2 + b^2(\omega\tan\alpha + 2a)^2}{(a^2+b^2-\omega^2)^2 + 4a^2\omega^2}}\;e^{-at}\mathrm{sen}(bt + \phi_2)\right\} +$$

$$- \frac{v_c(0^+)}{L}\frac{1}{b}\,e^{-at}\mathrm{sen}\,bt \qquad (5.15)$$

onde,

$$a = \frac{r_e}{2L} \qquad (5.16)$$

$$b = \frac{1}{LC} - \frac{r_e^2}{4L^2} = \left(\frac{\omega^2}{1 + \frac{L_e}{L_s}} - \frac{r_e^2}{4L^2}\right)^{1/2} \leq \omega \qquad (5.17)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{2\,a\,\omega}{a^2 + b^2 - \omega^2}\right) \qquad (5.18)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1}\left[\frac{b(-\omega\tan\alpha - 2a)}{a^2 - b^2 + \omega\tan\alpha a}\right] - \tan^{-1}\left(\frac{-2ab}{\omega^2 + a^2 - b^2}\right) \qquad (5.19)$$

Supondo, para simplificação da análise e do desenvolvimento matemático, que $r_e = 0$, tem-se:

$$a = 0 = \phi_1$$

$$b = (1/LC)^{1/2}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1}(\sqrt{LC}\,\omega\,\tan\alpha)$$

Com isto i(t) passa a ser dada por:

$$i(t) = \frac{E\cos\alpha}{L}\left\{\frac{\omega\sec\alpha}{|1/LC - \omega^2|}\,\mathrm{sen}(\omega t + \alpha) - \frac{\sqrt{1/LC + \omega^2\tan^2\alpha}}{|1/LC - \omega^2|}\,\mathrm{sen}\left(\frac{t}{\sqrt{LC}} + \phi_2\right)\right\} +$$

$$- \frac{v_c(0^+)}{L}\sqrt{LC}\,\mathrm{sen}\,\frac{t}{\sqrt{LC}} \qquad (5.20)$$

e no instante inicial

$$i(0) = \frac{E\,\mathrm{sen}\,\alpha}{\left|\frac{1}{\omega C} - \omega L\right|} - \frac{E}{\omega}\cos\alpha\,\frac{\sqrt{1/LC + \omega^2\tan^2\alpha}}{\left|\frac{1}{\omega C} - \omega L\right|}\,\mathrm{sen}\,\phi_2 \qquad (5.21)$$

Fazendo as adequadas substituições vê-se, após alguns manuseios, que

$$i(0) = 0,$$

como era de se esperar.

Pelo princípio básico de construção dos compensadores estáticos com reatores de núcleo saturável, a fim de reduzir ao máximo a inclinação da curva V x I dentro de sua faixa normal de operação, pode-se estabelecer a seguinte relação entre a capacitância de correção de inclinação e a reatância saturada do reator:

$$L_s \simeq \frac{1}{\omega C} \quad \therefore \quad C \simeq \frac{1}{\omega^2 L_s} \qquad (5.22)$$

É importante observar que a equação acima é apenas uma aproximação, pois na realidade os compensadores estáticos operarão com uma pequena inclinação em sua curva de regulação, como já foi discutido nos capítulos anteriores. No entanto, supondo que a aproximação acima pode ser tomada como válida, com o propósito de se ter equações mais fáceis de trabalhar e interpretar, chega-se finalmente a:

$$a = 0$$

$$b = \frac{\omega}{\sqrt{1 + L_e/L_s}}$$

$$\phi_1 = 0$$

$$\phi_2 = \tan^{-1}(\sqrt{1 + L_e/L_s}\ \tan\alpha)$$

Logo,

$$i(t) = \frac{E}{\omega L_e}\ \mathrm{sen}(\omega t + \alpha) - \frac{1 + (L_e/L_s)\mathrm{sen}^2\alpha}{1 + L_e/L_s}\ \mathrm{sen}\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}} + \phi_2\right) +$$

$$- \frac{v_c(0^+)}{(L_e + L_s)}\sqrt{1 + L_e/L_s}\ \mathrm{sen}\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}}\right) \qquad (5.23)$$

Com isto, vê-se mais uma vez a grande dependência da atuação deste tipo de compensação estática em relação ao nível de curto-circuito do sistema ao qual ele é conectado, pois L_s está presente em todos os

termos da equação de i(t). E mais, a corrente absorvida pelo reator saturado é composta de uma senoide de freqüência igual à fundamental e por outras duas, de freqüências iguais entre si, ambas menores que a fundamental, mostrando que se a ligação fosse monofásica, sem os recursos referidos no Capítulo 2, haveria realmente uma grande geração de correntes harmônicas. É também importante notar que o ângulo ϕ_2 tem seu valor absoluto maior que o de α, e terá sempre sinal contrário a este.

Devido às características de fases opostas entre capacitores e indutores, quando a corrente tiver a sua componente de freqüência fundamental no semiciclo positivo, $v_c(0^+)$ será negativo, e vice-versa.

Com estas considerações, a composição da corrente é aproximada pela soma das curvas da Figura 5.17.

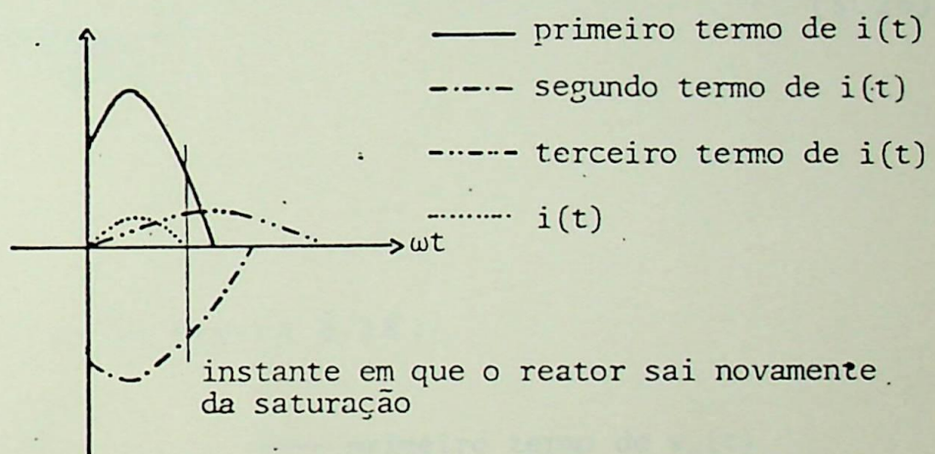


Figura 5.17 - Composição da corrente do reator de núcleo saturado

No instante em que a corrente atinge novamente o zero, o reator estará saindo da região saturada, fazendo com que o RNS fique sem conduzir até o próximo ponto de saturação ser atingido.

Obtida a corrente do RNS, é importante verificar o comportamento da tensão no capacitor nos instantes de condução. Para tanto, tem-se:

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^{t_{corte}} i(t)\, dt + v_c(0^+) \qquad (5.24)$$

Usando a fórmula da corrente e desprezando "r_e", tem-se:

$$v_c(t) = \frac{1}{C}\left\{\frac{E}{\omega^2 L_e}\left[\sqrt{1 + (L_e/L_s)\operatorname{sen}^2\alpha}\,\cos\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}} + \phi_2\right) - \cos(\omega t + \alpha)\right] + \right.$$
$$\left. + \frac{v_c(0^+)}{\omega^2(L_e + L_s)}\,(1 + L_e/L_s)\left[\cos\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}}\right) - 1\right]\right\} +$$
$$+ v_c(0^+) \qquad (5.25)$$

Como por hipótese $C = \dfrac{1}{\omega^2 L_s}$, tem-se:

$$v_c(t) = \frac{E}{L_e/L_s}\left\{\sqrt{1 + (L_e/L_s)\operatorname{sen}^2\alpha}\,\cos\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}} + \phi_2\right) - \cos(\omega t + \alpha)\right\} +$$
$$+ v_c(0^+)\,\cos\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}}\right) \qquad (5.26)$$

Dando a composição de curvas da Figura 5.18.

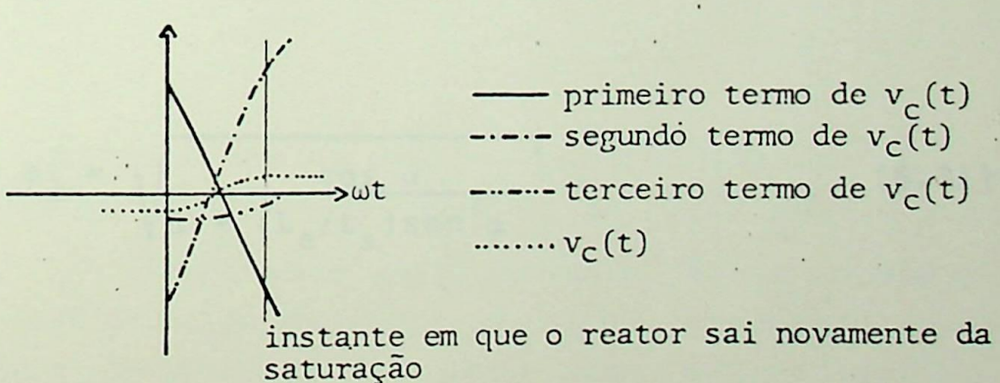


Figura 5.18 - Composição da tensão no capacitor de correção de inclinação

A queda de tensão no sistema pode ser escrita como:

$$e_e(t) = L_e\frac{di}{dt} = E\left\{\cos(\omega t + \alpha) - \frac{\sqrt{1 + (L_e/L_s)\operatorname{sen}^2\alpha}}{1 + L_e/L_s}\cos\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}} + \phi_2\right)\right\} +$$
$$- \frac{v_c(0^+)}{1 + L_e/L_s}\cos\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}}\right) \qquad (5.27)$$

E, por fim, a tensão no reator de núcleo saturado fica sendo:

$$e_L(t) = E\cos(\omega t + \alpha) - e_e - v_c \qquad (5.28)$$

Substituindo 5.26 e 5.27 em 5.28, tem-se a tensão e_L nos períodos de condução dada por:

$$e_L(t) = \frac{E}{L_e/L_s}\left\{\cos(\omega t + \alpha) - \frac{\sqrt{1 + (L_e/L_s)\operatorname{sen}^2\alpha}}{1 + L_e/L_s}\cos\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}} + \phi_2\right)\right\} +$$

$$- \frac{v_c(0^+)}{1 + L_e/L_s}\cos\left(\frac{\omega t}{\sqrt{1 + L_e/L_s}}\right) \qquad (5.29)$$

Pelo valor dado para ϕ_2 a partir das simplificações assumidas, pode-se escrever ainda:

$$\operatorname{sen}\phi_2 = \sqrt{\frac{1 + L_e/L_s}{1 + (L_e/L_s)\operatorname{sen}^2\alpha}}\ \operatorname{sen}\alpha \qquad (5.30)$$

e,

$$\cos\phi_2 = \sqrt{\frac{\cos\alpha}{1 + (L_e/L_s)\operatorname{sen}^2\alpha}} \qquad (5.31)$$

Usando estes dados para calcular $e_L\ (0^+)$, chega-se ao seguinte:

$$e_L(0^+) = \frac{E}{L_e/L_s}\left(1 - \frac{1}{1 + L_e/L_s}\right)\cos\alpha - \frac{v_c(0^+)}{1 + L_e/L_s} \quad (5.32).\therefore$$

$$e_L(0^+) = \frac{E\cos\alpha - v_c(0^+)}{1 + L_e/L_s} \quad (5.33)$$

Como no instante $t = 0^-$ a queda de tensão em L_e é nula, pois não existe corrente circulando, obtém-se:

$$e_L(0^-) = E\cos\alpha - v_c(0^-) \; . \quad (5.34)$$

E pelas próprias características de um capacitor,

$$v_c(0^-) = v_c(0^+) \; . \quad (5.35)$$

Assim, fica demonstrado que há uma descontinuidade na onda de tensão do reator de núcleo saturado, no momento em que atinge a saturação.

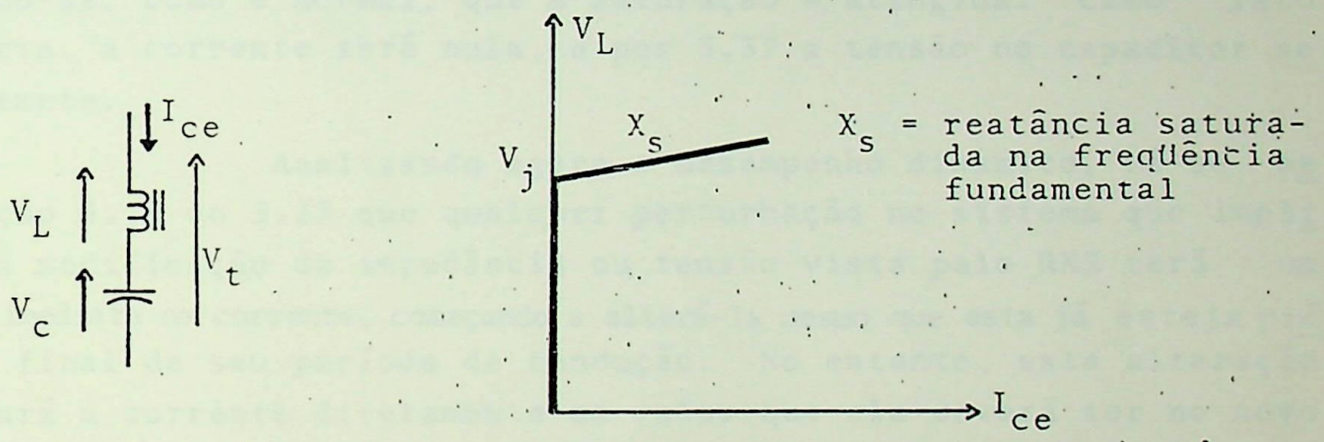
Semelhante comportamento já era esperado, pois a curva de fluxo concatenado da Figura 5.15(b), assumida como descrevendo o desempenho do reator saturado utilizado, apresenta uma descontinuidade nos instantes em que o fluxo concatenado satura.

Pela equação 5.3, que estabelece a tensão no reator como a derivada de seu fluxo concatenado, era perfeitamente previsível esta descontinuidade.

As equações desenvolvidas permitirão, como passo seguinte, tecer uma série de considerações que culminarão com a construção do modelo dinâmico procurado. Para começar, ficou patente que as ondas de tensão e corrente numa unidade monofásica de um reator de núcleo saturado são altamente distorcidas. No entanto, as técnicas de

ligação abordadas no Capítulo 2 permitem, com razoável aproximação , que as ondas de tensão e corrente vistas pelo sistema elétrico de potência, em operação trifásica equilibrada, sejam senoidais puras, consistindo das componentes fundamentais das equações obtidas. E pelas próprias características dos programas digitais de estabilidade em uso, nada mais natural do que orientar a análise no sentido de extrair um modelo que trabalhe com valores eficazes em por unidade.

Desta forma, o esquema de uma fase do RNS, em termos de valores eficazes, pode ser dado pela Figura 5.19 (a). E a curva tensão versus corrente do reator, também em valores eficazes , passa a ser a da Figura 5.19(b). Nela, a tensão V_j representa o valor eficaz a partir do qual o fluxo no núcleo do reator é suficiente para saturá-lo e, portanto, conforme a Figura 5.15(b), para conduzir corrente.



a) esquema do RNS com valores eficazes

b) curva V x I do reator de núcleo saturado em valores eficazes

Figura 5.19 - reator de núcleo saturado com parâmetros em valores eficazes

É claro que em operação normal um compensador estático com RNS sempre terá tensões no sistema suficiente para atingir V_j.

Transpondo agora a equação 5.28 para valores eficazes, sendo X_c a reatância efetiva do capacitor de correção de inclinação na freqüência fundamental, que por princípio de funcionamento é aproximadamente igual a X_L, tem-se:

$$V_t = V_L + V_c \qquad (5.36)$$

e, $$V_c = -j\, X_c\, I_{ce} \qquad (5.37)$$

logo, $$V_L = V_t + j\, X_c\, I_{ce} . \qquad (5.38)$$

E mais,

$$V_L = V_j + j\, X_s\, I_{ce} , \qquad (5.39)$$

admitindo-se, como é normal, que a saturação é atingida. Caso isto não ocorra, a corrente será nula, e por 5.37 a tensão no capacitor será constante.

Analisando agora o desempenho dinâmico, vê-se pela equação 5.20 ou 5.23 que qualquer perturbação no sistema que implique numa modificação da impedância ou tensão vista pelo RNS terá um efeito imediato na corrente, começando a alterá-la mesmo que esta já esteja próxima do final de seu período de condução. No entanto, esta alteração não levará a corrente diretamente ao valor que ela deverá ter no novo ponto de operação. Isto se deve ao fato de que os terceiros termos das duas equações citadas são função unicamente da tensão que apresentava o capacitor no início de um período de condução. E a equação 5.24 deixa claro que ao se alterar a corrente a tensão que ficará acumulada no capacitor para a próxima condução será diferente daquela que deu início à condução em curso. Este processo se repetirá durante alguns períodos de condução, sempre alterando os $v_c(0^+)$, o que implicará em novas alterações de corrente que, por sua vez, modificará a nova tensão acumulada no capacitor. Este processo irá tornando as alterações das novas correntes e tensões do capacitor cada vez menores com relação aos valores anteriores, até que o compensador estático convergirá para um novo ponto de operação. Não se pode esquecer que a descrição feita implica também em retardos ou avanços progressivos nos instantes em que o reator atingirá a saturação.

Do comportamento dinâmico descrito, e das equações 5.20 ou 5.23, fica evidente que se não houvesse o capacitor de

correção de inclinação, a resposta do RNS seria praticamente instantânea, a menos das simplificações assumidas (resistências nulas) que, ao todo, não modificariam de forma significativa estas conclusões . Sendo assim, o modelo com valores eficazes deve, naturalmente, associar um retardo na resposta de tensão do capacitor, deixando imediata a modificação da parte da corrente devida à atuação do reator.

Pelas considerações do parágrafo anterior, e pelas equações 5.36 a 5.39, fica bastante simples a montagem do diagrama de blocos que descreve o compensador estático com reator controlado a tiristores. A forma adotada de representar o retardo na modificação da tensão foi por um polo simples com constante de tempo T. Isto aproxima, para efeitos de valores eficazes, o comportamento da tensão do capacitor, que para um distúrbio em degrau terá uma alteração inicial maior, convergindo para o novo ponto de operação pela curva $X_C\ (1 - e^{-t/T})$. Assim, tem-se na Figura 5.20 a primeira forma do diagrama de blocos procurado.

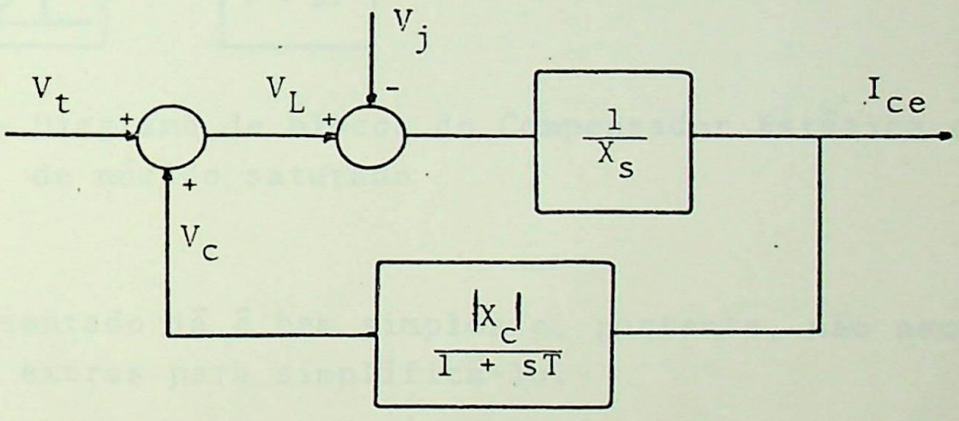


Figura 5.20 - Diagrama de blocos do Compensador Estático com reator de núcleo saturado sem não-linearidades

Este diagrama, que considera a corrente indutiva como positiva, ainda não inclui o fato de que para tensões abaixo do joelho de saturação a tensão é nula. Outra representação possível é a proteção do capacitor contra sobretensões e a própria proteção do C.E. como um todo. A proteção do capacitor desliga-o quando sua tensão ultrapassa um valor V_{cm}, colocando seus terminais em curto-circuito, podendo ou não permitir o seu retorno ao sistema após o reestabelecimento das condições normais. A proteção de todo equipamento desliga-o definitivamente se sua corrente ultrapassar um determinado valor.

Por fim, antes de incluir os itens acima no modelo, vale ressaltar que aqui tem-se como saída uma corrente, e não uma [illegible] a operação capacitiva e negativ

ração indutiva. Desta forma, com a finalidade de compatibilizar com os outros modelos, a corrente de saída será multiplicada por -1 e dividida pelo módulo da tensão terminal, obtendo-se também uma susceptância. A multiplicação por -1 deve-se ao fato de que o modelo considera a corrente indutiva como positiva, o que daria um valor positivo quando do cálculo da susceptância. Mas, sabe-se que este valor é negativo para um indutor, daí a referida multiplicação. Feito isto, tem-se que o modelo final do reator de núcleo saturado é dado pela Figura 5.21.

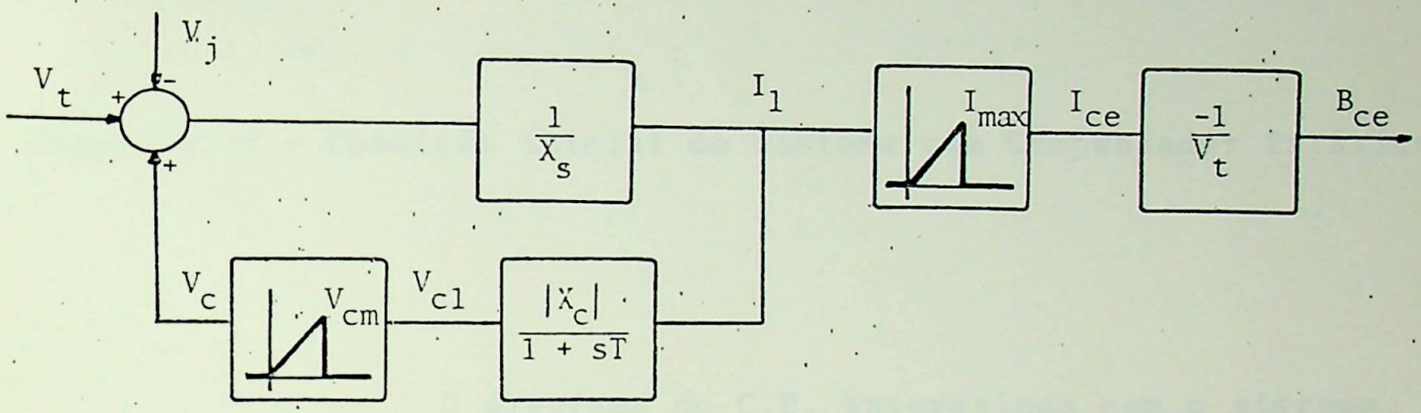


Figura 5.21 - Diagrama de blocos do Compensador Estático com reator de núcleo saturado

O modelo apresentado já é bem simples e, portanto, não necessita de considerações extras para simplificá-lo.

5.4.3 - Cálculo do Ganho do Modelo Linear de Compensador Estático com Controle Externo

A metodologia a ser apresentada a seguir foi baseada nos cálculos da Referência 20 , fazendo algumas adaptações para casos onde a quantidade de informações disponíveis são mais escassas.

Os dados aqui trabalhados estão todos na base de 100 MVA, e são extraídos do sistema de suprimento ao Estado do Mato Grosso - Brasil, pertencentes às Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. - ELETRONORTE.

Como se sabe, a linearização de determinado conjunto de equações supõe, a princípio, que existe um ponto de equilíbrio em torno do qual os estudos serão desenvolvidos. Para tanto, a

condição operativa escolhida foi o C.E. fornecendo 10 MVAr na barra controlada, tendo esta uma tensão de 99,9%, como mostra a Figura 5.22.

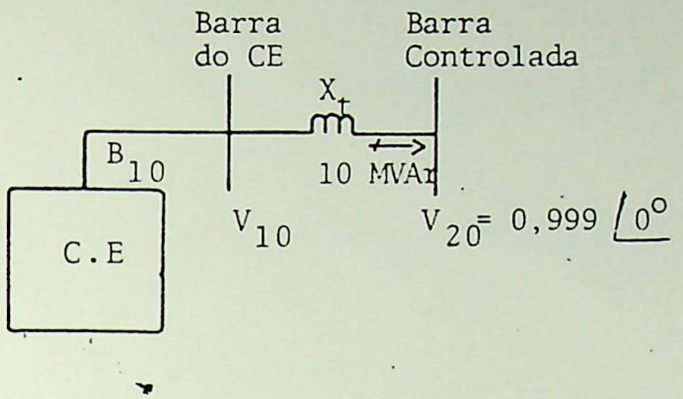


Figura 5.22 - Condição inicial do sistema com Compensador Estático

O diagrama do C.E. interagindo com o sistema, para efeito de análise de pequenas perturbações, é dado na Figura 5.23.

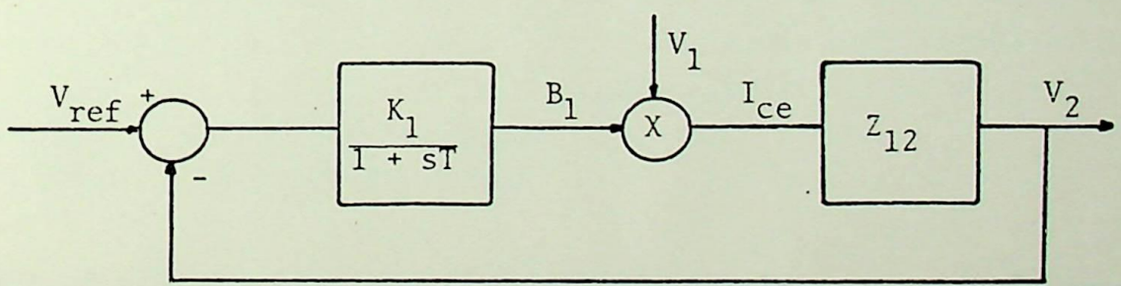


Figura 5.23 - Diagrama de interação do C.E com o sistema elétrico para análise de pequenos sinais

Aqui Z_{12} é a impedância de transferência entre a barra do C.E. e sua barra controlada, ou a impedância própria do seu barramento, quando ele não controla barras remotas.

Fazendo a linearização em torno do ponto inicial de operação, conforme o sistema da Figura 5.23, e considerando as pequenas perturbações das variáveis, tem-se:

$$I_{ce0} + \Delta I_{ce} = B_{10}V_{10} + \Delta B_1 V_{10} + B_{10}\Delta V_1 + \Delta B_1 \Delta V_1 \qquad (5.40).$$

Desprezando o termo de segunda ordem e enfocando somente a variação de corrente,

$$\Delta I_{ce} = \Delta B_1 V_{10} + B_{10}\Delta V_1 \qquad (5.41).$$

E mais,

$$\Delta V_1 = \Delta I_{ce}(Z_{12} + X_t) \qquad (5.42) \text{ e},$$

$$\Delta V_2 = \Delta I_{ce} Z_{12} \qquad (5.43).$$

Substituindo 5.43 e 5.42 em 5.41, tem-se:

$$\Delta V_2 = B_{10}\Delta V_2(Z_{12} + X_t) + V_{10}\Delta B_1 Z_{12} \qquad (5.44)$$

$$\text{e,} \quad \frac{\Delta V_2}{\Delta B_1} = \frac{Z_{12}V_{10}}{1 - B_{10}(Z_{12} + X_t)} = Z \qquad (5.45).$$

O valor de Z aqui obtido retrata, de forma mais completa, a variação incremental da tensão com a susceptância do C.E. já obtida nas equações 4.14 e 4.18. Com o desenvolvimento acima, pode-se formar o diagrama de blocos linearizado da Figura 5.24, utilizado na análise de pequenas perturbações.

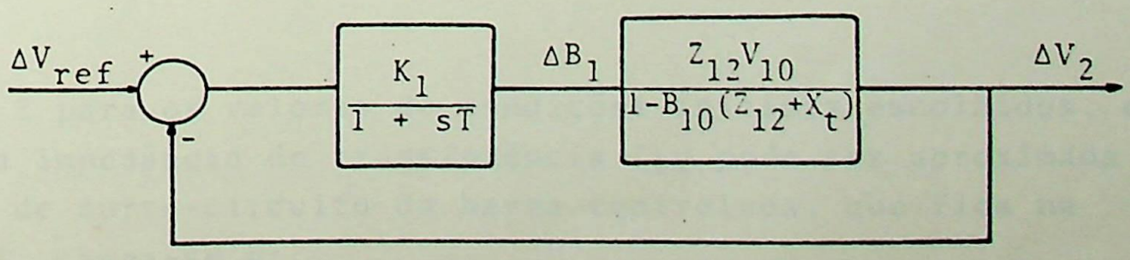


Figura 5.24 - Diagrama de blocos linearizado para análise de pequenas perturbações

Como o sistema analisado é do tipo zero, ou seja, apresenta um erro de regime permanente para a aplicação de um degrau ΔV_{ref} na tensão de referência, tem-se que este erro pode ser dado por:

$$e_{ss} = \frac{\Delta V_{ref}}{1 + K}, \qquad (5.46)$$

onde K é o ganho de malha aberta, que no caso é:

$$K = K_1 Z \qquad (5.47)$$

Supondo agora que a maior variação possível de ser aplicada em V_{ref} atendendo aos critérios de tensões ($\pm$ 5% do valor nominal) é de 10% , e que o maior erro de regime permanente aceitável seja de 2%, tem-se:

$$\frac{1}{1 + K_1 Z} \leq \frac{e_{ss\ max}}{\Delta V_{ref\ max}} \qquad (5.48)$$

É importante notar que a desigualdade usada significa que o ganho final a ser obtido desta metodologia tem uma certa margem de flexibilidade na fixação do valor a ser adotado. No entanto, esta variação não deve ser grande.

$$K_1 Z \geq \frac{\Delta V_{ref\ max}}{e_{ss\ max}} - 1 \qquad (5.49)$$

Substituindo os valores máximos permitidos, obtém-se que:

$$K_1 Z \geq 4,0 \quad \% \qquad (5.50)$$

Calculando Z para os valores de condições iniciais escolhidos, e adotando que a impedância de transferência Z_{12} pode ser aproximada pela impedância de curto-circuito da barra controlada, que fica na faixa de 25 a 32%, chega-se a:

$$0,26 \leq Z \leq 0,34 \text{ p.u} \qquad (5.51)$$

Substituindo estes resultados em 5.50, conclui-se que:

$$K_1 \geq 16 \text{ p.u} \qquad (5.52)$$

No entanto, deve-se considerar que o ideal seria usar a impedância Z_{12} para baixas freqüências, pois a análise de pequenas perturbações supõe, como seria de se esperar, que as oscilações aplicadas, além de pequenas, ocorrem lentamente. É por isto que se costuma dizer que o método aqui empregado calcula o ganho contínuo do regulador. Com isto, na falta de dados precisos é aconselhável se considerar parâmetros típicos. E neste ponto, tem-se que geralmente as impedâncias em baixas freqüências são cerca de 20% menores que as impedâncias à freqüência industrial. Com isto, pode-se recalcular Z de forma a obter agora que $K \geq 20$.

5.5 - Modelagem para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos à Freqüência Natural

Nos estudos deste tipo, interessa saber o comportamento do sistema elétrico frente a fenômenos de curtíssima duração, e que podem solicitar bastante os equipamentos que o compõem. E pelo alto grau de exigência, o sistema tem que ser modelado com muitos detalhes. A rede é representada de forma trifásica, incluindo a saturação dos equipamentos, linhas com parâmetros distribuídos, etc. As capacitâncias parasitas entre espiras são consideradas também.

Pelo elevado nível de detalhes exigido, um modelo de compensador estático compatível deve ser adotado. Em princípio, os equipamentos de medição e potência (capacitores, reatores e tiristores) devem ser representados por seus modelos físicos. A parte de controle, descrita em 5.4.1, deve ser representada com o detalhe de cada sistema, incluindo até mesmo a sincronização e emissão dos pulsos para disparo dos tiristores. E como cada C.E. em específico tem sua própria filosofia de comando, fica evidente que cada modelo representará apenas os equipamentos de um determinado fabricante e, mesmo assim, sujeito a restrições devidas à complexidade, que torna qualquer modelo mais vulnerável a erros.

Pelas razões acima, e tendo em conta não ser este o objetivo deste trabalho, o presente item não contará com maiores considerações, constando do escopo apenas com o fim de alertar

para a existência e necessidade de tais modelos. Os interessados em detalhes específicos deste assunto poderão achar uma maior fonte de informações na Referência 21 .

5.6 - Conclusões

O trabalho desenvolvido neste capítulo permite concluir que os compensadores estáticos podem ser representados com facilidade na maioria dos programas digitais existente para a análise de sistemas elétricos de potência. Ficou bem nítida a idéia de que o grau de complexidade das representações será função dos propósitos de cada simulação, podendo-se utilizar modelagens das mais genéricas até as mais apropriadas para cada caso. É claro que modelagens mais detalhadas exigirão maior tempo de computador e, conforme o estudo, até mesmo um maior número de simulações.

Com respeito aos modelos dinâmicos para simulações à freqüência industrial, foram desenvolvidos quatro modelos que, apesar de simples, podem reproduzir com a precisão necessária o comportamento dos compensadores estáticos nas situações abordadas neste tipo de estudo. A obtenção de diagramas simples visou basicamente facilitar a introdução dos mesmos em programas de computadores digitais, e evitar que eles aumentem de forma significativa o tempo de simulação. É ainda importante ressaltar que os modelos desenvolvidos têm condições de representar a totalidade dos compensadores estáticos de uso mais difundido nos dias de hoje.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

CAPÍTULO 6

INTRODUÇÃO DOS MODELOS DINÂMICOS DE COMPENSADORES ESTÁTICOS EM UM PROGRAMA DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

O presente capítulo tratará basicamente da descrição dos métodos e formas utilizados na implantação dos modelos dinâmicos em um programa de estabilidade. O referido programa originou-se como parte dos requisitos da tese de mestrado da Referência 22 , tendo sido aprimorado como requisito da tese de doutorado da Referência 23 . Além disto, novos recursos foram introduzidos, Referência 24 , tornando este programa bem adequado e didático para o que se pretende.

A versão do programa de estabilidade utilizada dispõe dos seguintes recursos.

- Modelagem de máquinas síncronas pelos modelos I a IV;
- Modelagem de reguladores de tensão e velocidade das máquinas síncronas;
- Modelagem de motores de indução de gaiola simples ou dupla;
- Modelagem de cargas por impedância constante;
- Simulação de curtos-circuitos, aberturas de linhas, rejeição de carga, motores, geradores, etc.;
- Simulação de relés de alívio de carga;
- Simulação de partida de motores de indução.

Além destes recursos, o programa permite a monitoração de todas as variáveis de importância para o sistema, contando com plotagem de gráficos através da própria impressora.

O fluxograma deste programa encontra-se no Anexo II deste trabalho, já incluindo, de forma destacada, as modificações impostas pela introdução dos compensadores estáticos.

Outros itens que se revestem de particular im

portância para o desenvolvimento deste capítulo são os métodos de modelagem das máquinas síncronas ou de indução e os métodos de integração utilizados na resolução das equações diferenciais. A preocupação com estes pontos se deve a que a filosofia a ser adotada na introdução dos C.E.'s dentro do programa será a de seguir todos os métodos já adotados na elaboração dos modelos existentes. Por esta razão, os dois itens levantados serão estudados em 6.1 e 6.2, respectivamente.

6.1 - Representação dos C.E.'s no Sistema Elétrico do Programa de Estabilidade

Os compensadores estáticos, assim como os compensadores síncronos, ou mesmo os geradores, atuam como reguladores de tensão. E apesar dos C.E.'s serem compostos somente por elementos passivos e não terem inércia, ao contrário das máquinas síncronas, o comportamento dinâmico de ambos apresenta alguns pontos em comum, pois todos eles são regidos por equações diferenciais. Frente a estes dois pontos coincidentes, faz-se necessário analisar a forma de representação das máquinas síncronas no programa estudado, a fim de tentar proceder de forma semelhante com os estáticos.

Conforme referido no Capítulo 2 da Referência 23, a representação das máquinas dentro da rede elétrica simulada no programa é feita através do equivalente de Norton, isto é, uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância. A fonte de corrente é variável e a impedância é fixa. Desta forma, as equações diferenciais das máquinas são tratadas de tal maneira que os efeitos dinâmicos delas decorrentes sejam refletidos no sistema elétrico através da variação da corrente fornecida pelo equivalente. Já a impedância, por ser um valor fixo, é incorporada à rede passando a fazer parte da matriz de impedâncias gerada pelo programa.

Analisando agora os compensadores estáticos, vê-se que à exceção do reator de núcleo saturado, os demais são tratados como susceptâncias variáveis. Sendo assim, a melhor forma de representá-los seria incluindo-os na matriz de impedância no sistema. Isto, no entanto, é totalmente inviável, pois a matriz seria modificada a cada intervalo de tempo de integração, tornando o programa impraticável em termos de tempo de computador. O recurso seguinte, e que já se encaixa perfeitamente ao RNS, é representá-los por fontes de corrente, à semelhança das máquinas.

Nesta linha, o que se teria de fazer para os compensadores estáticos com controle externo seria dividir a susceptância de saída das equações diferenciais pela tensão de sua barra. Com isto, ter-se-ía a corrente injetada. Contudo este valor não é, a princípio, correto, pois a nova susceptância calculada modificaria a tensão que se usou para calcular a corrente. Isto é, a corrente seria calculada com base na tensão do intervalo de integração anterior. Para sanar este problema, a primeira solução seria dizer que as tensões de um intervalo de integração para outro não variam muito e que a aproximação usada é válida. Pode-se até mesmo adiantar que este recurso vem sendo muito usado em programas comerciais. Porém nada disto é necessário, pois o processo de integração deste programa, como será visto mais adiante, é iterativo. Isto significa que toda vez que surja uma defasagem como esta, ela será naturalmente eliminada, pois ao final de algumas iterações tanto a susceptância quanto a tensão convergirão para o valor que elas realmente deverão apresentar no instante atual da simulação.

Do exposto, chega-se à grata conclusão de que representar os compensadores estáticos por fontes controláveis de corrente não leva a nenhuma aproximação ou erro nas simulações. Fica faltando agora definir a impedância em paralelo com a fonte de corrente. A princípio, pensou-se em colocar a impedância do C.E. em regime permanente, deixando a fonte de corrente inicialmente zerada. No entanto, como o C.E. pode estar muito próximo a zero antes de um distúrbio, a introdução de uma impedância tão grande poderia causar problemas na montagem da matriz do sistema. Por outro lado, fica extremamente mais simples, em termos de modificações no programa, iniciar a simulação com o C.E. injetando a corrente que normalmente fluiria por ele no regime permanente. E neste caso não haveria necessidade de se colocar uma impedância fictícia qualquer representando o C.E. dentro do sistema em regime permanente.

Pelas razões apontadas acima, levando em conta principalmente a simplificação das modificações no programa, que foi um objetivo que sempre norteou este trabalho, decidiu-se por não representar na matriz de impedâncias do sistema nenhuma impedância em paralelo com as fontes de corrente dos C.E.'s, que tenham por objetivo refletir suas condições iniciais.

Partindo agora para a implementação do modelo, tem-se que, esquematicamente, o C.E. é representado no sistema conforme a Figura 6.1.

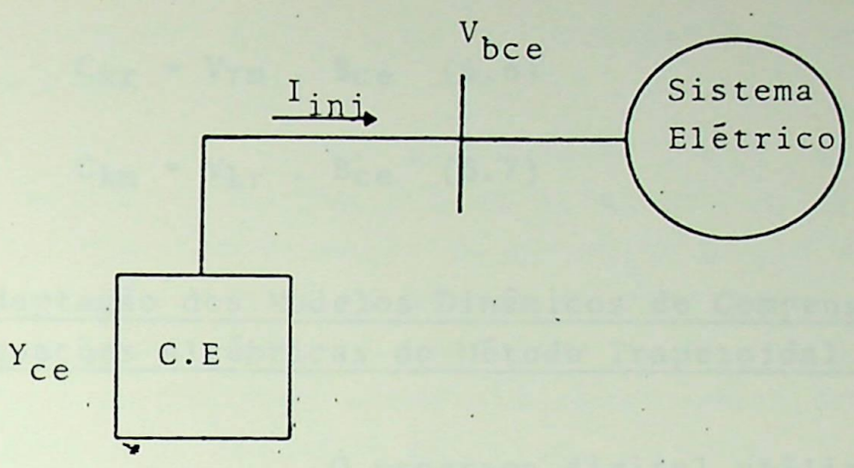


Figura 6.1 - Representação unifilar de um Compensador Estático genérico

Neste caso Y_{ce} é a admitância que o estático apresenta como saída do modelo utilizado, I_{inj} é sua corrente injetada, e V_{bce} é a tensão da barra à qual o C.E. está conectado, que não é necessariamente a barra que ele controla. Estas três grandezas são complexas, e como o programa não trabalha com números complexos diretamente, convém transformá-las para coordenadas retangulares. Assim, sendo "j" a unidade imaginária, tem-se:

$$I_{inj} = C_{kr} + j\ C_{km} \qquad (6.1)$$

$$V_{bce} = V_{kr} + j\ V_{km} \qquad (6.2)$$

$$Y_{ce} = j\ B_{ce} \qquad (6.3)$$

onde, B_{ce} é a saída dos diagramas de blocos desenvolvidos no item 5.4. Por outro lado, da Figura 6.1,

$$I_{inj} = -\ V_{bce} \cdot Y_{ce} \qquad (6.4) \therefore$$

$$I_{inj} = V_{km}\ B_{ce} - j\ V_{kr}\ B_{ce} \qquad (6.5)$$

por fim, de 6.5 chega-se às partes real e imaginária da corrente inje

tada pelo modelo do C.E . Estes valores serão os utilizados na interface dos modelos do C.E. com a modelagem da rede elétrica dentro do programa digital.

$$C_{kr} = V_{rm} \cdot B_{ce} \quad (6.6)$$

$$C_{km} = V_{kr} \cdot B_{ce} \quad (6.7)$$

6.2 - Adaptação dos Modelos Dinâmicos de Compensadores Estáticos às Equações Algébricas do Método Trapezoidal Implícito

O programa digital utilizado neste trabalho utiliza o método trapezoidal implícito na resolução das equações diferenciais dos modelos de máquinas e reguladores nele existentes. E para fazer as necessárias adaptações das equações dos compensadores estáticos torna-se imprescindível um conhecimento prévio deste método, bem como do tipo de tratamento algébrico a ele aplicado para torná-lo mais eficiente em termos computacionais. Portanto, inicialmente serão tratados estes itens.

O método trapezoidal básico é muito bem conhecido, já tendo sido utilizado em diversas aplicações práticas com resultados bastante satisfatórios, como mostra a Referência 25 , por exemplo. A equação que descreve sua solução para o instante $t + \Delta t$ é dada por:

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \frac{\Delta t}{2} (sy(t + \Delta t) + sy(t)) \quad (6.8)$$

onde "s" é o operador diferencial.

Como se vê, este método requer o valor da derivada $sy\ (t + \Delta t)$ na solução de $y\ (t + \Delta t)$. Por outro lado, a derivada de $y\ (t + \Delta t)$ é função de $y\ (t + \Delta t)$. Desta forma, duas soluções se apresentam. A primeira delas, usada inicialmente, consiste em extrapolar $sy\ (t + \Delta t)$ e adotar diretamente o valor obtido em 6.8 como válido. A segunda e mais precisa forma, consiste em tornar o método implícito, isto é, iterativo.

De início calcula-se $y\ (t + \Delta t)$ a partir de uma extrapolação da sua derivada. A seguir, calcula-se sua derivada

com o valor de y (t + Δt) obtido, e a partir daí reinicia-se o ciclo de cálculos. Este processo repetir-se-á até que y (t + Δt) e sy (t + Δt) convirjam para um valor tal que não apresentem um erro maior do que o especificado com relação aos valores da iteração anterior. Este procedimento compõe o método trapezoidal implícito a ser utilizado no que segue.

Uma preocupação importante a ser levantada em qualquer método iterativo é a de eliminar, ao máximo, cálculos que não sejam absolutamente necessários de serem incluídos em cada iteração . Com isto, diminuir-se-á ao máximo o impacto das iterações no aumento do tempo de processamento. Por esta razão, cada equação diferencial deverá ser manuseada de forma a separar todos os termos que dependem de informações do instante em curso, ou seja, t + Δt pela equação 6.8, daqueles que só dependem de constantes ou dados calculados em instantes anteriores. Assim, os cálculos iterativos constarão apenas do primeiro grupo de termos, ficando o segundo para ser executado uma única vez, no início de cada novo instante de tempo.

Para melhor visualizar esta filosofia, antes mesmo de trabalhar os modelos dos C.E.'s, é conveniente a apresentação de um exemplo simples e didático. Para tanto, seja o diagrama de blocos da Figura 6.2.

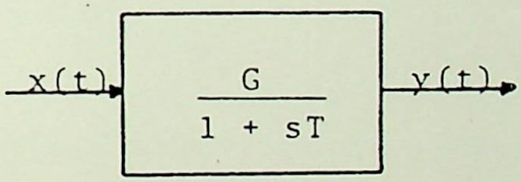


Figura 6.2 - Função de tranferência para exemplificação

A equação no domínio da freqüência deste exemplo fica sendo então:

$$y(t) + sTy(t) = Gx(t) \qquad (6.9)$$

Dela tira-se a derivada de y(t).

$$sy(t) = \underline{Gx(t) - y(t)} \qquad (6.10)$$

Substituindo na forma algébrica do método trapezoidal, tem-se:

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{Gx(t) - y(t)}{T} + \frac{Gx(t + \Delta t) - y(t + \Delta t)}{T} \right\} \quad (6.11)$$

executando alguns manuseios algébricos em 6.11, obtém-se:

$$y(t + \Delta t) = y(t) \frac{(2T - \Delta t)}{2T + \Delta t} + \frac{G\Delta t}{2T + \Delta t} x(t) + \frac{G\Delta t}{2T + \Delta t} x(t + \Delta t) \quad (6.12)$$

seja ainda,

$$B = \frac{\Delta t}{2T + \Delta t} \quad (6.13),$$

e

$$M = G \cdot B \quad (6.14).$$

Com isto, $y(t + \Delta t)$ pode ser reescrito como,

$$y(t + \Delta t) = y(t) (1 - 2B) + Mx(t) + Mx(t + \Delta t) \quad (6.15).$$

Por fim, sendo

$$C = y(t) (1 - 2B) + Mx(t) \quad (6.16),$$

chega-se a:

$$y(t + \Delta t) = C + Mx(t + \Delta t) \quad (6.17).$$

Das equações acima, somente 6.17 será processada a cada iteração de um instante de tempo. Os valores de B, M e C só precisarão ser calculados no início de cada novo intervalo. E isto porque existe a possibilidade de Δt ser variável, se não somente C seria repetido, sendo B e M calculados uma única vez em todo o processamento.

Comparando 6.17 com 6.11 fica evidente o ganho que se obtém ao adotar o procedimento exemplificado. Portanto, nos passos que se seguem, será esta a filosofia adotada.

Os modelos de compensadores estáticos que serão implementados no programa são:

. modelo linear simplificado (Figura 5.13)

. modelo linear de reator controlado por tiristores (Figura 5.10)

. modelo de reator com núcleo saturado (Figura 5.21)

Os modelos com "droop" de corrente não foram incluídos por representarem filosofias mais ligadas a determinados fabricantes, não dando um caráter tão genérico quanto o que se deseja neste trabalho. No entanto, a adaptação destes e outros modelos é simples, bastando seguir a modelagem matemática apresentada anteriormente e fazendo sua introdução nas rotinas específicas dos compensadores estáticos, como será descrito em 6.3. Com esta consideração final pode-se partir para a abordagem matemática dos modelos escolhidos.

6.2.1 - Desenvolvimento Algébrico do Modelo Linear Simplificado de Compensador Estático

Este modelo pode retratar com razoável precisão o desempenho de qualquer tipo de compensador estático, tenha ele controle externo ou não. Por isto ele foi escolhido como primeiro a ser adaptado.

Relembrando que as equações matemáticas trabalham com sinais de erro, admitindo-se que no regime permanente inicial todos os erros sejam nulos, dever-se-á adaptar os diagramas de blocos a estas condições. Para tanto será necessário criar pontos nos diagramas onde se possa somar os valores iniciais aos sinais de erro a fim de obter a saída apropriada.

Uma observação geral a ser feita é que as integrais trabalharão com variáveis calculadas no instante anterior e no instante em curso. Sendo assim, para diferenciá-los adotou-se a letra "o" como índice das variáveis do instante anterior.

Outro ponto importante, e que deve ser tratado com cuidado ao programar as equações, é quando a saída do mode

lo, no caso a susceptância, atingir um limite. As variáveis integráveis deverão ficar fixas nos valores que geram o número limite, e não ultrapassá-los. Caso isto ocorresse, haveria um acúmulo de erro irreal nos integradores, pois no Capítulo 5 ficou claro que o regulador não faz este tipo de função. O Capítulo 7 mostrará que a não observância deste ponto impede que o C.E. volte a atuar tão logo sua solicitação seja abrandada. Este procedimento não tem como ser feito no desenvolvimento matemático, mas somente na ocasião da programação.

Passando ao desenvolvimento específico do modelo genérico, tem-se na Figura 6.3 seu diagrama de blocos adaptados à utilização dos valores iniciais.

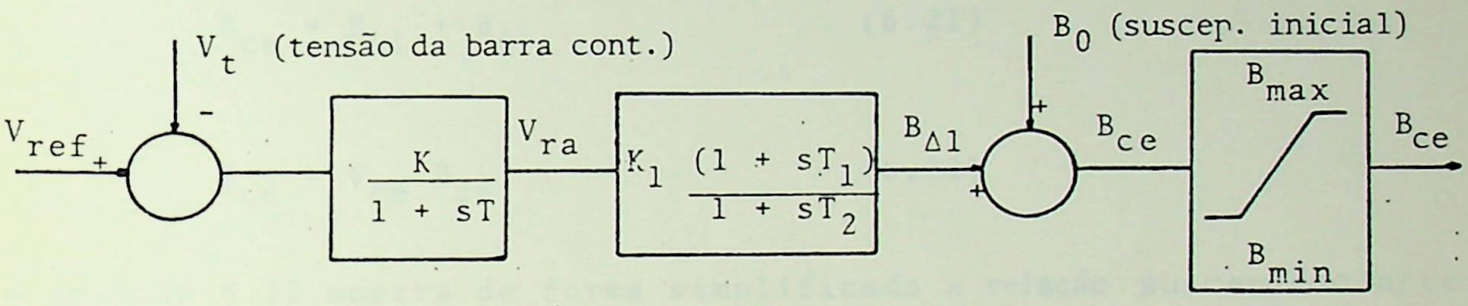


Figura 6.3 - Modelo Linear Genérico com adaptação para considerar as condições iniciais

Este diagrama pode ter seu bloco "lead-lag" rearranjado conforme a Figura 6.4.

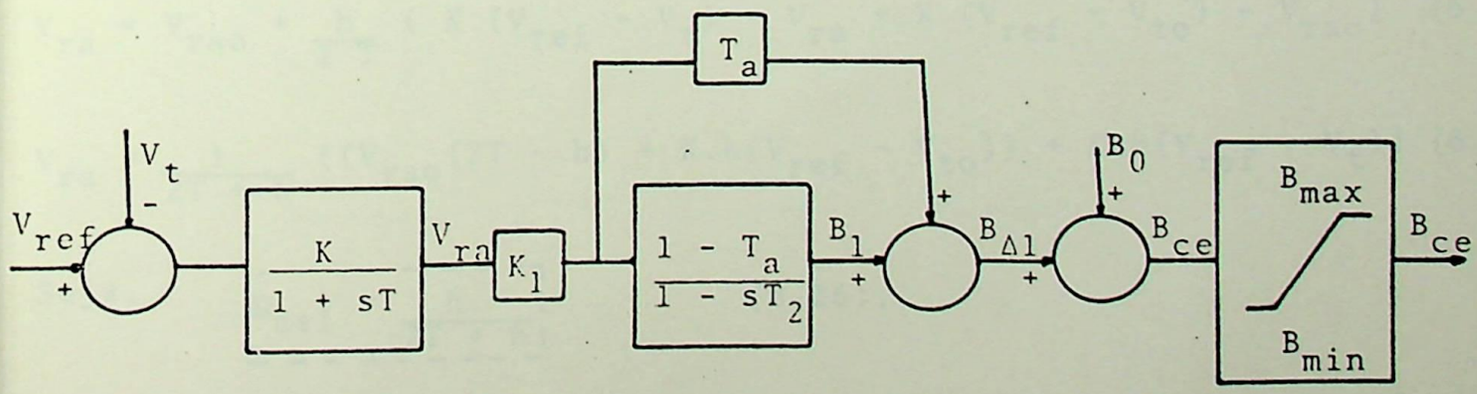


Figura 6.4 - Modelo Linear Genérico com rearranjo do bloco "lead-lag"

Com isto , tem-se as seguintes equações diferenciais:

$$sV_{ra} = \{ K (V_{ref} - V_t) - V_{ra} \} / T \qquad (6.18)$$

$$sB_1 = \{ V_{ra} K_1 (1 - T_a) - B_1 \} / T_2 \qquad (6.19)$$

E mais as seguintes equações algébricas:

$$B_{\Delta 1} = V_{ra} K_1 T_a + B_1 \qquad (6.20)$$

$$B_{ce} = B_{\Delta 1} + B_0 \qquad (6.21)$$

$$I_{ce} = V_{ce} B_{ce} \qquad (6.22)$$

A equação 6.22 mostra de forma simplificada a relação susceptância/corrente. A forma mais exata de relação entre tais variáveis é a de 6.1 .

Desenvolvendo o método trapezoidal para as equações diferenciais acima, tem-se as duas etapas que se seguem.

1ª. etapa:

$$V_{ra} = V_{rao} + \frac{h}{2} (sV_{ra} + sV_{rao}) \qquad (6.23), \text{ onde } h = \Delta t$$

$$V_{ra} = V_{rao} + \frac{h}{2T} \{ K (V_{ref} - V_t) - V_{ra} + K (V_{ref} - V_{to}) - V_{rao} \} \qquad (6.24)$$

$$V_{ra} = \frac{1}{2T + h} \{ (V_{rao} (2T - h) + K.h(V_{ref} - V_{to})) + K.h(V_{ref} - V_t) \} \qquad (6.25)$$

Seja, $\boxed{D_{cel} = \frac{h}{2T + h}}$ (6.26),

e $\boxed{M_{cel} = K.D_{cel}}$ (6.27),

então,

$$V_{ra} = V_{rao} (1 - 2D_{cel}) + M_{cel} (2V_{ref} - V_{to}) - M_{cel} V_t \qquad (6.28).$$

Seja ainda:

$$C_{cel} = V_{rao}(1 - 2D_{cel}) + M_{cel}(2V_{ref} - V_{to}) \qquad (6.29),$$

então

$$V_{ra} = C_{cel} - M_{cel}V_t \qquad (6.30)$$

2ª. etapa:

$$B_1 = B_{1o} + \frac{h}{2T_2}\{(1 - T_a)\,V^*_{ra} - B_1 + (1 - T_a)\,V^*_{rao} - B_{1o}\} \qquad (6.31),$$

onde $V^*_{ra} = K_1\,V_{ra}$, e $V^*_{rao} = K_1\,V_{rao}$

$$B_1 = B_{1o}\,\frac{(2T_2 - h)}{2T_2 + h} + h\,\frac{(1 - T_a)}{2T_2 + h}\,V^*_{rao} + h\,\frac{(1 - T_a)}{2T_2 + h}\,V^*_{ra} \qquad (6.32)$$

Colocando em termos de $B_{\Delta 1}$ e $B_{\Delta 1o}$, onde

$$B_{\Delta 1o} = V^*_{rao} + B_{1o} \qquad (6.33),$$

tem-se:

$$B_{\Delta 1} = (B_{1o} + V^*_{rao}T_a)\frac{(2T_2 - h)}{2T_2 + h} - V^*_{rao}T_a\frac{(2T_2 - h)}{2T_2 + h} + V^*_{rao}\frac{h(1 - T_a)}{2T_2 + h} + \{\frac{h(1 - T_a)}{2T_2 + h} + T_a\}\,V^*_{ra} \qquad (6.34)$$

$$B_{\Delta 1} = B_{\Delta 1o}\frac{(2T_2 - h)}{2T_2 + h} + V^*_{rao}\{\frac{h(1 - T_a)}{2T_2 + h} - T_a\frac{(2T_2 - h)}{2T_2 + h}\} + V^*_{ra}\{\frac{h(1 - T_a)}{2T_2 + h} + T_a\} \qquad (6.35)$$

Seja ainda,

$$D_{ce2} = \frac{h}{2T_2 + h} \qquad (6.36);$$

$$D_{ce3} = (1 - D_{ce2}) = \frac{2T_2 - h}{2T_2 + h} \qquad (6.37)$$

e

$$D_{ce4} = D_{ce2}(1 - T_a) \qquad (6.38)$$

Então obtém-se:

$$B_{\Delta 1} = B_{\Delta 1o} D_{ce3} + V^*_{rao}(D_{ce4} - T_a D_{ce3}) + V^*_{ra}(D_{ce4} + T_a) \qquad (6.39).$$

Sendo ainda

$$\boxed{R_{ceo} = B_{\Delta 1o} D_{ce3} + V_{rao} K_1 (D_{ce4} - T_a D_{ce3})} \qquad (6.40),$$

e

$$\boxed{R_{cex} = (D_{ce4} + T_a) K_1} \qquad (6.41),$$

tem-se a seguinte fórmula reduzida para $B_{\Delta 1}$:

$$\boxed{B_{\Delta 1} = R_{ceo} + R_{cex}\, V_{ra}} \qquad (6.42).$$

Das duas etapas acima, as equações em destaque 6.30 e 6.42 serão as únicas a serem recalculadas a cada iteração do processo de convergência do método trapezoidal implícito. Todas as demais equações destacadas só serão calculadas uma vez por passo de integração (h).

Com respeito aos limites, neste modelo, em específico, deve-se impedir o crescimento de V_{ra} tão logo os limites sejam atingidos, mesmo havendo uma entrada de erro em seu integrador. Assim não ocorrerá acúmulo de erro no modelo até que a entrada do integrador inverta sua tendência, fazendo com que V_{ra} diminua em módulo e, por conseguinte, a susceptância volte para a faixa controlável.

Completando as equações deste modelo, tem-se que:

$$B_{ce} = \begin{cases} B_{max} & \text{se} \quad B_{\Delta 1} + B_0 > B_{max} \\ B_{\Delta 1} + B_0 & \text{se} \quad B_{min} < B_{\Delta 1} + B_0 < B_{max} \\ B_{min} & \text{se} \quad B_{\Delta 1} + B_0 < B_{min} \end{cases} \qquad (6.43)$$

Estes cálculos também são realizados a cada iteração.

6.2.2 - Desenvolvimento Algébrico do Modelo Linear de Compensador Estático com Reator Controlado por Tiristores

Este modelo, que representa o compensador estático mesmo que ele tenha capacitores fixos ou chaveados por tiristores, conforme discutido no Capítulo 5, é uma sofisticação do modelo desenvolvido em 6.2.1. Logo, nada mais lógico do que aproveitar as equações já desenvolvidas e somente complementá-las. E este procedimento também deve ser adotado no momento da programação. O modelo apresentado na Figura 6.5, difere daquele desenvolvido no Capítulo 5 , Figura 5.10 , por ter um polo a menos. Isto se deve ao fato comum de se desprezar a constante de tempo relativa ao atraso do disparo dos tiristores. Assim, o bloco em T_5 representa a medição ou o disparo. Sua localização no final do diagrama não traz erros, como comprova a teoria da álgebra dos diagramas de bloco (Referência 26), auxiliando apenas na passagem das equações para a linguagem do computador (usou-se o FORTRAN IV, nível G1).

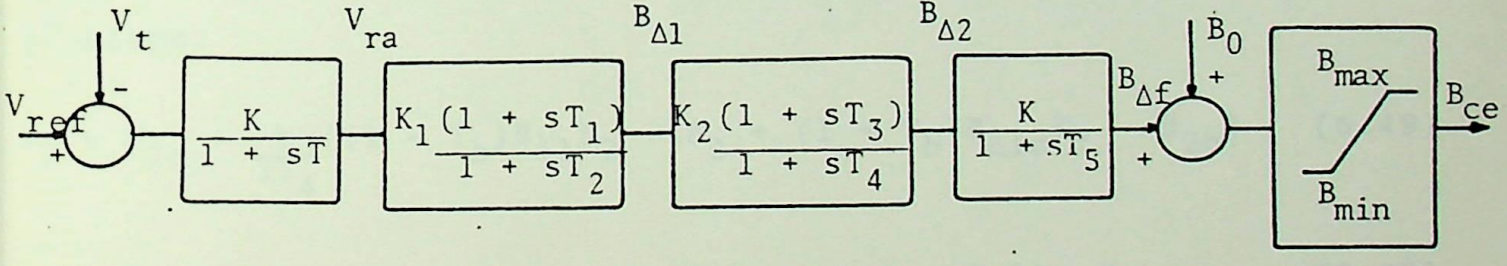


Figura 6.5 - Modelo Linear de Reator Controlado por Tiristores com adaptação para considerar as condições iniciais

Fazendo agora algumas adaptações nos blocos "lead-lag", chega-se à Figura 6.6.

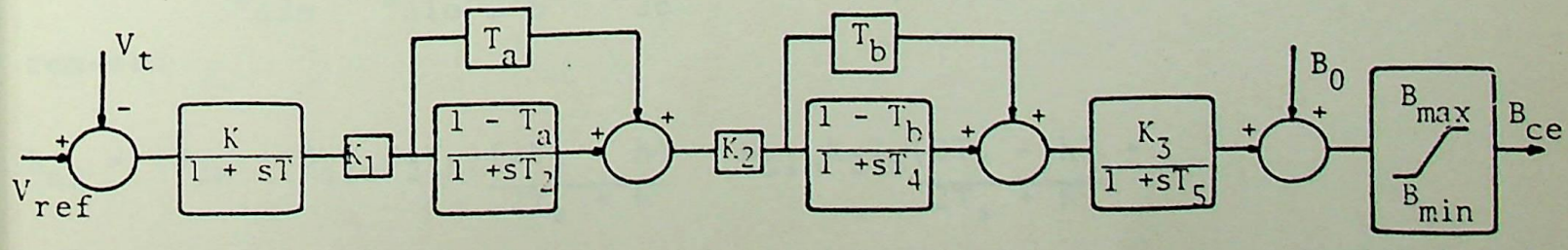


Figura 6.6 - Modelo Linear de Reator Controlado por Tiristores com rearranjo dos blocos "lead-lag"

O cálculo até $B_{\Delta 1}$ é de todo igual ao modelo linear genérico e por isto não será aqui repetido. Quanto às outras equações diferenciais tem-se:

$$sB_2 = \{B_{\Delta 1}K_2(1 - T_b) - B_2\} / T_4 \qquad (6.44)$$

$$sB_{\Delta f} = \{K_3 B_{\Delta 2} - B_{\Delta f}\} / T_5 \qquad (6.45)$$

e também as seguintes equações algébricas:

$$B_{\Delta 2} = B_{\Delta 1}K_2 T_b + B_2 \qquad (6.46)$$

$$B_{ce} = B_{\Delta f} + B_0 \qquad (6.47)$$

$$I_{ce} = B_{ce}V_{bce} \qquad (6.48)$$

Desenvolvendo agora o método trapezoidal para as equações diferenciais apresentadas, tem-se mais duas etapas:

1.ª etapa:

$$B_2 = B_{2o} + \frac{h}{2T_4}\{(1 - T_b)B_{\Delta 1}K_2 - B_2 + (1 - T_b)B_{\Delta 1o}K_2 - B_{2o}\} \qquad (6.49).\therefore$$

$$B_2 = B_{2o}\frac{(2T_4 - h)}{2T_4 + h} + \frac{h(1 - T_b)}{2T_4 + h}B_{\Delta 1o}K_2 + \frac{h(1 - T_b)}{2T_4 + h}B_{\Delta 1}K_2 \qquad (6.50)$$

Colocando em termos de $B_{\Delta 2}$ e $B_{\Delta 2o}$, onde

$$B_{\Delta 2o} = B_{\Delta 1o}K_2 T_b + B_{2o} \qquad (6.51),$$

tem-se:

$$B_{\Delta 2} = (B_{2o} + B_{\Delta 1o}K_2 T_b)\frac{(2T_4 - h)}{2T_4 + h} - B_{\Delta 1o}K_2 T_b\frac{(2T_4 - h)}{2T_4 + h} +$$

$$+ \{\frac{h(1 - T_b)}{2T_4 + h} + T_b\}B_{\Delta 1}K_2 + B_{\Delta 1o}K_2 h(1 - T_b) \qquad (6.52).\therefore$$

$$B_{\Delta 2} = B_{\Delta 20}\frac{(2T_4 - h)}{2T_4 + h} + B_{\Delta 1o}K_2\{h(1 - T_b) - T_b\frac{(2T_4 - h)}{2T_4 + h}\} +$$

$$+ B_{\Delta 1}K_2\{\frac{h(1 - T_b)}{2T_4 + h} + T_b\} \qquad (6.53)$$

Seja ainda:

$$\boxed{D_{ce5} = \frac{h}{2T_4 + h}} \qquad (6.54);$$

$$\boxed{D_{ce6} = (1 - 2D_{ce5}) = \frac{2T_4 - h}{2T_4 + h}} \qquad (6.55);$$

e

$$\boxed{D_{ce7} = D_{ce5}(1 - T_b)} \qquad (6.56).$$

Então tem-se:

$$B_{\Delta 2} = B_{\Delta 2o}D_{ce6} + B_{\Delta 1o}K_2(D_{ce7} - T_bD_{ce6}) + B_{\Delta 1}K_2(D_{ce7} + T_b) \qquad (6.57)$$

E, sendo

$$\boxed{R_{ce2o} = B_{\Delta 2o}D_{ce6} + B_{\Delta 1o}K_2(D_{ce7} - T_bD_{ce6})} \qquad (6.58)$$

$$\boxed{R_{cex2} = K_2(D_{ce7} + T_b)} \qquad (6.59)$$

tem-se:

$$\boxed{B_{\Delta 2} = R_{ce2o} + R_{cex2}B_{\Delta 1}} \qquad (6.60)$$

2ª. etapa:

$$B_{\Delta f} = B_{\Delta fo} + \frac{h}{2}(sB_{\Delta f} + sB_{\Delta fo}) \qquad (6.61)$$

$$B_{\Delta f} = B_{\Delta fo} + \frac{h}{2T_5}(K_3B_{\Delta 2} - B_{\Delta f} + K_3B_{\Delta 2o} - B_{\Delta fo}) \qquad (6.62).\therefore$$

$$B_{\Delta f} = \frac{h}{2T_5 + h}\{B_{\Delta fo}(2T_5 - h) + K_3B_{\Delta 2o}h + K_3B_{\Delta 2}h\} \qquad (6.63)$$

Seja

$$D_{ce8} = \frac{h}{2T_5 + h} \qquad (6.64), \text{ e} \qquad M_{ce2} = K_3 D_{ce8} \qquad (6.65)$$

Então,

$$B_{\Delta f} = B_{\Delta fo}(1 - 2D_{ce8}) + M_{ce2}B_{\Delta 2o} + M_{ce2}B_{\Delta 2} \qquad (6.66)$$

Seja ainda

$$C_{ce2} = B_{\Delta fo}(1 - 2D_{ce8}) + M_{ce2}B_{\Delta 2o} \qquad (6.67)$$

Com isto, tem-se por fim:

$$B_{\Delta f} = C_{ce2} + M_{ce2}B_{\Delta 2} \qquad (6.68)$$

Um compensador estático representado por este modelo executará, a cada passo de iteração do método trapezoidal, as equações 6.30, 6.42, 6.60 e 6.68. As demais equações em destaque aqui desenvolvidas, bem como aquelas do modelo linear genérico, serão resolvidas no início de cada novo intervalo de integração.

A forma de considerar os limites de susceptância é a mesma do modelo anterior.

Complementando as equações, tem-se:

$$B_{ce} = \begin{cases} B_{max} & \text{se} \quad B_{\Delta f} + B_0 > B_{max} \\ B_{\Delta f} + B_0 & \text{se} \quad B_{min} < B_{\Delta f} + B_0 < B_{max} \\ B_{min} & \text{se} \quad B_{\Delta f} + B_0 < B_{min} \end{cases} \qquad (6.69)$$

E de forma semelhante à modelagem já feita, a equação 6.69 também se repetirá a cada iteração.

Finalizando as considerações dos dois modelos já desenvolvidos, deve-se alertar para a possibilidade do usuário querer tornar nula uma das constantes de tempo. Isto deve ser encarado como procedimento normal, o que implica em dotar o programa digital de recursos que permitam não considerar os polos ou zeros nulos, deixando o processamento seguir normalmente para o restante dos blocos.

Esta filosofia é adotada nos modelos de máquinas e reguladores do programa.

6.2.3 - Desenvolvimento Algébrico do Compensador Estático do Tipo Reator Saturado com Capacitor de Correção de Inclinação

A modelagem dinâmica deste C.E. envolve uma série de particularidades que já foram estudadas no Capítulo 5, e que serão novamente destacadas para auxiliar a melhor compreensão do desenvolvimento que se seque:

- O principal atraso na resposta deste compensador estático deve-se ao capacitor de correção de inclinação.
- A capacidade de geração de reativo deste C.E., não levando em conta os possíveis capacitores "shunt" que compõem o sistema de compensação estática como um todo, é praticamente nula, podendo, assim, ser desprezada sem maiores prejuízos.
- O limite de absorção de reativo deste C.E. encontra-se na máxima corrente suportável pelo reator e na máxima tensão suportável pelo capacitor de correção de inclinação.
- O C.E. a reator de núcleo saturado, por ser um equipamento de controle inerente, só exerce ação de regulação diretamente na barra a qual ele está conectado, não podendo, portanto, agir de forma a controlar a tensão de uma barra remota.

Tendo em mente as observações acima, serão desenvolvidas agora as equações algébricas do modelo dinâmico do compensador estático do tipo reator saturado, para aplicação do método trapezoidal implícito de integração.

O modelo dinâmico genérico deste tipo de C.E., conforme desenvolvimento já apresentado, e já preparado para ser usado em simulações digitais, é dado pela Figura 6.7.

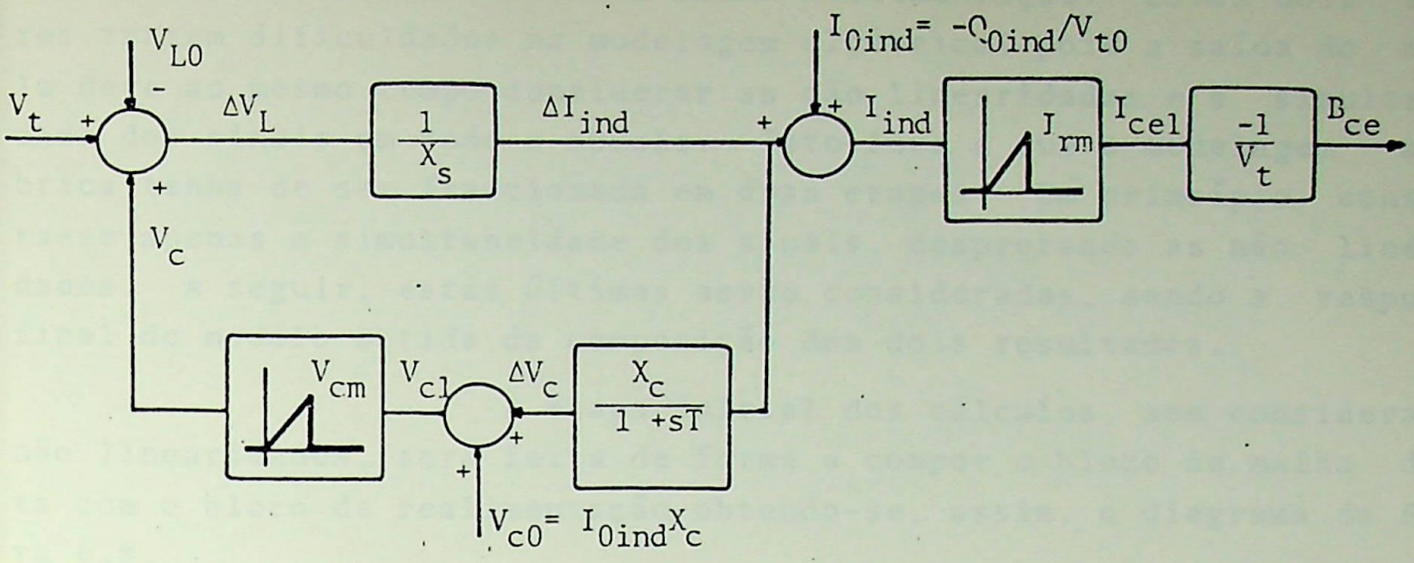


Figura 6.7 - Modelo de Reator de Núcleo Saturado com adaptação para considerar as condições iniciais

Como esta figura tem uma série de definições novas com relação ao modelo da Figura 5.21, vale explicá-las.

V_{L0} = tensão inicial do reator $V_{t0} + V_{c0}$ (p.u.)

Q_{0ind} = reativo do C.E. no instante inicial (p.u.)

V_{t0} = tensão na barra do C.E. no instante inicial (p.u.)

$V_{cmáx}$ = tensão máxima do capacitor de correção de inclinação (p.u.)

$I_{rmáx}$ = corrente máxima do reator de núcleo saturado (p.u.)

X_s = reatância na parte saturada do reator (p.u.)

X_c = módulo da reatância do capacitor (p.u.)

T = atraso na resposta devido ao capacitor (seg.)

Observação: a adoção da tensão inicial do reator no modelo, assumindo que ele se encontra na faixa saturada, permite prescindir do cálculo explícito da tensão do joelho de saturação do mesmo, V_j.

Como se pode ver, o modelo apresentado só tem retardo de tempo na malha de realimentação, e uma de suas não lineari

dades encontra-se também nesta mesma realimentação. Estes dois fatores trazem dificuldades na modelagem algébrica, pois a saída do modelo deve ao mesmo tempo considerar as não linearidades e a simultaneidade dos sinais em todo o modelo. Isto leva a que a modelagem algébrica tenha de ser fraccionada em duas etapas. Em princípio considera-se apenas a simultaneidade dos sinais, desprezando as não linearidades. A seguir, estas últimas serão consideradas, sendo a resposta final do modelo obtida da composição dos dois resultados.

A etapa inicial dos cálculos, sem considerar as não linearidades, será feita de forma a compor o bloco de malha direta com o bloco de realimentação, obtendo-se, assim, o diagrama da Figura 6.8.

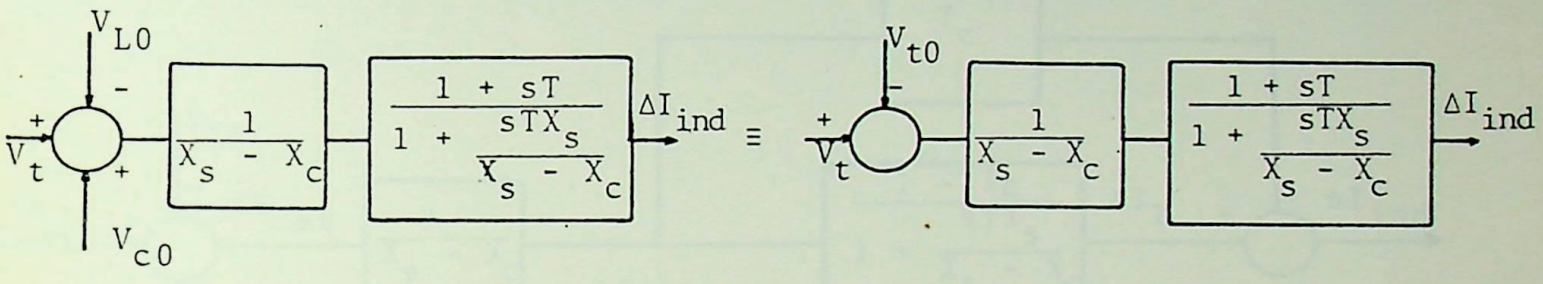


Figura 6.8 - Linearização do modelo de Reator de Núcleo Saturado

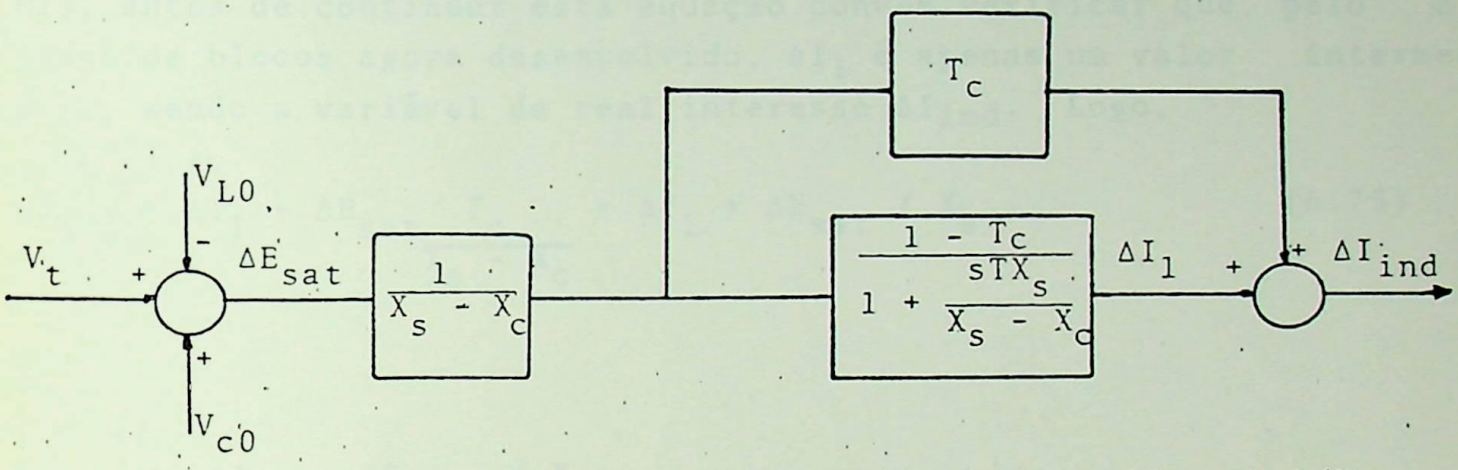
Com este valor de ΔI_{ind} obtido, passa-se então à 2ª etapa, calculando, através da malha de realimentação, um valor de V_C já corrigido por seu limitador. A partir daí chega-se a um novo ΔI_{ind}, agora calculado pela malha direta do diagrama de blocos inicialmente apresentado na Figura 6.7

Neste ponto é importante notar que, no caso de atuação da proteção do capacitor, o 2º valor calculado para ΔI_{ind} será diferente do primeiro. E é este último número que sairá da rotina de simulação dos C.E.'s para integrar a gama de dados que comporão o vetor de correntes injetadas no sistema. A partir daí, será verificada a convergência do processo iterativo do método trapezoidal, compondo-se agora com as equações de rede do sistema elétrico em um determinado intervalo de tempo.

Como se vê, pode-se reafirmar que embora haja [illegible] entre o pri-

ΔI_{ind}, não é isto que importa, mas sim a convergência dos valores calculados na 2ª etapa para um único ponto. E este item terá que ser cumprido, pois só assim poderá uma determinada etapa iterativa ser considerada convergente, ou seja, o próprio método se encarrega de levar o valor da corrente injetada pelo compensador no sistema elétrico para um ponto coerente na resolução das equações diferenciais e algébricas que compõem a rede.

A partir destas considerações pode-se iniciar a formulação matemática, com base no diagrama da Figura 6.8. Para começar, adequa-se o diagrama de blocos da primeira etapa de cálculo de ΔI_{ind}, Figura 6.9.



$$T_c = T \,/\, (TX_s/(X_s - X_c)) \;\therefore\; T_c = (X_s - X_c)/X_s$$

Figura 6.9 - Rearranjo do diagrama linearizado do modelo de Reator de Núcleo Saturado

Deste diagrama obtém-se a seguinte equação diferencial:

$$\Delta E_{sat}\frac{(1 - T_c)}{X_s - X_c} = \Delta I_1\{1 + sT\frac{X_s}{X_s - X_c}\} \qquad (6.70)$$

Substituindo T_c e eliminando o denominador

$$\Delta E_{sat}X_c = \Delta I_1 X_s(X_s - X_c) + s\Delta I_1 X_s^2 T \qquad (6.71) \therefore$$

$$s\Delta I_1 = \{\Delta E_{sat}X_c - \Delta I_1 X_s(X_s - X_c)\} \,/\, X_s^2 T \qquad (6.72)$$

Desenvolvendo agora a adaptação da equação diferencial acima, para ser resolvida pelo método trapezoidal, tem-se:

$$\Delta I_1 = \Delta I_{1o} + \frac{h}{2X_s^2 T}\{\Delta E_{sat} X_c - \Delta I_1 X_s (X_s - X_c) + \Delta E_{sato} X_c +$$

$$- \Delta I_{1o} X_s (X_s - X_c)\} \qquad (6.73) \therefore$$

$$\Delta I_1 \{2X_s^2 T + hX_s (X_s - X_c)\} = \Delta I_{1o}\{2X_s^2 T - hX_s (X_s - X_c)\} +$$

$$+ \Delta E_{sato} hX_c + \Delta E_{sat} hX_c \qquad (6.74)$$

Mas, antes de continuar esta equação convém verificar que, pelo diagrama de blocos agora desenvolvido, ΔI_1 é apenas um valor intermediário, sendo a variável de real interesse ΔI_{ind}. Logo,

$$\Delta I_{ind} = \Delta I_1 + \Delta E_{sat} \frac{T_c}{X_s - X_c} = \Delta I_1 + \Delta E_{sat} / X_s \qquad (6.75)$$

E,

$$\Delta I_{indo} = \Delta I_{1o} + \Delta E_{sato} / X_s \qquad (6.76)$$

Sendo assim, pode-se eliminar ΔI_1 e ΔI_{10} das equações do método do trapezoidal, obtendo então:

$$\{\Delta I_{ind} - \Delta E_{sat} / X_s\}\{2X_s^2 T + hX_s (X_s - X_c)\} =$$

$$= \{\Delta I_{indo} - \Delta E_{sato} / X_s\}\{2X_s^2 T - hX_s (X_s - X_c)\} + \Delta E_{sato} hX_c + \Delta E_{sat} hX_c \qquad (6.77) \therefore$$

$$\Delta I_{ind}\{2X_s^2 T + hX_s (X_s - X_c)\} = \Delta I_{indo}\{2X_s^2 T - hX_s (X_s - X_c)\} +$$

$$+ \Delta E_{sato}(hX_c - 2X_s T + hX_s - hX_c) +$$

$$+ \Delta E_{sat}(hX_c - 2X_s T + hX_s - hX_c) \qquad (6.78)$$

Logo, $\Delta I_{ind} = \frac{1}{2X_s T + h(X_s - X_c)}\{\Delta I_{indo}(2X_s T - h(X_s - X_c)) +$

$$+ \Delta E_{sato}(h - 2T) + \Delta E_{sat}(2T + h)\} \qquad (6.79)$$

Seja agora, $$Q_{ce1} = 2X_s T \tag{6.80}$$

$$Q_{ce2} = h(X_s - X_c) \tag{6.81}$$

$$Q_{ce3} = 2T + h \tag{6.82}$$

Com isto tem-se:

$$\Delta I_{ind} = \frac{1}{Q_{ce1} + Q_{ce2}} \{\Delta I_{indo}(Q_{ce1} - Q_{ce2}) + \Delta E_{sato}(Q_{ce3} - 4T)\} + \Delta E_{sat} \frac{Q_{ce3}}{Q_{ce1} + Q_{ce2}} \tag{6.83}$$

onde, $$E_{sat} = V_t + V_{c0} - V_{L0} = V_t - V_{t0} = V_t - V_{ref} \tag{6.84}$$

Seja ainda:

$$P_{ce1} = \frac{Q_{ce3}}{Q_{ce1} + Q_{ce2}} \tag{6.85}$$

$$P_{ceo} = \{\Delta I_{indo}(Q_{ce1} - Q_{ce2}) + (V_{to} - V_{ref})(2Q_{ce3} - 4T) + V_{to} Q_{ce3}\} / (Q_{ce1} + Q_{ce2}) \tag{6.86}$$

Assim, tem-se por fim a forma definitiva das equações da primeira etapa:

$$\boxed{\Delta I_{ind} = P_{ceo} + P_{ce1} V_t} \tag{6.87}$$

Passando para a próxima etapa, deve-se calcular qual a tensão no capacitor de correção de inclinação devida à nova corrente obtida a partir do primeiro valor de ΔI_{ind}. Isto pode ser obtido com base no ramo de realimentação do diagrama de blocos da Figura 6.7.

Tendo como ponto de partida ΔI_{ind} já calculado, pode-se montar as seguintes equações para V_c:

$$s\Delta V_c = (X_c \Delta I_{ind} - \Delta V_c) / T \tag{6.88}$$

$$V_{c1} = V_{c0} + \Delta V_c \tag{6.89}$$

$$V_c = \begin{cases} V_{c1} & \text{se} \quad 0 \leq V_{c1} \leq V_{cm} \\ 0 & \text{se} \quad V_{c1} < 0 \text{ ou } V_{c1} > V_{cm} \end{cases} \qquad (6.90)$$

Cabe neste ponto algumas considerações sobre a atuação da proteção de sobretensão do capacitor. Se ela for feita por tiristores ou por "gap's" o capacitor poderá voltar a funcionar tão logo haja condições. Mas se a proteção que faz o "by-pass" for por disjuntor, ela deverá ser considerada permanente, isto é, depois que atuou uma vez o capacitor ficará inativo no restante da simulação. E como existem as duas possibilidades, o modelo aqui desenvolvido apresentará possibilidade de escolha entre elas. Cumpre ressaltar que, a princípio, esta diferença não acarreta modificações no equacionamento dos dois modelos.

Adaptando a equação diferencial da tensão no capacitor de correção de inclinação ao método trapezoidal implícito de integração, tem-se:

$$\Delta V_c = \Delta V_{co} + \frac{h}{2}(s\Delta V_c + s\Delta V_{co}) \qquad (6.91)$$

$$\Delta V_c = \Delta V_{co} + \frac{h}{2T}(X_c\Delta I_{ind} - \Delta V_c + X_c\Delta I_{indo} - \Delta V_{co}) \qquad (6.92)$$

$$\Delta V_c = \frac{1}{2T + h}\{\Delta V_{co}(2T - h) + hX_c\Delta I_{indo} + hX_c\Delta I_{ind}\} \qquad (6.93)$$

No entanto, as equações acima ainda não levam em conta as possíveis atuações de proteção do instante anterior. E isto deve ser considerado, pois o bloco em enfoque pretende aproximar-se da atuação real do capacitor na freqüência fundamental. Sendo assim, serão feitas algumas modificações nas equações acima.

Como $\Delta V_c = V_{c1} - V_{c0}$, então $\Delta V_{co} = V_{clo} - V_{c0}$.

É conveniente ressaltar que, se a proteção do capacitor atuar, ele será descarregado. E, quando houver condições dele ser reenergizado , certos transitórios eletromagnéticos ocorrerão. No entanto, devido

prezados na presente modelagem.

Substituindo as duas igualdades acima na equação de ΔV_c , tem-se:

$$V_{c1} - V_{c0} = \frac{1}{2T + h}\{(V_{c1o} - V_{c0})(2T - h) + hX_c\Delta I_{indo} + hX_c\Delta I_{ind}\} \quad (6.94)$$

$$V_{c1} = \frac{1}{2T + h}(V_{c1o}(2T - h) + V_{c0}2h + hX_c\Delta I_{indo} + hX_c\Delta I_{ind}) \quad (6.95)$$

Seja agora,

$$\boxed{Q_{ce4} = \frac{h}{2T + h}} \quad (6.96)$$

$$\boxed{P_{ce3} = X_c Q_{ce4}} \quad (6.97)$$

Então,

$$V_{c1} = V_{c1o}(1 - Q_{ce4}) + 2Q_{ce4}V_{c0} + P_{ce3}\Delta I_{indo} + P_{ce3}\Delta I_{ind} \quad (6.98)$$

Seja ainda,

$$\boxed{P_{ce4} = V_{c1o}(1 - 2Q_{ce4}) + 2Q_{ce4}V_{c0} + P_{ce3}\Delta I_{indo}} \quad (6.99)$$

Obtém-se finalmente que,

$$\boxed{V_{c1} = P_{ce4} + P_{ce3}\Delta I_{ind}} \quad (6.100)$$

Feito isto, calcula-se V_c pela equação de não linearidade já vista , e em seguida ΔI_{ind}, agora pelo modelo que leva em conta as não linearidades. Com isto, obtém-se:

$$\Delta I_{ind} = (V_t + V_c - V_{I.0}) / X_s \quad (6.101)$$

e,
$$P_{ce5} = \frac{V_{L0}}{X_s} = \frac{V_{ref} + V_{c0}}{X_s} \qquad (6.102)$$ ∴

$$\Delta I_{ind} = \{(V_t + V_c) / X_s\} - P_{ce5} \qquad (6.103)$$

A partir daí, pode-se proceder com o cálculo da corrente injetada por este tipo de C.E. no sistema elétrico.

$$I_{ind} = \Delta I_{ind} + I_{0ind} \qquad (6.104)$$

$$I_{ce} = \begin{cases} -I_{ind} & \text{se} \quad 0 < I_{ind} \leq I_{rm} \\ 0 & \text{se} \quad I_{ind} \leq 0 \quad \text{ou} \quad I_{ind} > I_{rm} \end{cases} \qquad (6.105)$$

A atuação desta unidade de proteção do reator é por disjuntor, e seu efeito é único, ou seja, depois que atua uma vez o reator saturado ficará fora do restante da simulação.

Como nos modelos anteriores, somente as equações 6.87, 6.100 e 6.103 e 6.104/6.105 serão resolvidas a cada passo iterativo. Todas as demais equações em destaque só serão atualizadas no início de cada novo instante de simulação.

Com respeito ao acúmulo de erro nas integrações após os limites de proteção serem ativados, a maneira de desenvolvimento algébrico adotada só permitirá tal possibilidade nos cálculos de V_{c1}. Sendo assim, bastará impedir que o valor de V_{c1} ultrapasse o valor máximo de tensão do capacitor para que o problema não mais ocorra.

6.2.4 - Desenvolvimento Algébrico para Novos Modelos de Compensadores Estáticos

A introdução de novos modelos de compensadores estáticos no programa ora utilizado, apesar de ser uma tarefa algo trabalhosa, tem uma metodologia estabelecida e que é bastante simples de ser seguida. No que tange ao desenvolvimento do modelo algébrico, os itens anteriores servem como excelente ferramenta-guia. No entanto, para clarear ainda mais o procedimento a ser seguido, acres

centa-se aqui alguns esclarecimentos complementares.

O tratamento dado aos diagramas de blocos dos três casos anteriores deixa evidente que a primeira etapa a ser executada é considerar os valores iniciais. Isto é muito simples, pois no caso dos C.E.'s basta somar, ao fim do cálculo da última variável integrável, o valor inicial de susceptância do equipamento. Assim, todas as variáveis integráveis são inicializadas em zero. Continuando a modificar o diagrama de blocos deve-se modificar cada um dos blocos a fim de tornar as equações mais simples. Normalmente reduz-se os blocos para ficarem na forma da Figura 6.2.

Feito isto, deve-se trabalhar as equações de forma a obter como resultado três tipos de variáveis: primeiramente as que são calculadas somente através de dados, tais como constantes de tempo, ganhos e passo de integração; a seguir as variáveis que consideram em seus cálculos aquelas do primeiro tipo, além de todas as informações do sistema que tenham sido calculadas no instante anterior ou sejam constantes, tais como tensão controlada, tensão de referência e variáveis integráveis; e por fim as variáveis integráveis propriamente ditas, que terão suas equações bastante simplificadas através da inclusão dos dois tipos acima, acrescidos das variáveis de controle (tensão controlada) no próprio instante de integração. Como exemplo pode-se citar a equação 6.41 para o primeiro tipo, 6.40 para o segundo e 6.42 para o terceiro.

A seguir, as equações obtidas deverão ser acrescentadas nas subrotinas próprias aos tipos delas, como será explicado no próximo item deste capítulo. É claro que junto com elas deverão existir algumas operações lógicas a fim de considerar as não linearidades dos modelos, além de permitir possíveis simplificações, como não consideração de um ou outro bloco do diagrama. Enfim, deve-se proceder à adaptação do programa para incluir o novo modelo pretendido.

Vale notar que o procedimento acima, considerando a devida alteração na obtenção e saída de dados, também é válido para a modelagem de reguladores de tensão ou velocidade, outros tipos de máquinas, ou qualquer equipamento que tenha seu comportamento no tempo descrito por equações diferenciais. E isto só é possível porque a modelagem dos compensadores estáticos seguiu exatamente a filosofia de desenvolvimento algébrico utilizada nos outros equipamentos existentes no programa.

6.3 - Introdução dos Compensadores Estáticos no Programa de Estabilidade Transitória

Após terem sido vistos os principais recursos matemáticos utilizados na modelagem algébrica dos modelos de compensadores estáticos, dentro do programa digital a ser modificado, reveste-se de grande importância a descrição das alterações efetuadas nas rotinas existentes, bem como a apresentação das novas rotinas introduzidas. A partir destas informações, este capítulo dará totais condições a outros usuários do mesmo programa de introduzirem seus próprios modelos de C.E.'s.

Em termos filosóficos, o trabalho desenvolvido na adaptação do programa procurou seguir dois itens básicos: não alterar a estrutura utilizada no tratamento dado às várias etapas do processamento (aquisição de dados, cálculos iterativos, impressão dos dados de saída, etc.); e modificar o mínimo possível as rotinas já existentes, criando novas rotinas específicas para os compensadores estáticos. A forma como o programa foi concebido facilitou demais o cumprimento destes objetivos, dando como vantagem extra o fato de praticamente todas as rotinas dos C.E.'s serem análogas em função às rotinas utilizadas para máquinas síncronas, reguladores de tensão ou velocidade e motores de indução. E para melhor visualizar estas afirmações será feita a seguir uma suscinta descrição da forma de funcionamento do programa, destacando as subrotinas que executam as principais funções, e que tipo de alteração sofreram pela entrada dos C.E.'s, além da apresentação de todas as subrotinas dos estáticos.

6.3.1 - Descrição da Forma de Funcionamento do Programa de Estabilidade Transitória

O fluxograma apresentado no Anexo II deixa bem evidente a estrutura deste programa — ele procura fazer do programa principal apenas um gerenciador, deixando para subrotinas específicas o verdadeiro trabalho de manuseio de dados e cálculos. E mais, cada subrotina do programa tem uma função bem específica, não permitindo que elas sejam grandes e trabalhem com várias informações ao mesmo tempo. De forma bem genérica, o programa tem a seguinte divisão:

- Leitura dos dados de entrada;
- Preparação da matriz de impedância do sistema;

. Cálculo dos valores iniciais das variáveis;

. Cálculos dos variáveis que só se alteram a cada novo passo de integração;

. Processo iterativo de cálculo das variáveis do sistema e das variáveis integráveis;

. Preparação dos dados de saída ao fim de cada passo de integração;

. Impressão dos dados de saída ao fim do tempo de simulação da rede.

É claro que além da divisão acima o programa controla as várias modificações que a rede sofrerá numa simulação, permite a simulação de mais de um caso consecutivo com a mesma rede, ou mesmo a entrada de outra, supervisiona a coerência de dados e erros na simulação, e muitos outros pontos que não valem ser aqui comentados.

Para efeito de entendimento do caminho que foi seguido na introdução dos compensadores estáticos, o programa pode ser dividido nas seguintes etapas:

. Leitura dos dados de entrada;

. Inicialização das variáveis necessárias ao processamento;

. Resolução das equações de rede no instante inicial;

. Cálculo das variáveis das equações algébricas que só são calculadas no início de cada passo de integração;

. Extrapolação do valor das variáveis controláveis para o início dos cálculos do novo instante de integração;

. Resolução das equações de rede e das variáveis integráveis num processo iterativo;

. Armazenamento dos dados de saída requeridos ao fim de cada passo de integração;

. Impressão dos dados de saída ao fim do tempo de simulação estipulado.

Cada item acima especificado é executado por uma subrotina específica, que perfaz os cálculos e lida com os dados das máquinas síncronas, servindo ainda para chamar subrotinas de igual propósito para os motores de indução, reguladores e também para os compensadores estáticos.

Agora serão especificadas cada uma das subrotinas aludidas.

a) Subrotina GENIP

Lê os dados de entrada das máquinas síncronas, fazendo uma crítica de coerência, e armazenando estes dados em vetores que serão utilizados quando necessários. Chama a subrotina de leitura de dados dos motores de dução, reguladores de tensão, reguladores de velocidade e compensadores estáticos.

b) Subrotina INICAL

Inicializa as variáveis integráveis das máquinas síncronas, bem como dados como tensão de campo inicial, corrente injetada no sistema inicialmente, etc. Chama as rotinas de inicialização dos motores de indução, reguladores de tensão, reguladores de velocidade e compensadores estáticos, caso exista pelo menos um de cada tipo.

c) Subrotina SOL

Esta rotina resolve as equações que calculam as correntes injetadas pelas máquinas síncronas no sistema, e controla o processo iterativo que calcula as equações de rede e equações diferenciais do sistema a cada passo de integração. Em princípio ela inicia chamando a subrotina de cálculo das equações diferenciais pelo método trapezoidal. A seguir calcula as correntes injetadas pelas máquinas síncronas, e, se houver, as correntes injetadas pelos motores de indução e C.E.'s. Depois ela chama a rotina que calcula as tensões da rede, dada pela equação

$$[V] = [Y]^{-1} [I] \qquad (6.106),$$

já que as correntes são conhecidas.

Obtidas as novas tensões de rede, calcula-se a potência ativa das máquinas síncronas, e chama-se novamente a rotina de solução dos motores de indução — onde são calculadas as potências destes, e dos C.E.'s — onde se atualiza a tensão da barra controlada. Além disto, chama as rotinas de solução dos reguladores de tensão e velocidade para atualização das variáveis controláveis, e, por fim, chama novamente a rotina de cálculo das equações diferenciais. Em todo este processo há um controle de erro entre o novo valor e o valor da iteração anterior. Caso nenhum destes erros passe de um valor pré-especificado considera-se que houve convergência e a rotina se encerra. Do contrário, volta-se para um novo cálculo das correntes injetadas, tensões de rede, etc., assim se repetindo até a convergência. É claro que não convergindo após um certo número de iterações, o programa será interrompido com mensagem de erro.

Outra particularidade desta rotina é que ela realiza o mesmo processo, mas sem calcular as equações diferenciais, no início da simulação e toda vez que há modificação na configuração do sistema.

Esta subrotina chama ainda, no início de cada novo passo de integração, uma rotina ligada aos C.E.'s, que serve para inicializar as variáveis do método que auxiliará na convergência do processo quando o sistema estiver mal condicionado. A necessidade de introdução deste recurso no programa surgiu nos testes do modelo de reator de núcleo saturado, e será discutido no Capítulo 7.

d) Subrotina CONST

Nesta rotina, executada no início de cada novo instante de cálculo, ou seja, a cada passo de integração, são atualizadas as variáveis do método trapezoidal dos modelos de máquinas síncronas que só dependem das condições do sistema no instante anterior. Correspondem às variáveis do primeiro e segundo tipo das equações dos compensadores estáticos, conforme descritos em 6.2.4. Além disto, ela chama as subrotinas de mesma função para os motores de indução

ticos, reguladores de tensão e reguladores de velocidade, no caso destes equipamentos estarem sendo representados.

e) Subrotina EXTRA

Esta rotina faz a extrapolação linear das variáveis de controle das máquinas síncronas no início de cada novo passo de integração, bem como dos dados de entrada das equações. Utiliza, para tanto, de informações dos dois instantes anteriores, caso não tenha havido modificação na rede. Do contrário assume que o valor extrapolado será igual ao do instante anterior. Feito isto ela chama as rotinas de extrapolação dos motores de indução, compensadores estáticos, reguladores de tensão e reguladores de velocidade, no caso destes equipamentos estarem sendo representados.

f) Subrotina TRAP

Esta rotina, chamada pela subrotina SOL a cada nova iteração, calcula as variáveis integráveis das máquinas síncronas no instante atual. Correspondem às variáveis do terceiro tipo das equações dos C.E.'s, conforme descritas em 6.2.4. Vale notar que esta rotina não será chamada no instante zero nem nos cálculos efetuados logo após uma modificação da rede. Por fim, são chamadas as rotinas de mesma função para os motores de indução, compensadores estáticos, reguladores de tensão e reguladores de velocidade, no caso destes equipamentos estarem sendo representados.

g) Subrotina GENOP

Esta rotina armazena os dados de simulação das máquinas síncronas, conforme solicitados pelo usuário do programa. Ela é chamada ao fim do processo iterativo de cada passo de integração. Por seu intermédio são chamadas as subrotinas de função equivalente para os motores de indução, compensadores estáticos, reguladores de tensão e reguladores de velocidade, no caso destes equipamentos estarem sendo representados.

h) Subrotina SAÍDA

Esta rotina verifica a necessidade de impressão dos resultados das máquinas síncronas, motores de indução, compensadores estáticos, reguladores de tensão e reguladores de velocidade, acessando então as subrotinas que farão a impressão a partir dos dados armazenados na GENOP ou suas equivalentes. Ela é chamada ao fim do tempo total de simulação de um determinado caso.

Além das rotinas acima, que simplesmente foram modificadas com o fim de chamar as subrotinas dos compensadores estáticos que desempenham funções similares, o programa principal também foi alterado. Como nele são lidos os dados de tabelas e gráficos requeridos para cada equipamento, foi necessário incluir a leitura dos dados requeridos pelos C.E.'s.

Finalizando esta visão do programa, onde se destacou as rotinas que foram alteradas e que estão relacionadas com os C.E.'s, é importante esclarecer que a inclusão de novos modelos não exigirá nenhuma nova modificação nas mesmas, a não ser no caso de aumento da capacidade do programa em representar os estáticos (na versão adaptada permite-se vinte modelos).

6.3.2 - Descrição das Subrotinas Específicas para Simulação dos Compensadores Estáticos

Este item fará uma apresentação suscinta das rotinas incluídas para simulação dos compensadores estáticos, procurando evidenciar aquelas que deverão ser alteradas quando da inclusão de novos modelos.

Deve-se destacar, antes de falar das subrotinas, alguns pontos que foram assumidos a fim de tornar mais simples o manuseio de dados e introdução de novos modelos. Em primeiro lugar, como os C.E.'s são normalmente encarados como susceptâncias variáveis, será necessário que a saída de todos os modelos seja desta forma. Assim, nos modelos onde a saída não seja diretamente uma susceptância, deve-se transformar a saída em susceptância. Este recurso permite fazer com que a rotina de cálculo da corrente injetada pelos C.E.'s fique independente do tipo de modelo simulado.

O segundo ponto assumido diz respeito aos dados de saída. A fim de tornar genéricas as rotinas de armazenamento

de dados e impressão dos resultados da simulação, decidiu-se padronizar quais os dados a serem apresentados, independentemente do modelo simulado. Assim, o tabelamento e gráficos dos resultados dos C.E.' s incluirão a tensão da barra controlada e a susceptância líquida do equipamento em cada intervalo de integração.

Com estes esclarecimentos pode-se iniciar a descrição das subrotinas.

a) Subrotina CESIP

Chamada obrigatoriamente pela subrotina GENIP, ela identificará a presença de compensadores estáticos na simulação, lerá seus dados e os armazenará em vetores apropriados. Nela será identificado o modelo adotado para cada C.E. simulado, podendo, conforme o modelo , existir mais de um cartão de dados de entrada. Durante o armazenamento os dados sofrerão críticas quanto a coerência, e no caso de detecção de erro será impressa mensagem conveniente, sendo acionado um código do programa que interromperá sua execução por erro. No caso de haver pelo menos um C.E. esta rotina chamará a subrotina CESDAT, que imprimirá, em forma de tabelas, os dados de entrada de cada modelo de C.E. .

A introdução de um novo modelo de C.E. implicará na alteração desta rotina, a fim de que os dados deste modelo possam ser lidos.

b) Subrotina CESDAT

Chama pela subrotina CESIP no caso de existir pelo menos um C.E., ela imprime tabelas que informam os dados de entrada dos estáticos simulados. Cada tipo de C.E. tem sua própria tabela, impressa no início de uma nova folha, agrupando todos os dados de estáticos daquele modelo que estiverem presentes na simulação.

A introdução de um novo modelo implicará na alteração desta rotina, a fim de formar uma nova tabela que seja coerente com o modelo introduzido.

c) Subrotina CESIN

Chamada pela subrotina INICAL no caso de existirem C.E.'s sendo simulados, serve para inicializar as variáveis algébricas e integráveis dos estáticos, bem como alguns valores de controle para os modelos. Mais especificamente, é nela que é determinada a tensão de referência do C.E., a partir da tensão de regime permanente da barra controlada.

Para introduzir um novo modelo, esta rotina deverá ser alterada a fim de inicializar as variáveis do mesmo.

d) Subrotina CESSOL

Chamada duas vezes pela subrotina SOL, no caso de existirem C.E.'s, ela perfaz duas funções diferentes. Na primeira, antes da resolução das equações de rede, ela atualiza o vetor de correntes injetadas a partir das susceptâncias de saída dos modelos dos C.E.'s conforme desenvolvido em 6.1. Na segunda chamada, após a resolução das equações de rede, ela atualiza o vetor de tensões controladas pelos C.E.'s, bem como calcula o erro entre o novo valor e o valor anterior.

Nesta rotina também foi introduzido o cálculo do efeito das variações instantâneas nas variáveis integráveis dos C.E.'s. Este tipo de efeito existe em blocos do tipo proporcional-integral, "lead-lag", ou qualquer outro que decomposto apresente em paralelo a outros blocos um ganho puro (ver Figura 6.4, por exemplo). Nestes casos, toda vez que houver uma alteração na rede, o efeito instantâneo do bloco com ganho puro terá que ser aqui incluído. Sendo assim, há possibilidade de que esta rotina tenha que ser modificada pela inclusão de um novo modelo de C.E., dependendo, é claro, das funções existentes no mesmo.

Deve-se chamar atenção a esta rotina, pois nela foi introduzido um método de facilitar a convergência de sistemas mal condicionados, conforme será discutido no Capítulo 7.

e) Subrotina CESSTR

Chamada pela subrotina SOL ao início de cada novo intervalo de integração, ela inicializa as variáveis auxiliares ao método utilizado na subrotina CESSOL para melhorar a convergência em sistemas mal condicionados.

Não há necessidade de alterá-la com a inclusão de novos modelos.

f) Subrotina CESCON

Chamada pela subrotina CONST, caso existam C.E.'s no sistema, ela atualiza as variáveis do primeiro e segundo tipo dos modelos algébricos, conforme definidas em 6.2.4.

A inclusão de novos modelos implicará na modificação desta rotina, a fim de que dela constem as variáveis obtidas conforme desenvolvimento algébrico de 6.2, e que dependam somente de constantes ou de informações do sistema obtidas do instante anterior.

g) Subrotina CESEXT

Chama pela subrotina EXTRA no caso de existirem C.E.'s, faz a extrapolação das tensões das barras controladas pelo estático, pelo método linear. Utiliza informação dos dois instantes imediatamente anteriores, caso não tenha havido alterações na configuração da rede. Do contrário não haverá extrapolação, assumindo como estimativa um valor idêntico ao do passo de integração anterior.

Não há necessidade de alterar esta subrotina para a introdução de novos modelos.

h) Subrotina CESTRA

Chamada pela subrotina TRAP, no caso de existirem C.E.'s, faz o cálculo das variáveis integráveis dos C.E.'s pelo método trapezoidal, a cada iteração de um intervalo de tempo. Em essência, o resultado final

desta rotina é o cálculo da nova susceptância líquida dos C.E.'s.

Deverá ser alterada pela inclusão de novos modelos, a fim de considerar as equações que calculam as variáveis integráveis destes, conforme procedimento adotado em 6.2.

i) Subrotina CESOP

Chamada pela subrotina GENOP, no caso de existirem C.E.'s, serve para armazenar a tensão da barra controlada e a susceptância líquida dos estáticos a cada intervalo de impressão.

Não precisa ser alterada pela inclusão de novos modelos.

j) Subrotina CESOUT

Chamada pela subrotina SAIDA, no caso de ser requerido o tabelamento dos resultados de algum C.E., ela procede com a impressão desta tabela, a partir dos dados armazenados na subrotina GENOP . Ela também prepara as informações necessárias para impressão de gráficos dos resultados tabelados, e chama a rotina PLOTER, que executa esta impressão.

Não há necessidade de alterar esta rotina pela inclusão de novos modelos de C.E.'s.

6.4 - Conclusões

Das descrições apresentadas neste capítulo ficou evidente que todo o trabalho de adaptação dos modelos de compensadores estáticos no programa de estabilidade utilizado procurou seguir a metodologia já empregada no mesmo. Assim, os estáticos foram representados como fontes de corrente, servindo-se para tanto do valor de susceptância fornecida pelo modelo. E esta modelagem é muito boa quando se utiliza o método trapezoidal implícito para resolução das equações diferenciais, pois não permite que a corrente seja calculada por uma tensão defasada de um passo de integração da susceptância.

Quanto ao desenvolvimento do método trapezoidal implícito, viu-se que o objetivo a ser perseguido é trabalhar su

as equações de forma a simplificar ao máximo aquelas que serão calculadas em todas as iterações. Com isto, consegue-se diminuir o impacto da execução de um processo iterativo a cada passo de integração, em termos de tempo de computador.

Por fim, constatou-se que a forma particionada com que o programa original foi concebido permite, ao ser aplicada na introdução dos modelos de C.E.'s, acrescentar novos modelos de estáticos com alteração de não mais que cinco subrotinas em todo o programa. E mesmo assim, estas alterações, quando não são de leitura e impressão dos dados de entrada, visam simplesmente incluir as equações algébricas do modelo, que deverão ser desenvolvidas conforme explicações e exemplos aqui apresentados (item 6.2.).

CAPÍTULO 7

SIMULAÇÕES DE COMPENSADORES ESTÁTICOS NO PROGRAMA DE ESTABILIDADE

Este capítulo, que procura verificar o funcionamento dos modelos de compensadores estáticos propostos e implementados no programa de estabilidade utilizado, pode ser dividido em duas partes: na primeira, o objetivo principal é testar os modelos implantados através de um sistema elétrico bastante simples, a fim de detectar eventuais deficiências existentes; já na segunda parte, apresenta-se a simulação de um sistema mais complexo contendo dois compensadores estáticos, com o propósito de verificar o funcionamento global do programa com a inclusão dos C.E.'s.

Além destes, um outro importante teste foi executado — comparou-se os resultados da simulação de um sistema-teste feita no programa original, com os resultados obtidos com o mesmo sistema após a inclusão dos C.E.'s. Ambos os resultados foram idêntidos, não havendo mesmo diferença significativa nos tempos de simulação. Isto significa que as modificações efetuadas não afetaram o funcionamento do programa em relação à versão original, e as instruções que são executadas para verificar a necessidade de chamar ou não as rotinas dos estáticos, conforme descrito em 6.3.1, não chegam a afetar o tempo de simulação que um sistema sem compensadores estáticos apresentaria originalmente. Os resultados destes testes em específico não serão apresentados, por fugirem do escopo do trabalho. Fica apenas a lembrança de que se investigou a influência da introdução dos C.E.'s no desempenho de simulações sem tais equipamentos.

7.1 - Testes dos Modelos de Compensadores Estáticos Implantados

A avaliação inicial do funcionamento de uma rotina nova em um programa exige, antes de mais nada, uma forma de comprovação dos resultados. Isto pode ser conseguido através da comparação com resultados de outras fontes, de validade reconhecida, ou através de simulações bem simples que possam ser confirmadas até mesmo por cálculos manuais. Esta segunda forma tem a vantagem de ter resposta rápida em termos computacionais, o que facilita a execução de uma série de casos consecutivos, permitindo que a depuração de prováveis erros seja feita num mais curto intervalo de tempo. Por essas ra

zões, o sistema adotado nos testes iniciais dos modelos de C.E.'s segue a segunda linha de conduta abordada. Seu diagrama unifilar é o apresentado na Figura 7.1. Todos os dados desta etapa utilizaram o procedimento e dados que serão apresentados a seguir, exceto quando claramente indicado na descrição do caso.

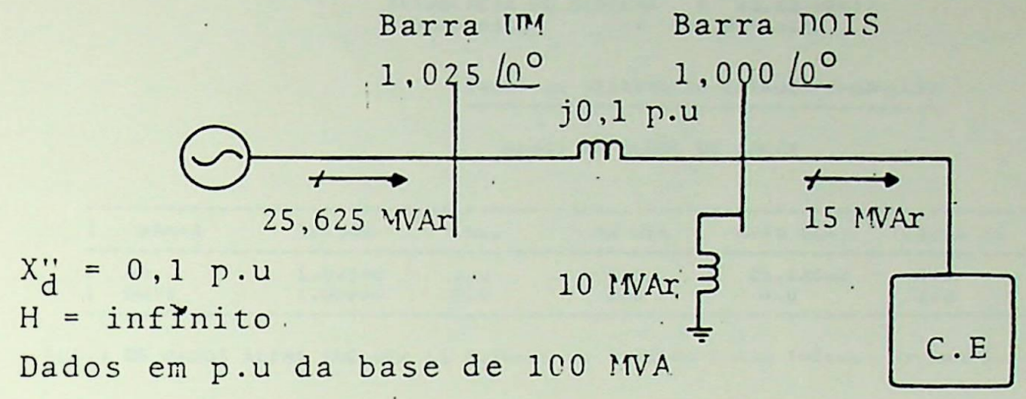


Figura 7.1 - Sistema elétrico adotado nas simulações de teste dos modelos de Compensadores Estáticos

O modelo de máquina síncrona utilizado foi o mais simples de todos, isto é, tensão constante atrás da reatância subtransitória (Modelo I). Na Figura 7.2 apresenta-se a listagem dos dados de entrada utilizados, excetuando-se os dos compensadores estáticos, que serão apresentados nas descrições de cada caso.

O procedimento básico das simulações consiste das seguintes etapas:

- Retirar e colocar a linha entre as barras um e dois no instante inicial, a fim de que o sistema funcionasse por algum tempo em regime permanente. Isto permite verificar se o modelo não está se auto-excitando;

- Após 50 milisegundos, retirar a linha entre as barras um e dois, substituindo-a por uma de valor maior. Usou-se como novo valor uma reatância indutiva de 5,56667 p.u., ou seja, mais de 50 vezes maior que a inicial. Tal valor objetivou modificar ao máximo a matriz do sistema, impondo difíceis condições de convergência ao método iterativo, bem como ao desempenho do modelo do C.E. com as constantes adotadas.

- Após 100 milisegundos, ou seja, no instante t = 0,15 seg, a nova linha é retirada, sendo então recolocada a linha inicial do sistema. E nestas condições simular o sistema

SISTEMA TELEFÔNICO DE POTÊNCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SISTEMA

CASO TESTE NÚMERO 1.01 - SIMULAÇÃO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS
MODELO LINEAR GENÉRICO
FUNCIONAMENTO NORMAL
FREQUÊNCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

BARRA	TENSÃO	ÂNG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR
UM	1.02500	0.0	0.0	25.62500	0.0	0.0
DOIS	1.00000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

OBS.: OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUÇÃO E NÃO INCLUEM OS COMPENSADORES ESTÁTICOS.

DADOS DAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESISTÊNCIA P.U.	REATÂNCIA P.U.	SUSCEPTÂNCIA P.U.	TAP P.U.
UM	DOIS	0.0	0.10000	0.0	0.0
DOIS	*	0.0	10.00000		

OBS.: IMPEDÂNCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

DADOS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

PARÂMETROS DAS MÁQUINAS

BARRA NUMÉ	MÁQUINA NO.	MODÊ	MVA BASE	CONST. INÉRC.	REATÂNCIAS (P.U.) TRANSITÓRIA EIXO-D	TRANSITÓRIA EIXO-Q	SUBTRANSITÓRIA EIXO-D	SUBTRANSITÓRIA EIXO-Q	RESIST. (P.U.)	C/C TCS (SEGS) TRANSITÓRIA EIXO-D	C/C TCS (SEGS) SUBTRANSITÓRIA EIXO-D	FATO... EIXO-Q
UM	1	1	100.00	INFIN.	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0	0.0	INFIN. INFIN. 0.0 0.0 0.0

BARRA	MÁQUINA NO.	POTÊNCIA DE SAÍDA DA MÁQUINA MW	MVAR	FATOR AMORTECIMENTO
UM	1	0.0	25.62500	0.0

FIGURA 7.2 - Dados de entrada do sistema da Figura 7.1

por mais 100 milisegundos. Assim, no total as simulações duraram 0,25 segundos.

O passo de integração utilizado é de 0,001 seg , e o intervalo de impressão dos gráficos de 0,005 seg.

Quanto aos dados dos compensadores estáticos, foram utilizados inicialmente dados típicos, extraídos da Referência 10. Além disto, eles sofreram algumas alterações, conforme será devidamente mostrado, a fim de comprovar a validade das metodologias de cálculo estimativo dos parâmetros desenvolvidas nos Capítulos 4 e 5 . Quanto aos limites de absorção e geração de potência reativa, utilizou-se uma faixa de -100 a +100 MVAr nas simulações de operação normal, e uma faixa de -100 a zero MVAr nos testes de funcionamento dos limitadores dos modelos. Para os casos com reator de núcleo saturado, que não pode gerar reativo, adotou-se uma faixa de -200 a zero MVAr, colocando um capacitor "shunt" de 90 MVAr na barra dois, conforme a Figura 7.3.

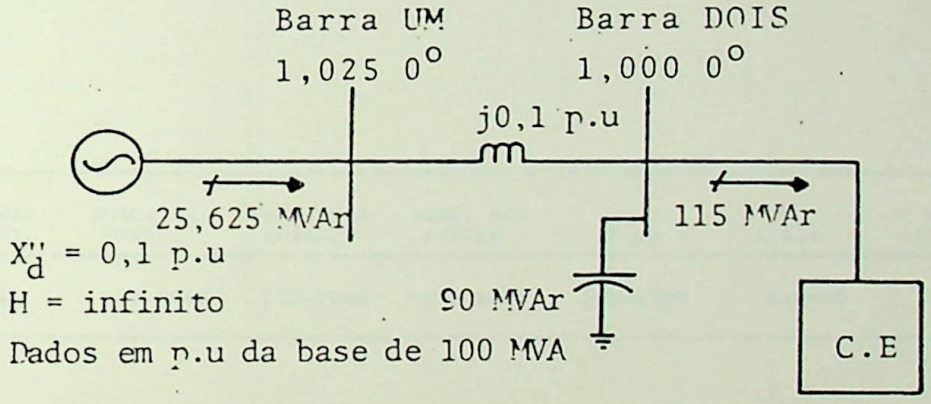


Figura 7.3 - Sistema elétrico adotado nas simulações de teste do modelo de reator de núcleo saturado

Um problema a que se ficou atento durante todos os testes foi o da convergência. Sendo assim, um dado que constará de todos os resultados apresentados é o número total de iterações executadas.

Alerta-se ainda que nos testes do reator de núcleo saturado foram encontrados sérios problemas de convergência devido ao mal condicionamento da matriz de impedância do sistema com a inclusão do capacitor "shunt" do porte adotado. A forma de contornar este problema exigiu o desenvolvimento, dentro do programa, de uma técnica de suavização das oscilações aritméticas do processo de convergên

cia. Pela complexidade do assunto, ele mereceu ser tratado separadamente no item 7.1.2, onde serão apresentados os casos obtidos nos testes executados com este algorítmo.

7.1.1 - Testes Realizados

Utilizando-se do sistema básico da Figura 7.1, diversos casos foram processados a fim de verificar o correto funcionamento das rotinas de compensadores estáticos incluídas no programa. A seguir, serão discutidos os mais ilustrativos casos obtidos, exetuando-se aqueles diretamente envolvidos com o desenvolvimento do método de suavização anteriormente referido, que serão discutidos em 7.1.2 . Deve-se ressaltar, no entanto, que todos os casos deste item já utilizaram o algorítmo de suavização em seus processamentos.

Caso 1

Características: Teste do modelo linear genérico, utilizando os dados fornecidos pela Figura 7.4, que reproduz a tabela de dados impressa pelo programa.

BARRA DO CE.	NUM CE.	BARRA CONT.	SUSC. IN. (MVAR)	SUSC. MAX (MVAR)	SUSC. MIN (MVAR)	K (P.U)	T (SEG)	K1 (P.U)	T1 (SEG)	T2 (SEG)
DGIS	1	DGIS	-15.0000	100.0000	-100.0000	100.0000	0.0400	1.0000	0.1000	1.0000

Figura 7.4 - Dados do modelo linear genérico

Resultados: O estudo apresentou um total de 318 iterações e os resultados correspondentes à tensão da barra controlada e à susceptância líquida do C.E. são apresentados, respectivamente, nas Figuras 7.5 e 7.6.

Comentários: As curvas de tensão e susceptância mostram que a resposta do C.E. foi mais rápida após o primeiro chaveamento do que após o segundo. Este resultado já era esperado , pois o estudo desenvolvido em 4.3 deixa claro que a velocidade de resposta de um C.E., tendo parâmetros já fixados, é inversamente proporcional ao nível de curto-circuito de sua barra controlada.



Figura 7.5 - Curva de tensão do CASO 01

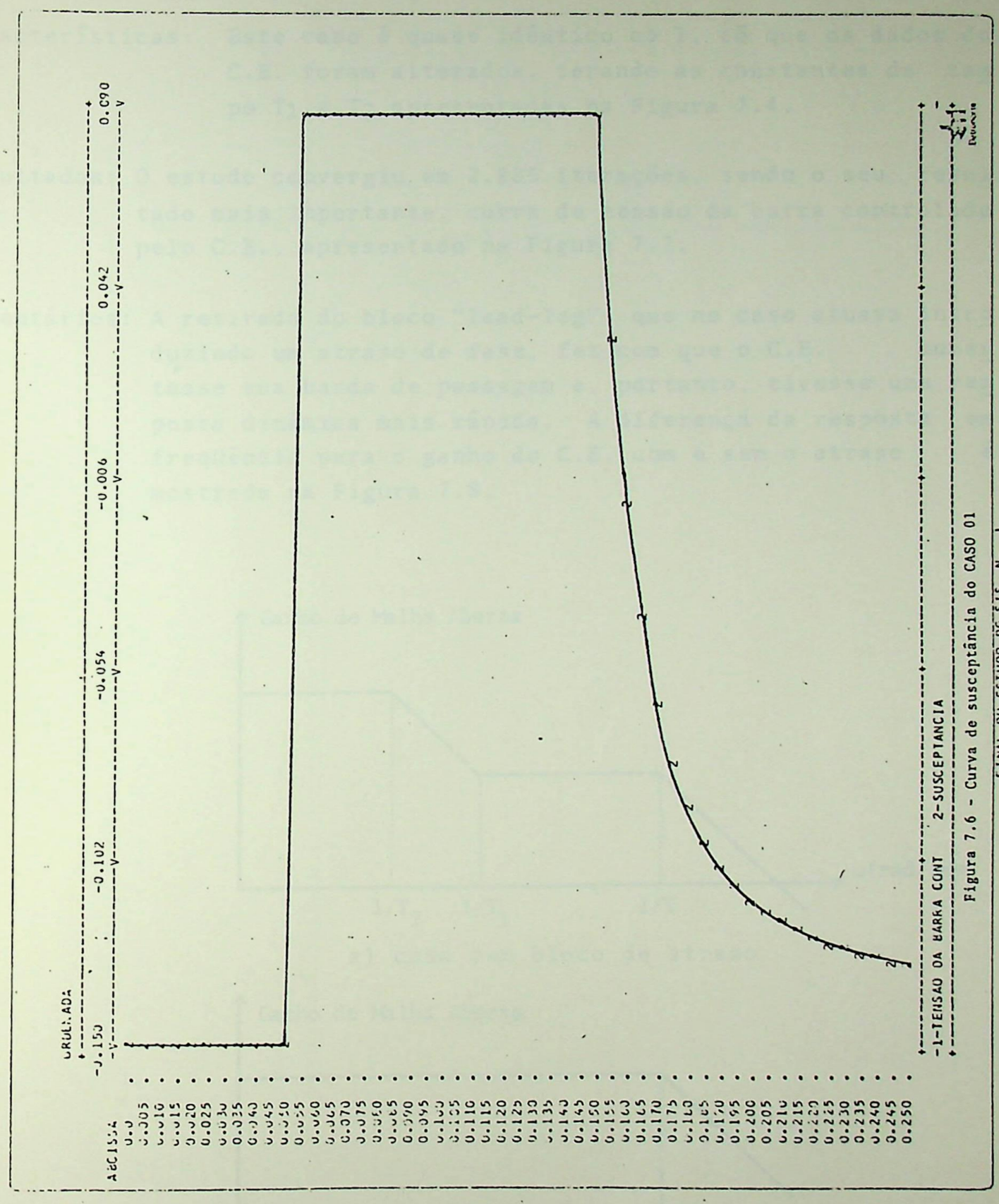


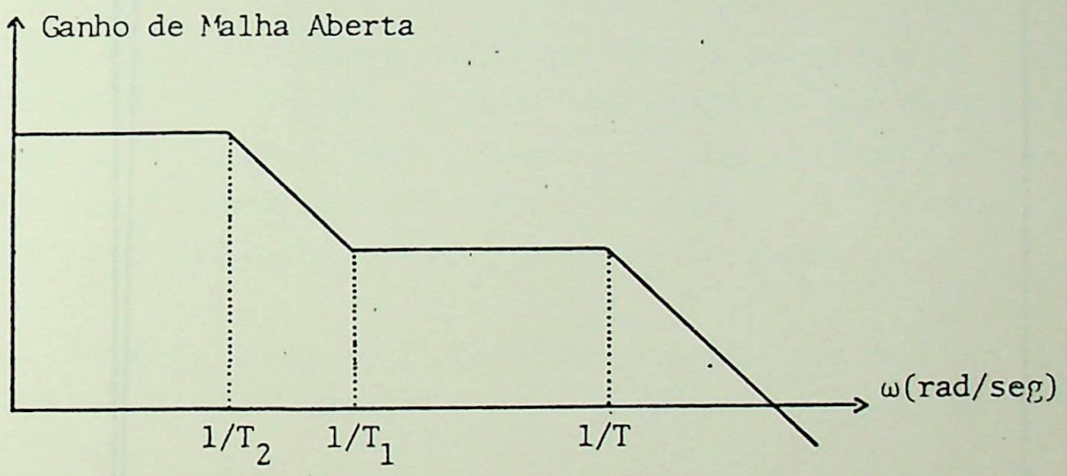
Figura 7.6 - Curva de susceptância do CASO 01

Caso 2

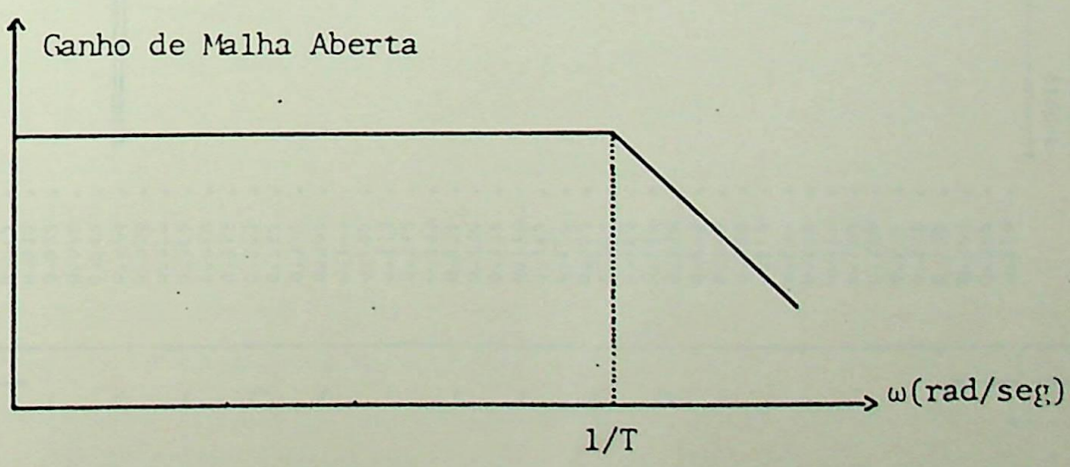
Características: Este caso é quase idêntico ao 1, só que os dados do C.E. foram alterados, zerando as constantes de tempo T_1 e T_2 apresentadas na Figura 7.4.

Resultados: O estudo convergiu em 2.885 iterações, sendo o seu resultado mais importante, curva de tensão da barra controlada pelo C.E., apresentado na Figura 7.7.

Comentários: A retirada do bloco "lead-lag", que no caso atuava introduzindo um atraso de fase, fez com que o C.E. aumentasse sua banda de passagem e, portanto, tivesse uma resposta dinâmica mais rápida. A diferença da resposta em freqüência para o ganho do C.E. com e sem o atraso é mostrada na Figura 7.8.



a) caso com bloco de atraso



b) caso sem bloco de atraso

Figura 7.8 - Resposta em freqüência dos C.E's dos CASOS 01 e 02

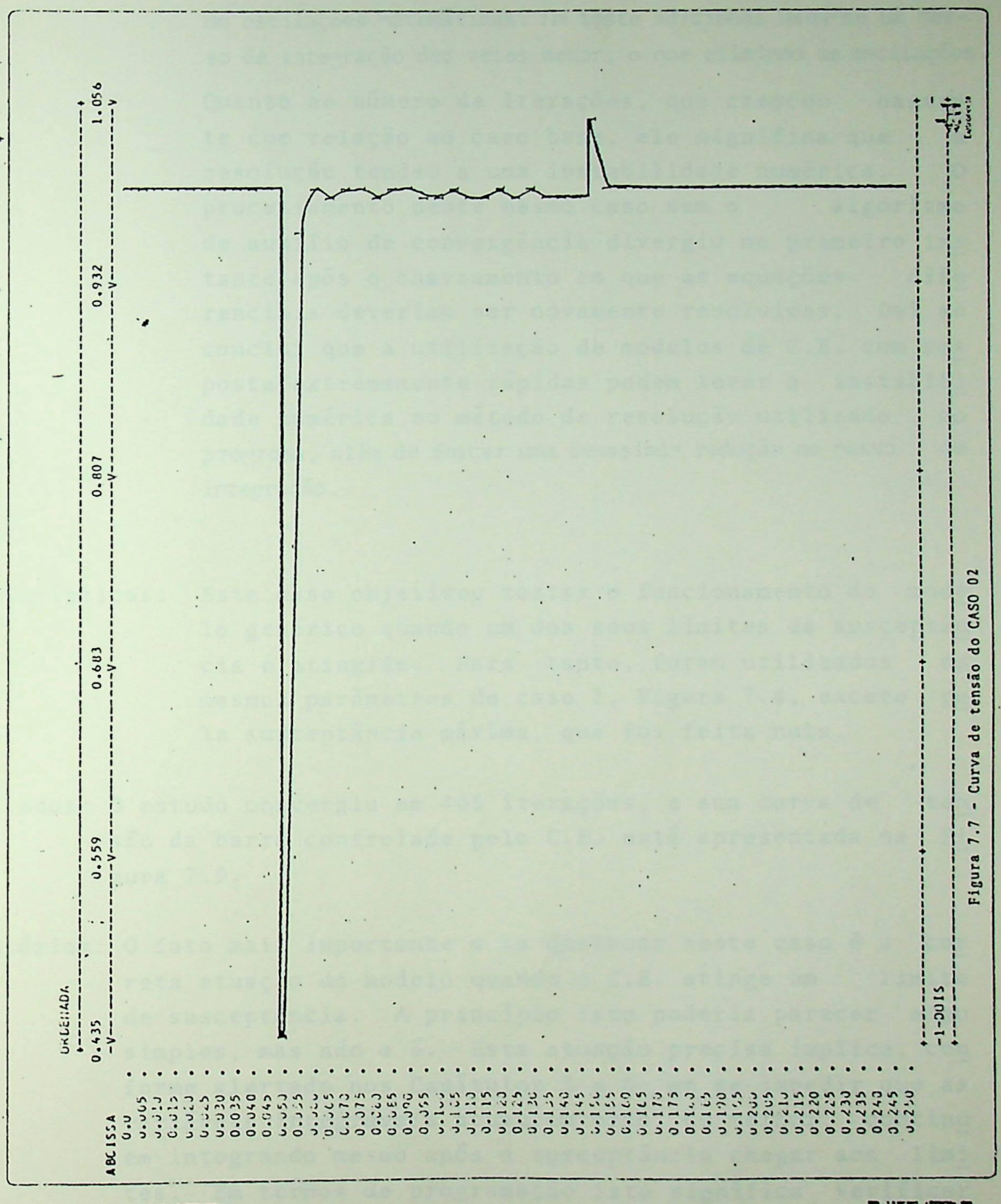


Figura 7.7 - Curva de tensão do CASO 02

É exatamente através da breve análise apresentada que fica justificada a maior rapidez detectada na Figura 7.7, havendo mesmo oscilações matemáticas. Em teste adicional usou-se um passo de integração dez vezes menor, o que eliminou as oscilações.

Quanto ao número de iterações, que cresceu bastante com relação ao caso base, ele significa que a resolução tendeu a uma instabilidade numérica. O processamento deste mesmo caso sem o algorítmo de auxílio de convergência divergiu no primeiro instante após o chaveamento em que as equações diferenciais deveriam ser novamente resolvidas. Daí se conclui que a utilização de modelos de C.E. com resposta extremamente rápidas podem levar a instabilidade numérica no método de resolução utilizado no programa, além de forçar uma demasiada redução no passo de integração.

Caso 3

Características: Este caso objetivou testar o funcionamento do modelo genérico quando um dos seus limites de susceptância é atingido. Para tanto, foram utilizados os mesmos parâmetros do caso 1, Figura 7.4, exceto pela susceptância máxima, que foi feita nula.

Resultados: O estudo convergiu em 465 iterações, e sua curva de tensão da barra controlada pelo C.E. está apresentada na Figura 7.9.

Comentários: O fato mais importante a se destacar neste caso é a correta atuação do modelo quando o C.E. atinge um limite de susceptância. A princípio isto poderia parecer algo simples, mas não o é. Esta atuação precisa implica, conforme alertado nos Capítulos 5 e 6, em se impedir que as variáveis integráveis acumulem erro, ou melhor, continuem integrando mesmo após a susceptância chegar aos limites. Em termos de programação isto significa verificar se a susceptância de saída do modelo está fora dos limites e, em caso afirmativo, fazer com que todas as variáveis integráveis fiquem com o valor que tinham na iteração imediatamente anterior àquela da violação dos limites. E mais, este valor é o que deverá ser usado nos

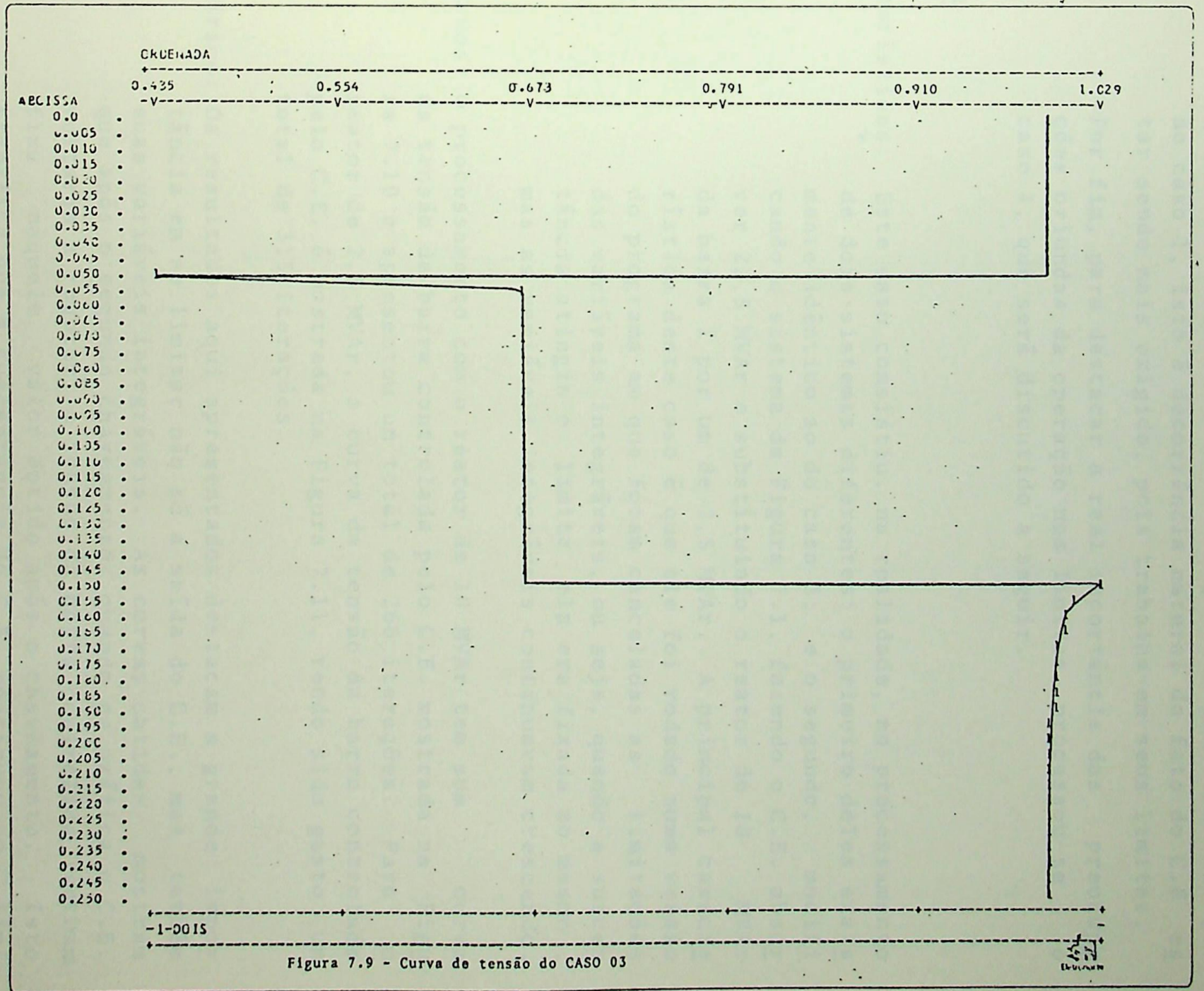


Figura 7.9 - Curva de tensão do CASO 03

cálculos das constantes que participarão das integrações no instante de tempo imediatamente após.

Quanto ao maior número de iterações obtidas com relação ao caso 1, isto é decorrência natural do fato do C.E estar sendo mais exigido, pois trabalha em seus limites.

Por fim, para destacar a real importância das preocupações oriundas da operação nos limites, processou-se o caso 4, que será discutido a seguir.

Caso 4

Características: Este caso consistiu, na realidade, no processamento de dois sistemas diferentes: o primeiro deles exatamente idêntico ao do caso 3; e o segundo, modificando o sistema da Figura 7.1, fazendo o C.E. absorver 22,5 MVAr e substituindo o reator de 10 MVAr da barra 2 por um de 2,5 MVAr. A principal característica deste caso é que ele foi rodado numa versão do programa em que foram canceladas as limitações das variáveis integráveis, ou seja, quando a susceptância atingia o limite ela era fixada no mesmo, mas as variáveis integráveis continuavam crescendo.

Resultados: O processamento com o reator de 10 MVAr tem sua curva da tensão da barra controlada pelo C.E. mostrada na Figura 7.10 e apresentou um total de 266 iterações. Para o reator de 2,5 MVAr, a curva da tensão da barra controlada pelo C.E. é mostrada na Figura 7.11, tendo sido gasto um total de 315 iterações.

Comentários: Os resultados aqui apresentados destacam a grande importância em se limitar não só a saída do C.E., mas também suas variáveis integráveis. As curvas obtidas mostram que após o segundo chaveamento, quando na prática o C.E. voltaria a regular, a tensão da barra controlada continua fixa naquele valor obtido após o chaveamento. Isto significa que a susceptância do C.E. continuou no limite, pois as variáveis integráveis, que continuaram acumulando erro após atingido o limite no primeiro chaveamento, não voltaram logo a um valor tal que permitisse à susceptância líquida voltar a operar nos limites normais. Na Figura 7.10, ondeoerro foi maior, os 100 mili

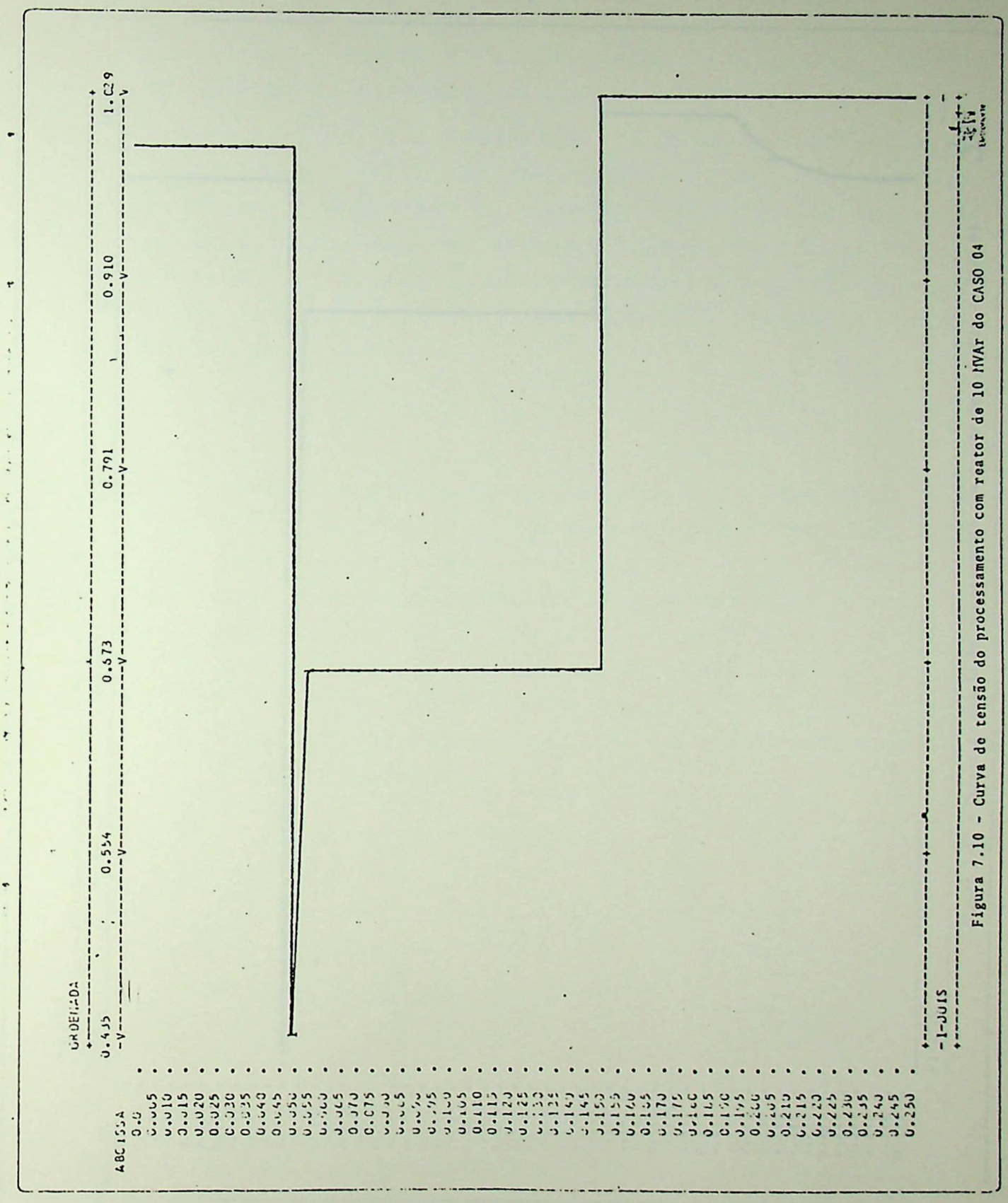


Figura 7.10 - Curva de tensão do processamento com reator de 10 MVAr do CASO 04

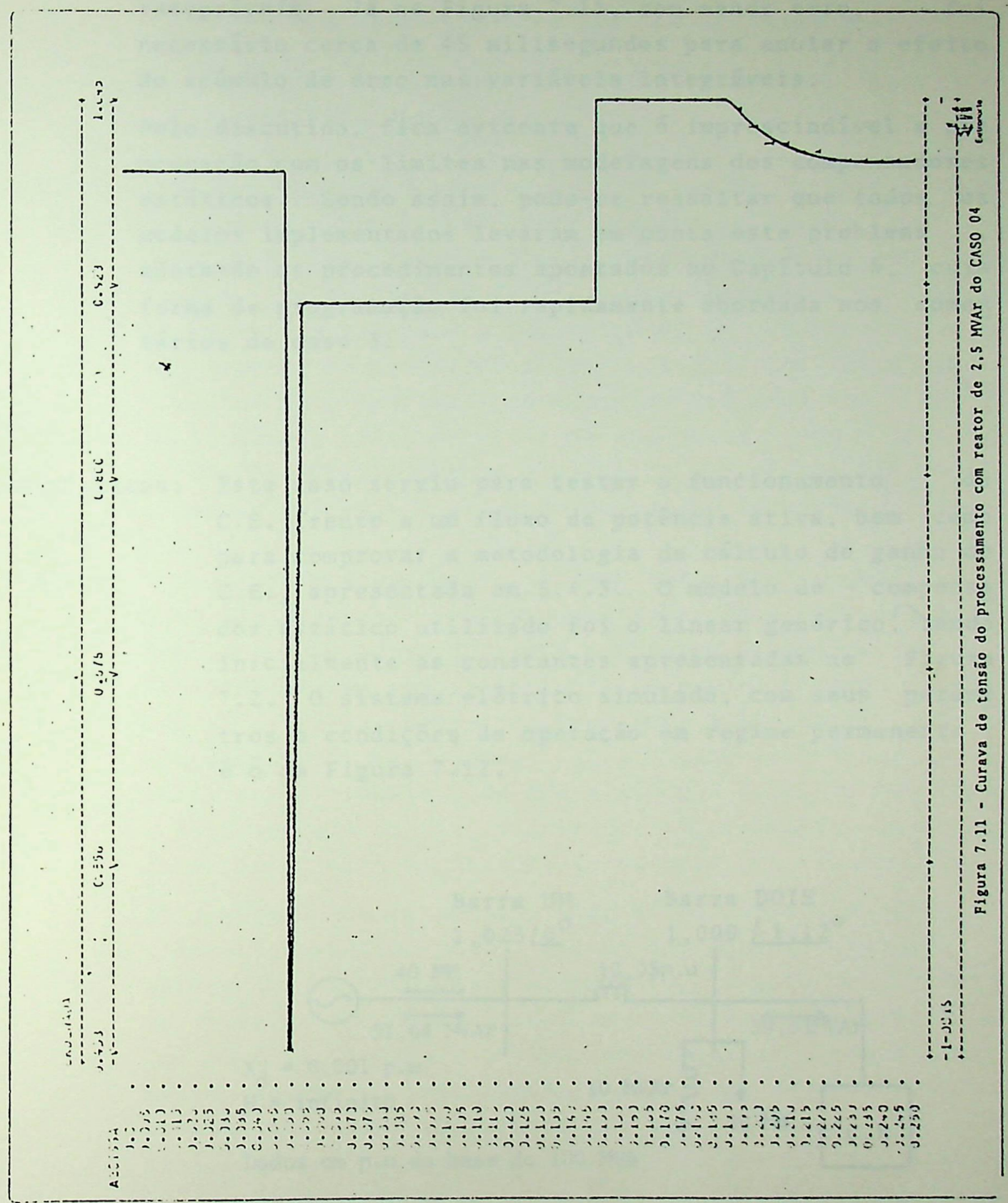


Figura 7.11 - Curava de tensão do processamento com reator de 2,5 MVAr do CASO 04

segundos após o segundo chaveamento não foram suficientes para anular o efeito do erro acumulado nas variáveis integráveis. Já na Figura 7.11, com menor erro, foi necessário cerca de 45 milisegundos para anular o efeito do acúmulo de erro nas variáveis integráveis.

Pelo discutido, fica evidente que é imprescindível a preocupação com os limites nas modelagens dos compensadores estáticos. Sendo assim, pode-se ressaltar que todos os modelos implementados levaram em conta este problema, adotando os procedimentos apontados no Capítulo 6, cuja forma de programação foi rapidamente abordada nos comentários do caso 3.

Caso 5

Características: Este caso serviu para testar o funcionamento do C.E. frente a um fluxo de potência ativa, bem como para comprovar a metodologia de cálculo do ganho do C.E., apresentada em 5.4.3. O modelo de compensador estático utilizado foi o linear genérico, tendo inicialmente as constantes apresentadas na Figura 7.2. O sistema elétrico simulado, com seus parâmetros e condições de operação em regime permanente, é o da Figura 7.12.

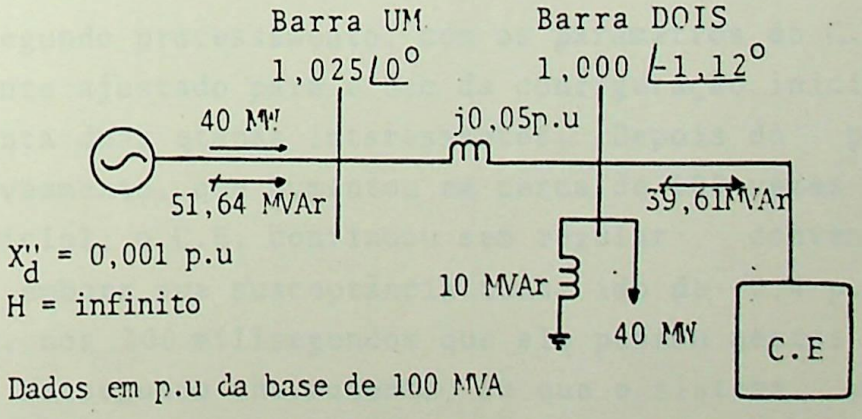


Figura 7.12 - Sistema elétrico do Caso 5

Os chaveamentos realizados consistiram em:

. Após rodar por 0,05 seg em regime permanente

substituir a linha entre um e dois por uma de reatância igual a 0,005 p.u. O sistema foi simulado nestas condições por 100 milisegundos;

. Voltar ao sistema original e simular por mais 100 milisegundos.

Resultados: A Figura 7.13 apresenta a curva da tensão da barra controlada pelo C.E., tendo este o ganho da Figura 7.2, ou seja, K = 100. Esta simulação teve um total de 253 iterações. Já as Figuras 7.14 e 7.15 apresentam a tensão da barra controlada e a susceptância do C.E. para o mesmo sistema, só que tendo o ganho do C.E. convenientemente calculado, conforme procedimento indicado no Capítulo 5, para o nível de curto de sua barra. Assim, fez-se K = 4000. Os limites de reativo do C.E. foram liberados, a fim de permitir a excursão que fosse necessária.

Comentários: O primeiro processamento, Figura 7.13, mostra que o C.E. não regulou a tensão convenientemente. Seus parâmetros, que eram adequados para o sistema da Figura 7.1 , de forma alguma se prestam para este novo sistema, que tem um nível de curto-circuito (Scc) muito maior. Esta é a forma prática de comprovar a afirmação, várias vezes feita neste trabalho, de que a atuação do C.E., bem como a determinação de seus parâmetros, é altamente dependente da impedância do sistema vista pelo C.E. de sua barra.

Já o segundo processamento, com os parâmetros do C.E. devidamente ajustado para o Scc da configuração inicial , apresenta duas etapas interessantes. Depois do primeiro chaveamento, que aumentou em cerca de 100 vezes o Scc inicial, o C.E. continuou sem regular convenientemente, embora sua susceptância tenha ido de -0,4 p.u. a -9 p.u. nos 100 milisegundos que ele passou nestas condições. No segundo chaveamento, em que o sistema voltou às condições para as quais o C.E. foi ajustado, sua atuação foi precisa e rápida como mostram as Figuras 7.14 e 7.15.

Caso 6

Características: Teste do modelo linear de reator controlado por tiristores, com ou sem capacitores chaveados por ti



Figura 7.13 - Curva de tensão do processamento com ganho K = 100 do CASO 05

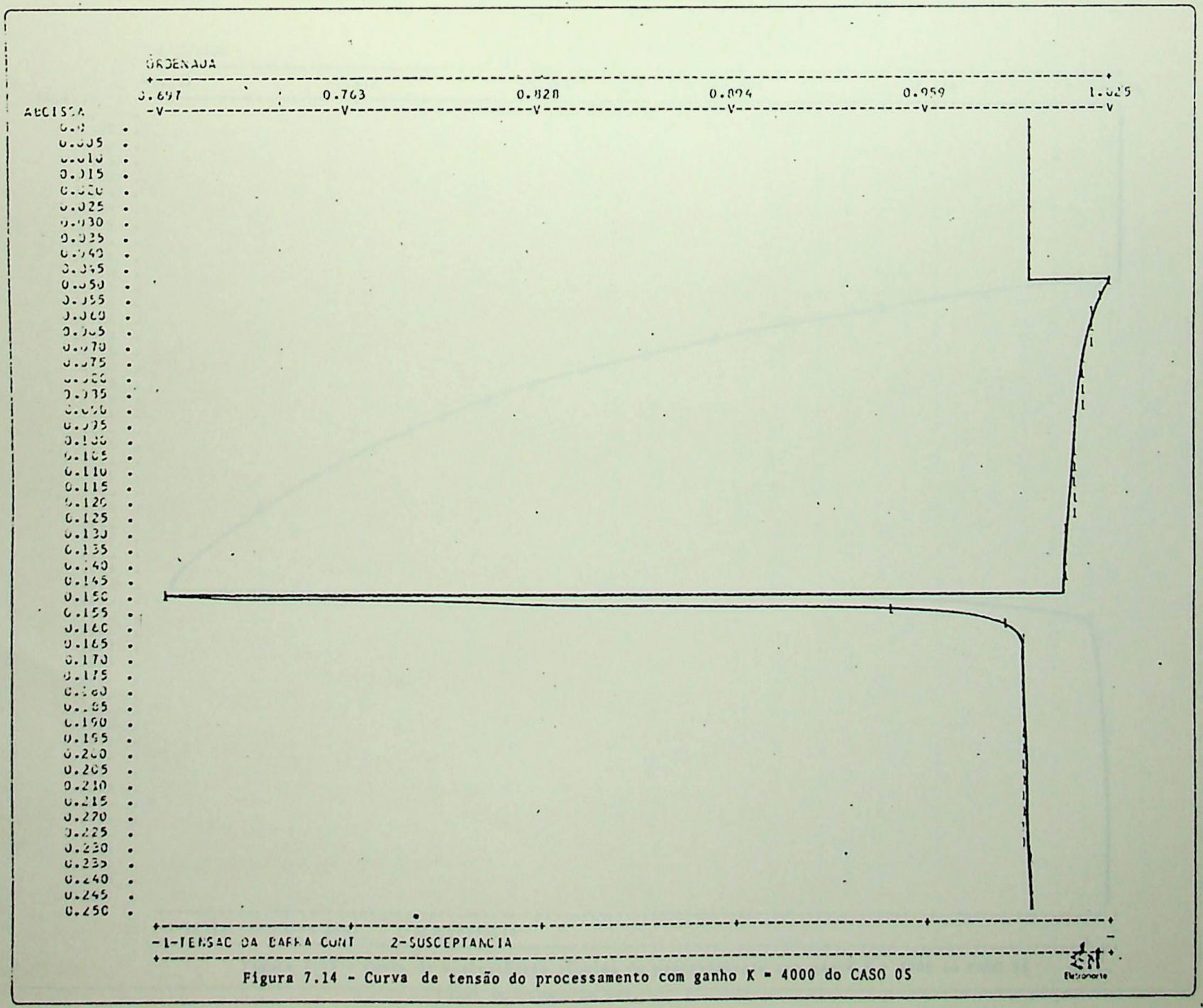


Figura 7.14 - Curva de tensão do processamento com ganho K = 4000 do CASO 05

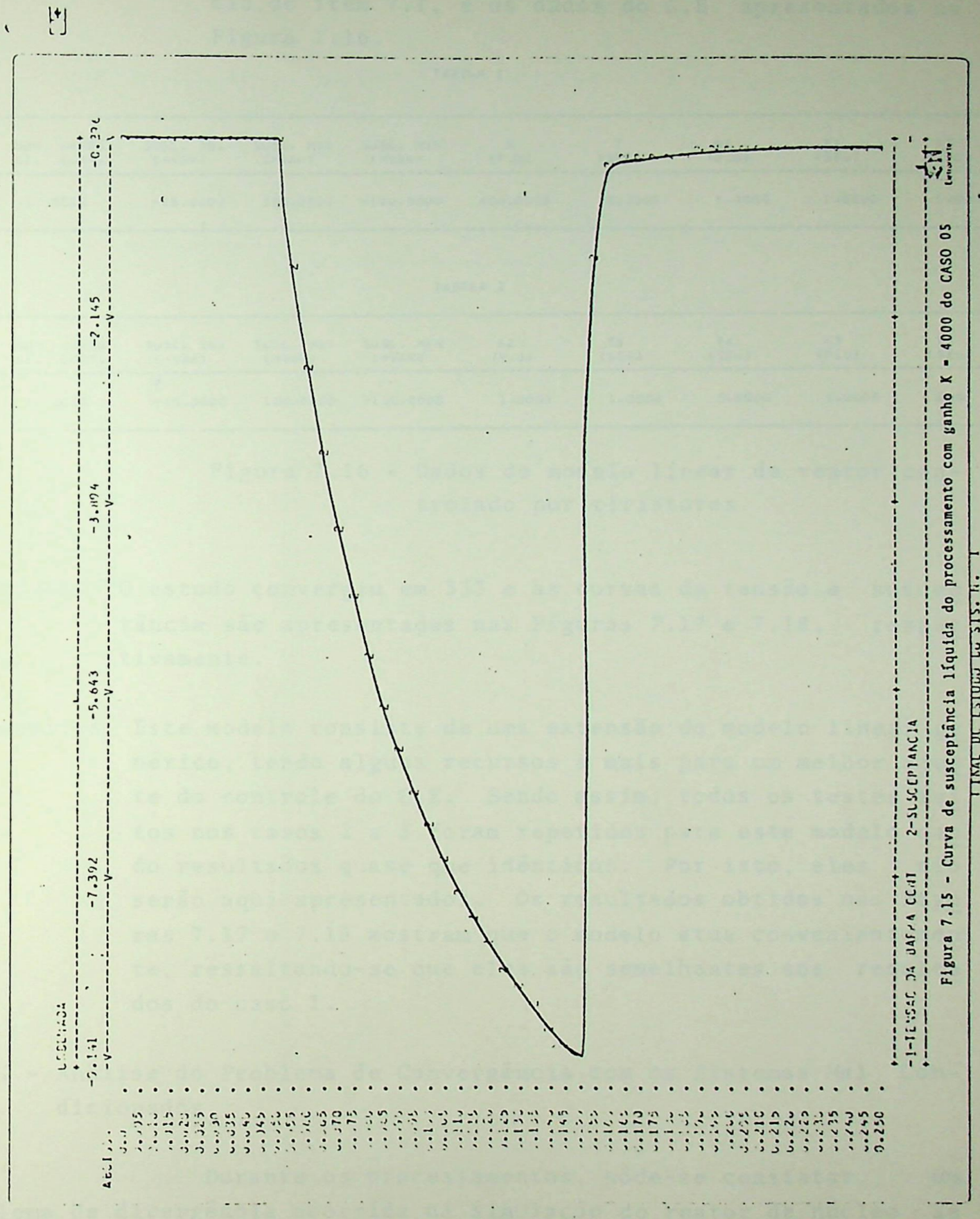


Figura 7.15 - Curva de susceptância líquida do processamento com ganho K = 4000 do CASO 05

ristores. Utilizou o procedimento descrito no início do item 7.1, e os dados do C.E. apresentados na Figura 7.16.

TABELA 1

BARRA DO CE.	NUM CE.	BARRA CONT.	SUSC. IN. (MVAR)	SUSC. MAX (MVAR)	SUSC. MIN (MVAR)	K (P.U)	T (SEG)	K1 (P.U)	T1 (SEG)	T2 (SEG)
DOIS	1	DOIS	-15.0000	100.0000	-100.0000	400.0000	0.0500	1.0000	1.0000	5.0000

TABELA 2

BARRA DO CE.	NUM CE.	BARRA CONT.	SUSC. IN. (MVAR)	SUSC. MAX (MVAR)	SUSC. MIN (MVAR)	K2 (P.U)	T3 (SEG)	T4 (SEG)	K3 (P.U)	T5 (SEG)
DOIS	1	DOIS	-15.0000	100.0000	-100.0000	1.0000	1.0000	5.0000	1.0000	0.0

Figura 7.16 - Dados do modelo linear de reator controlado por tiristores

Resultados: O estudo convergiu em 333 e as curvas da tensão e susceptância são apresentadas nas Figuras 7.17 e 7.18, respectivamente.

Comentários: Este modelo consiste de uma extensão do modelo linear genérico, tendo alguns recursos à mais para um melhor ajuste do controle do C.E. Sendo assim, todos os testes feitos nos casos 2 a 5 foram repetidos para este modelo dando resultados quase que idênticos. Por isto, eles não serão aqui apresentados. Os resultados obtidos nas Figuras 7.17 e 7.18 mostram que o modelo atua convenientemente, ressaltando-se que eles são semelhantes aos resultados do caso 1.

7.1.2 - Análise do Problema de Convergência com os Sistemas Mal Condicionados

Durante os processamentos, pôde-se constatar um problema de divergência ocorrida na simulação do reator de núcleo saturado com o sistema da Figura 7.3. Este fato aconteceu ainda durante o processamento em regime permanente. Como primeira hipótese admitiu-se a possibilidade de que havia um erro no modelo. Teoricamente o resultado a ser obtido nesta simulação deveria, a menos do tempo de resposta, ser bastante semelhante aos anteriores. Mas havia uma dife

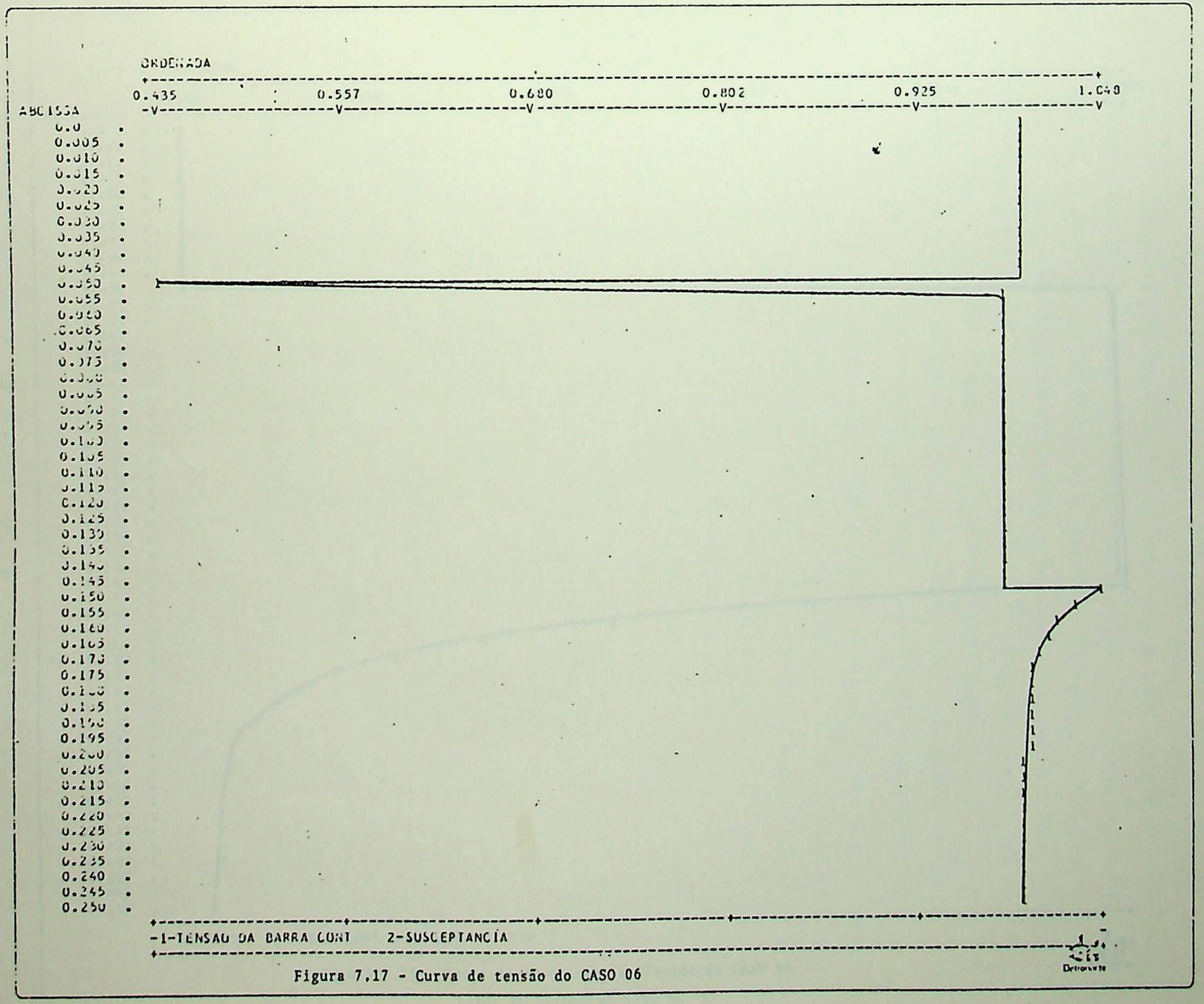


Figura 7.17 - Curva de tensão do CASO 06

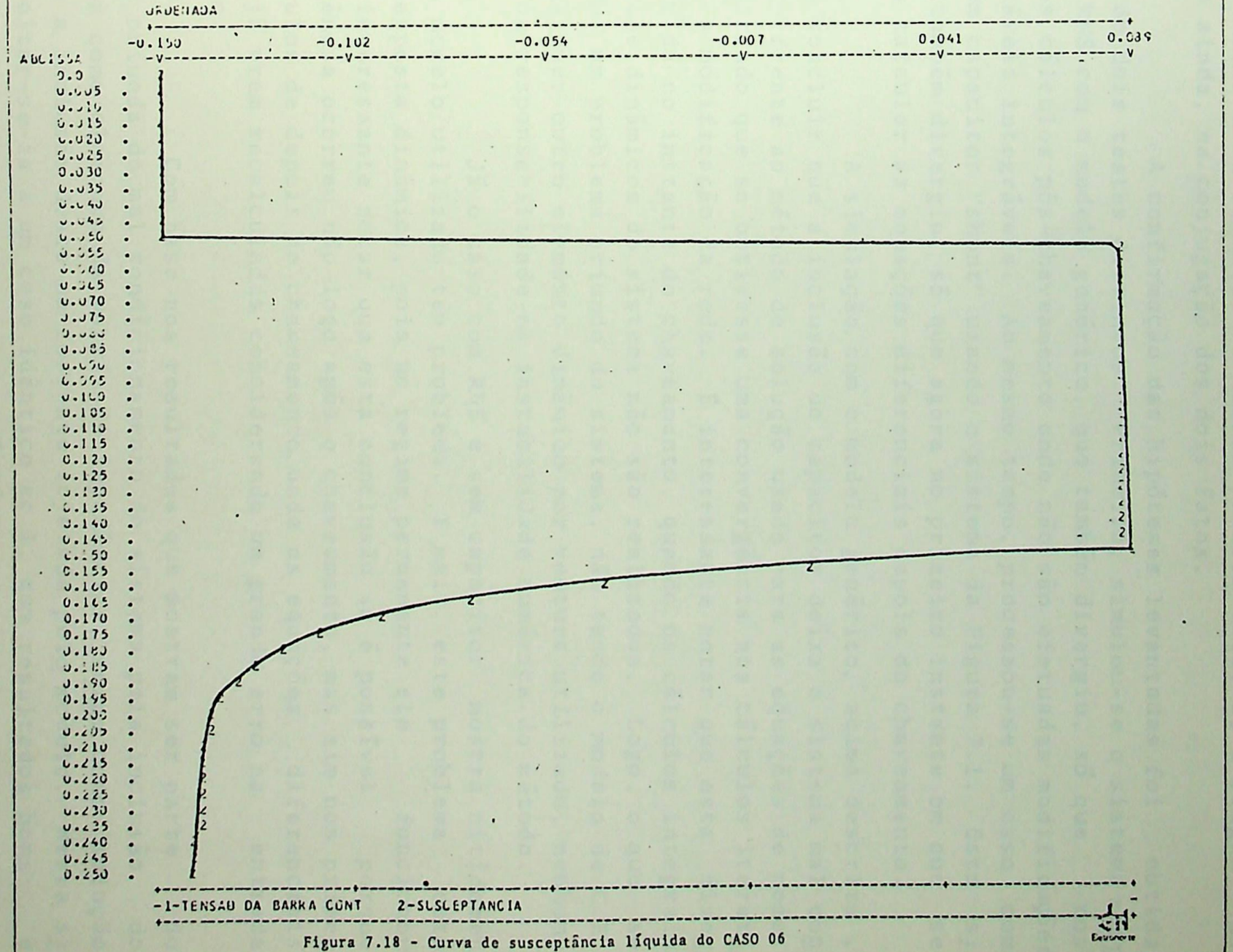


Figura 7.18 - Curva de susceptância líquida do CASO 06

FINAL DO ESTUDO DC SIS. N. 1

rença entre o sistema utilizado para o RNS e os anteriores. Como este C.E. não produzia reativo, houve necessidade de acrescentar um reator "shunt" à barra dois. E também poderia estar aí a origem do erro, ou ainda, na conjugação dos dois fatos.

A confirmação das hipóteses levantadas foi obtida através de dois testes distintos. Primeiro, simulou-se o sistema adaptado ao RNS com o modelo genérico, que também divergiu, só que nos primeiros cálculos pós-chaveamento onde não são efetuadas modificações nas variáveis integráveis. Ao mesmo tempo, processou-se um caso com RNS e sem capacitor "shunt" usando o sistema da Figura 7.1. Esta simulação também divergiu, só que agora no primeiro instante em que se precisou calcular as equações diferenciais depois do chaveamento.

A simulação, com o modelo genérico, acima descrita, permitiu concluir que a inclusão do capacitor deixa o sistema mal condicionado frente ao método de solução usado para as equações de rede, não permitindo que se obtivesse uma convergência nos cálculos iterativos após a modificação da rede. É interessante notar que esta divergência se dá no instante do chaveamento, quando os cálculos integrais dos modelos dinâmicos do sistema não são realizados. Logo, o que se obteve foi um problema oriundo do sistema, não tendo o modelo de C.E., ou de qualquer outro elemento dinâmico por ventura utilizado, nenhuma parcela de responsabilidade na instabilidade numérica do método.

Já o caso com RNS e sem capacitor mostra nitidamente que o modelo utilizado tem problema. E mais, este problema está na sua resposta dinâmica, pois no regime permanente ele funcionou bem. É interessante notar que esta conclusão só é possível porque a divergência ocorreu não logo após o chaveamento, mas sim nos primeiros cálculos de depois do chaveamento, onde as equações diferenciais do C.E. já eram recalculadas considerando um grande erro na entrada do modelo.

Com base nos resultados que mostram ser parte do problema oriunda do mal condicionamento do sistema pela inclusão do capacitor como elemento da matriz de impedâncias, surge como solução imediata a inclusão deste na corrente injetada pelo modelo. Nesta situação voltar-se-ia a um caso idêntico ao 1, com resultados bons e rápidos. No entanto, nem sempre será fácil identificar a causa do mal condicionamento da matriz de impedâncias de um determinado sistema. E mais, muitas vezes a instabilidade numérica poderá ser causada pela solução das equações dinâmicas de um elemento do sistema, como é o caso do modelo do RNS aqui enfocado. Sendo assim, procurou-se adotar uma solução mais abrangente para os problemas aqui detectados, e

para tanto fez-se necessário um estudo mais detalhado dos métodos utilizados no programa para resolver as equações do sistema elétrico simulado.

Como já foi visto no Capítulo 6, equação 6.106, o programa calcula as tensões da rede através da multiplicação da matriz de impedâncias do sistema pelo vetor de correntes injetadas. Este vetor, que é composto pelas correntes das máquinas síncronas, motores de indução e compensadores estáticos, por sua vez depende das tensões da rede para, através das equações dos equipamentos citados, chegar ao valor de cada uma de suas componentes. Assim, surge o seguinte processo iterativo:

- As correntes injetadas no sistema são calculadas a partir de valores estimados de tensão e outras grandezas próprias das equações algébrico-diferenciais dos elementos modelados como fonte de corrente;

- Com o vetor de correntes calculado, resolve-se a equação das tensões da rede (6.106), determinando-se novos valores;

- Com estas novas tensões recalculam-se as variáveis inicialmente estimadas, principalmente aquelas que são resultados de integrações, verificando a diferença entre os novos valores e os anteriores;

- Caso todas as diferenças sejam menores que um determinado valor, considera-se o cálculo encerrado. Do contrário, retorna-se ao início calculando novamente as correntes, tensões e erros repetindo-se este processo até que as diferenças de todas as variáveis monitoradas convirjam para dentro das tolerâncias especificadas.

Esta descrição suscinta mostra que o método usado na solução é bem simples, visando diminuir ao máximo a quantidade de cálculos que são exigidos nas iterações envolvendo o método trapezoidal. Desta forma, embora o método de integração aqui utilizado tenha, teoricamente, uma excelente característica de convergência (ver Referência 23), a resolução global do problema fica condicionada às características de convergência do algorítmo das equações de rede, que pode ser caracterizado como o método de Gauss. Logo, em termos finais, o método de solução usado no programa assume, primordialmente, as características de convergência do seu ponto mais fraco.

O problema de convergência encontrado no método de Gauss para resolução de sistemas de equações lineares, conforme abordado na Referência 27 , consiste na grande dependência que se verifica com relação ao condicionamento da matriz de coeficientes; no caso a matriz de impedâncias da rede. Quando estas são diagonalmente dominantes — a soma dos termos não diagonais de uma linha é menor que seu termo diagonal — o método de Gauss encontra condições ideais , convergindo de forma bem rápida. Em caso contrário não se pode afirmar que haverá divergência certa, mas quando a solução é possível a quantidade de iterações poderá ser bastante elevada.

Somado às dificuldades acima, existe um outro fator perturbador no programa, que é a representação dos elementos ativos e compensadores estáticos por fonte de corrente. Em casos de grandes modificações na rede, esta representação poderá ser prejudicial, pois o cálculo das tensões da primeira iteração após o distúrbio terá como base as correntes anteriores, fazendo com que os valores assim obtidos sejam tão distorcidos que o próximo cálculo de correntes injetadas já leve o processo a um ponto divergente. Exemplificando , suponha-se que o sistema opere em regime permanente com um C.E. do tipo RCT/capacitor fixo absorvendo uma certa quantidade de potência reativa. Em certo instante acontece um defeito suficiente para aumentar em cerca de três vezes a sua impedância de transferência com a fonte. É claro que a solução final deste caso implicará em correntes bem menores que aquelas iniciais, mas como o processo é iterativo e se inicia exatamente com as correntes de antes do distúrbio, várias hipóteses podem ocorrer. No caso de um sistema bem condicionado, as tensões calculadas serão pequenas, forçando a que no próximo cálculo de correntes, partindo de uma susceptância constante, como estará o C.E., a corrente baixe, e na próxima solução de rede as tensões subirão. Este processo ficará assim, oscilando, de forma amortecida e convergirá. Com matrizes mal condicionadas, pode acontecer que as oscilações referidas sejam crescentes ou mesmo, em casos extremos , não se verifiquem oscilações e a divergência seja imediata. Problema semelhante pode ocorrer quando o C.E. tem resposta muito rápida, fazendo com que sua susceptância mude de forma brusca entre uma iteração e outra, o que também poderá levar a divergências.

As situações de divergência imediata, sem qualquer oscilação, advêm da utilização de um sistema elétrico extremamente mal condicionado, com a existência de altíssimas impedâncias entre fontes e cargas. Já as divergências por oscilações crescentes implicam num sistema fraco, em termos de nível de curto-circuito, e com

um alto grau de compensação reativa capacitiva. Como é muito mais provável a existência deste segundo tipo de sistema do que do primeiro, procurou-se desenvolver um algorítmo que amortecesse as oscilações crescentes, orientando os resultados intermediários para uma convergência assintótica.

O método utilizado, cuja idéia básica foi extraída do Capítulo 6 da Referência 28 , consiste simplesmente em verificar a existência de oscilações e impedir que de uma iteração para outra a variação da corrente do C.E. exceda determinado valor. No caso deste valor máximo de variação ainda permitir que haja oscilações de tendência, restringe-se mais ainda sua magnitude. Com isto, obtém-se um processo iterativo mais lento, em casos críticos, mas garante-se que será detectada qual a tendência de solução, procurando apenas suavizar as oscilações que possam ocorrer de forma a que os valores de cada iteração passem a convergir para a solução final de forma assintótica, e não oscilatória.

É interessante observar que um processo oscilatório, mesmo que amortecido, significa que as variações obtidas são maiores que as necessárias. Sendo assim, o controle das variações, dentro de um limite máximo, associado à diminuição deste limite ao se verificar que um número máximo de oscilações foi excedido, não deverá prejudicar nem aumentar de forma significativa o total de iterações de um caso com matriz de coeficientes bem condicionada e sem elementos controláveis que possam levar à instabilidade numérica. Isto é comprovado através da verificação de que o número de iterações do processamento do caso 1, com o modelo linear genérico, já com o algorítmo aqui descrito, foi 318, e sem o algorítmo também ficou nas 318 iterações.

Em relação aos valores de controle utilizados, adotou-se, a princípio, que as variações de corrente não poderiam ser maiores do que 0,05 p.u. de uma iteração para outra, e que a cada duas oscilações completas detectadas no processo iterativo de um determinado instante de tempo, esse valor máximo seria diminuído em dez vezes. A adoção de tais números veio após a verificação de uma série de combinações que viessem a atender os objetivos perseguidos. Não houve , entretanto, nenhuma preocupação quanto à otimização dos valores adotados num contexto de diminuição de tempo de simulação e número de iterações.

Vale ainda ressaltar que o problema aqui discutido não é conseqüência exclusiva dos modelos dos C.E.'s e dos parâmetros para ele adotados, mas também da interação da forma como ele é

simulado — fonte de corrente, com o método usado na solução das equações de rede. Portanto, o algorítmo aqui analisado não é específico para os compensadores estáticos, devendo, na realidade, ser aplicado ainda às máquinas síncronas e aos motores de indução, pois nestes também se encontrarão os problemas de convergência aqui discutidos. Dessa forma, fica como sugestão deste trabalho a expansão do algorítmo de auxílio de convergência a qualquer equipamento que seja representado por fonte de corrente variável neste programa.

A seguir, serão apresentados alguns casos dos mais significativos com relação aos testes do algorítmo de suavização . Vale destacar que mesmo com este algorítmo o procedimento padrão de chaveamento aqui adotado, ou seja, trocar a linha da Figura 7.3 por outra mais de 50 vezes maior, não permitiu a convergência. Isto mostra, já de início, que a suavização não solucionará casos extremamente críticos. Sendo assim, os testes a seguir foram realizados adotando a configuração da Figura 7.3 e fazendo a troca da linha de reatância igual a 0,1 p.u. por outra de reatância de 0,5557 p.u., na mesma ordem e tempo do procedimento indicado no início do item 7.1.

Caso 7

Características: Utilizou o modelo linear genérico com os parâmetros da Figura 7.4, exceto pela susceptância inicial que foi de -115 MVAr, e pelos limites máximo e mínimo, que foram de 0 e -200 MVAr respectivamente.

Resultados: O processamento sem o algorítmo de suavização divergiu no instante do chaveamento, tão logo a nova linha foi incluída no sistema. O caso com suavização apresentou 2119 iterações e tem sua curva de tensão da barra controlada pelo C.E. apresentada na Figura 7.19.

Comentários: Este caso, realizado com um modelo de C.E. que já havia se mostrado não prejudicial ao processo de solução, mostra claramente a grande influência que um sistema mal condicionado tem sobre o método utilizado. O elevado número de iterações indica a ação do algorítmo de suavização, pois, teoricamente, este caso teria que apresentar um número de iterações até mesmo menor que o do caso 1.

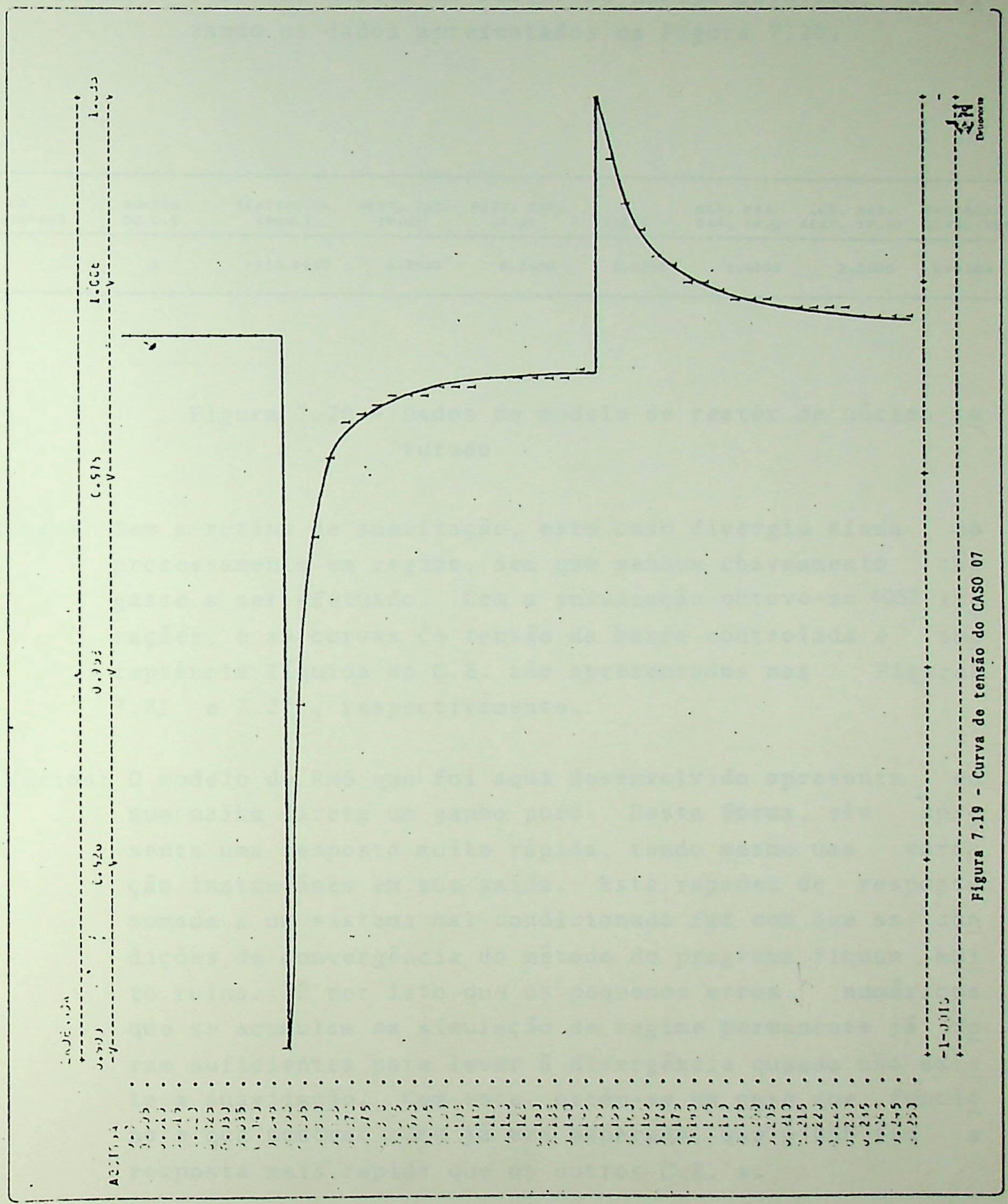


Figura 7.19 - Curva de tensão do CASO 07

Caso 8

Características: Teste do modelo de reator de núcleo saturado, utilizando os dados apresentados na Figura 7.20.

BARRA DO REATOR SATURADO	NUMERO DO C.E	REATIVO IN. (MVAR)	REAT. SAT. (P.U)	REAT. CAP. (P.U)	T (SEG)	CCR. MAX. CAP. (P.U)	CCR. MAX. REAT. (P.U)	PROTECAO CAPACITOR
DOIS	1	-115.0000	0.2500	0.2450	0.0250	1.4700	2.0000	RAPIDA

Figura 7.20 - Dados do modelo de reator de núcleo saturado

Resultados: Sem a rotina de suavização, este caso divergiu ainda no processamento em regime, sem que nenhum chaveamento chegasse a ser efetuado. Com a suavização obteve-se 4037 iterações, e as curvas de tensão da barra controlada e susceptância líquida do C.E. são apresentadas nas Figuras 7.21 e 7.22 , respectivamente.

Comentários: O modelo de RNS que foi aqui desenvolvido apresenta em sua malha direta um ganho puro. Desta forma, ele apresenta uma resposta muito rápida, tendo mesmo uma variação instantânea em sua saída. Esta rapidez de resposta somada a um sistema mal condicionado faz com que as condições de convergência do método do programa fiquem muito ruins. É por isto que os pequenos erros numéricos que se acumulam na simulação de regime permanente já foram suficientes para levar à divergência quando não existe a suavização. Com esta, obtém-se um caso que funcione e que mostra, como já era esperado, que o RNS tem a resposta mais rápida que os outros C.E.'s.

Este caso, bem como o anterior, confirma a eficiência da suavização. Contudo, não se pode esquecer que este algorítmo não garante a convergência, servindo apenas para ampliar a faixa de situações que podem ser estudadas convenientemente pelo programa. Por fim, como o método de suavização aumenta o número de iterações, sugere-se que

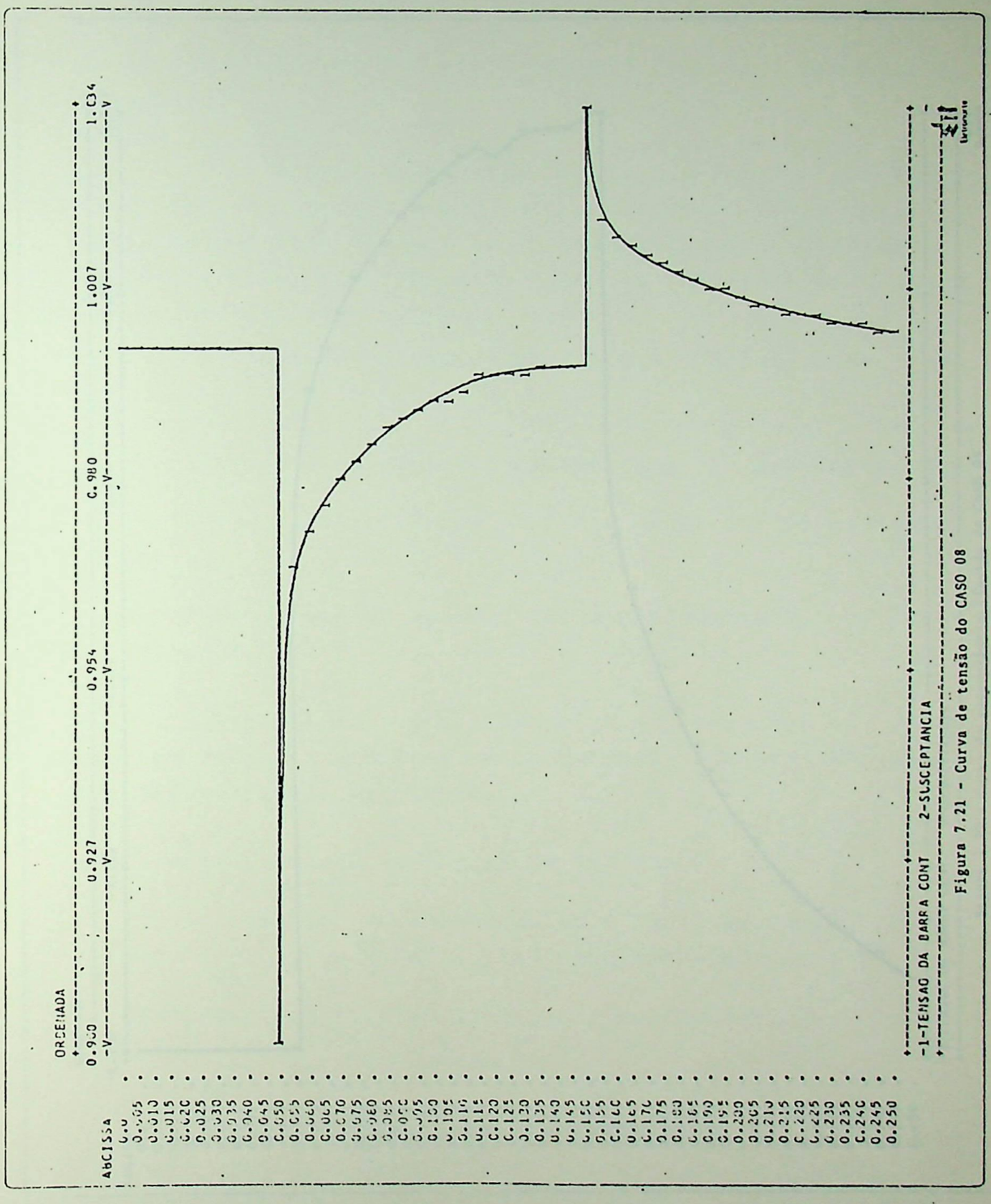


Figura 7.21 - Curva de tensão do CASO 08

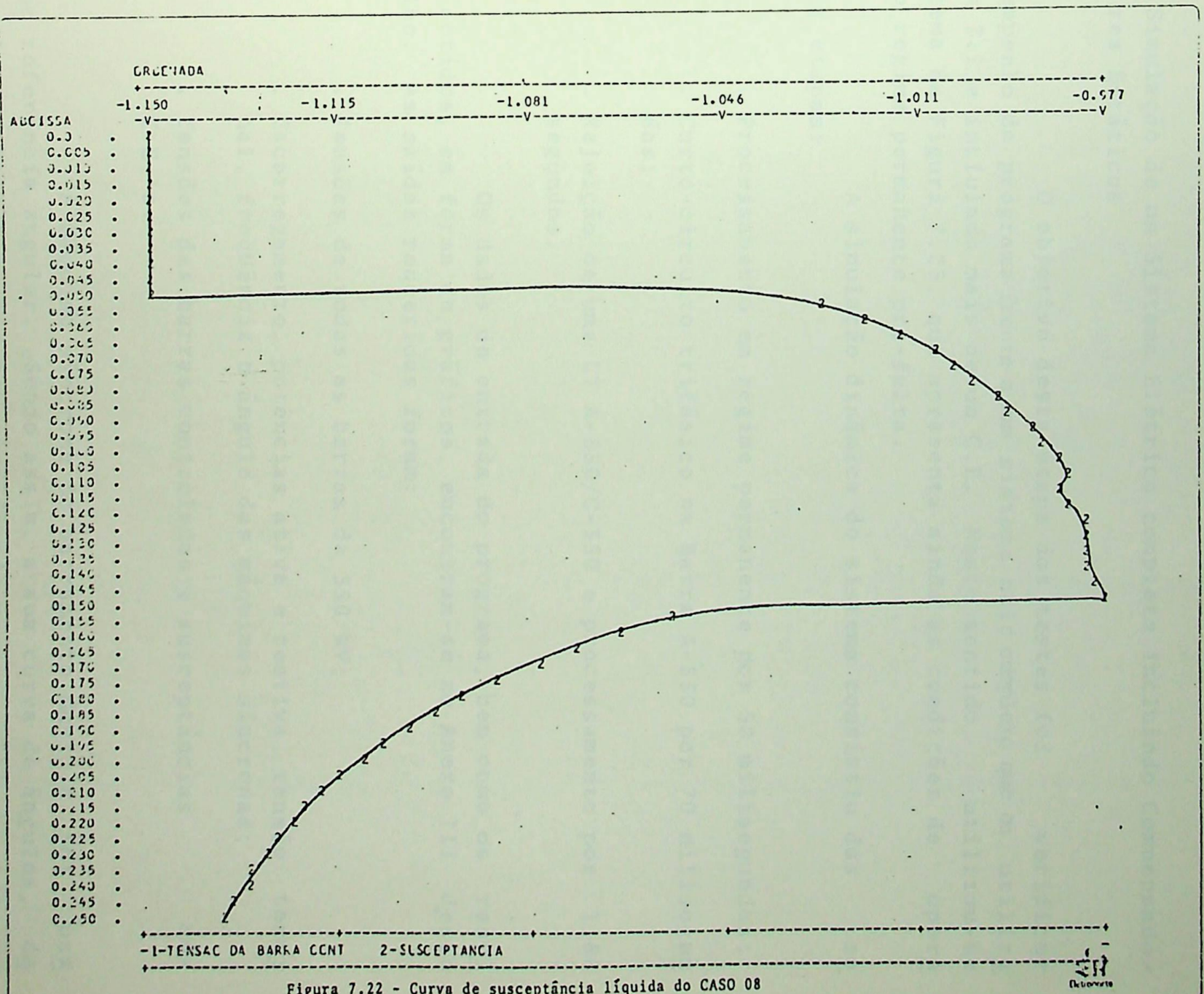


Figura 7.22 - Curva de susceptância líquida do CASO 08

FINAL DO ESTUDO DE SIS. N. 1

em casos de difícil convergência o usuário do programa aumente o número de iterações por passo de integração, que tem 100 como valor "defaut".

7.2 - Simulação de um Sistema Elétrico completo incluindo Compensadores Estáticos

O objetivo desta etapa dos testes foi verificar o desempenho do programa frente a um sistema mais complexo que os utilizados em 7.1 e incluindo mais de um C.E. Neste sentido, utilizou-se o sistema da Figura 7.23, que apresenta ainda as condições de operação no regime permanente pré-falta.

A simulação dinâmica do sistema consistiu das seguintes etapas:

- Processamento em regime permanente por 50 milisegundos;
- Curto-circuito trifásico na Barra A-550 por 70 milisegundos;
- Rejeição de uma LT A-550/C-550 e processamento por 1,88 segundos.

Os dados de entrada do programa, bem como os resultados obtidos, em forma de gráficos, encontram-se no Anexo III deste trabalho. As saídas requeridas foram:

- Tensões de todas as barras de 550 kV;
- Escorregamento, potências ativa e reativa, tensão terminal, freqüência e ângulo das máquinas síncronas;
- Tensões das barras controladas e susceptâncias dos C.E.'s.

A máquina síncrona do barramento GA-13,8 foi usada como referência angular. Sendo assim, a sua curva de ângulos, dada em valores absolutos, não tem significado para a análise. A curva de ângulos da máquina da barra GB-13,8 é dada em relação à máquina da barra GA-13,8.

Analisando os resultados obtidos, verificam-se alguns fatos interessantes. Em primeiro lugar, fica claro que o siste

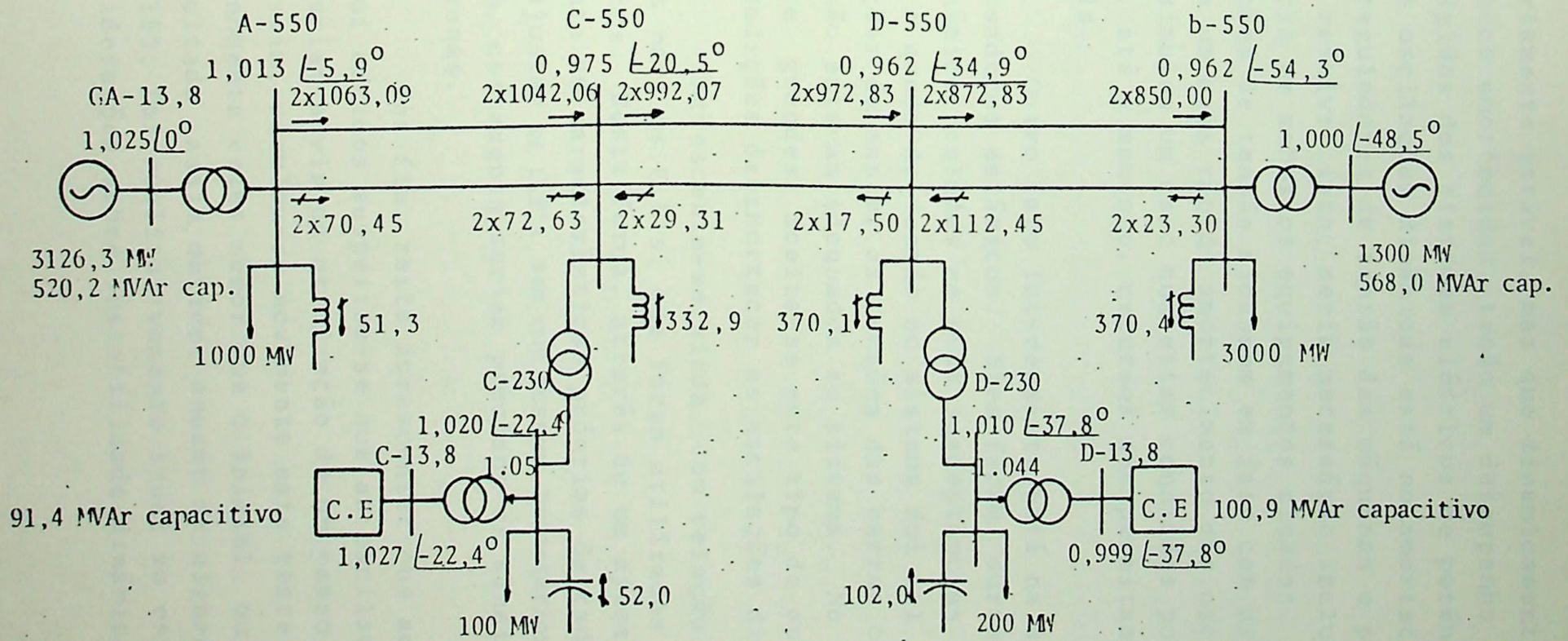


Figura 7.23 - Diagrama unifilar e fluxo de carga do caso teste simulado no item 7.2

ma é transitoriamente estável, mas que dinamicamente suas oscilações estão muito pouco amortecidas, tendo um desempenho que não satisfaz os padrões exigidos dos sistemas elétricos de potência. A explicação para estas oscilações dinâmicas está no amortecimento negativo injetado pelos reguladores de tensão das máquinas e pelos próprios C.E.'s. Para resolver isto, seria necessário incluir sinais adicionais de potência em ambos os equipamentos citados. Isto permitiria que as oscilações de tensão ficassem em fase com as de potência, contribuindo para um mais rápido amortecimento das oscilações verificadas. Não se simulou um caso com estas condições porque o programa não apresenta, até o momento, recursos que permitam a inclusão de sinais adicionais.

Outro fato interessante está na análise das respostas dos compensadores estáticos. Eles ficam, durante a maior parte do período dinâmico, colados em suas susceptâncias superiores. Isto significa que a queda de tensão no sistema foi tal que eles não mais tiveram condições de manter as tensões das barras controladas. Logo, seus limites não estavam adequados ao sistema. No entanto, como eles já são bastante grandes, aceita-se este tipo de operação desde que eles tenham condições de amortecer as oscilações dinâmicas.

Acrescenta-se ainda, com relação aos modelos dinâmicos adotados para os C.E's, que foram utilizados parâmetros típicos e iguais em ambos. Desta forma, através de um ajuste dos parâmetros, levando em conta as características próprias de cada barramento, seria possível ajustar os C.E's sem que fossem necessários sinais adicionais. Contudo, certamente seriam precisos os sinais adicionais das máquinas síncronas.

Por fim, resta acrescentar que ao se verificar os resultados aqui obtidos suspeitou-se que as oscilações dinâmicas encontradas poderiam advir da utilização de um passo inadequado para o caso. Sendo assim, simulou-se novamente este teste com um passo de integração cinqüenta vezes menor que o inicial, ou seja, 0,0001 segundos. O resultado assim obtido, apesar de algumas diferenças numéricas de até 15%, foi qualitativamente igual ao está no anexo III. Logo, as considerações sobre instabilidade dinâmica são realmente válidas.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES GERAIS

Apesar de cada capítulo já apresentar suas conclusões específicas, vale tecer aqui alguns comentários de caráter genérico. A utilização dos compensadores estáticos como suporte reativo nos sistemas elétricos de potência, conforme enfocada no presente trabalho, mostrou-se bastante proveitosa. Ele vem substituir os compensadores síncronos numa larga faixa de suas aplicações, bem como em casos onde o síncrono não seria utilizado, apresentando uma série de vantagens de ordem técnica e econômica. Desta forma, é sempre recomendável avaliar-se o emprego de compensadores estáticos quando houver necessidade de se especificar uma compensação reativa variável.

Abordando de forma mais específica os itens desenvolvidos neste trabalho, conclui-se que os três tipos de unidades variáveis de C.E.'s estudados em detalhe — reator controlado por tiristores (RCT), capacitor chaveado por tiristores (CCT) e reator de núcleo saturado (RNS) — têm, isoladamente, características bem específicas, o que implica em soluções diversas para obtenção de condições operativas satisfatórias.

O RCT e o RNS apresentam campos de aplicação semelhantes, embora o primeiro venha sendo muito mais difundido que o segundo devido às dificuldades de reparo do último. Ambos têm possibilidade de exercer um controle contínuo, mas a forma como obtêm esta função é bem distinta. O RCT tem um controle externo, através de componentes eletrônicos de medição, comparação e disparo. Já o RNS utiliza suas características não lineares na ação de regulagem. Por fim, devido à flexibilidade na construção do controle, pode-se dizer que o RCT tem mais campo de aplicação. Quanto ao capacitor chaveado por tiristores, é o mais rápido dos três tipos, mas isoladamente tem uma ação limitada, pois sua variação de reativo é discreta, restringindo assim sua aplicabilidade.

As três unidades variáveis básicas são normalmente combinadas entre si, ou com outras fontes fixas de reativo (capacitores ou reatores), a fim de suprir as necessidades de geração ou absorção de potência reativa do sistema elétrico. Desta forma, pode-se dizer que os arranjos mais comuns são os de RCT/capacitores fixos ,

que as unidades com controle externo não são combinadas com o reator de núcleo saturado, já que seria muito difícil e anti-econômico ajustar a ação dos comandos eletrônicos em paralelo com as características não lineares do RNS.

Outro item abordado, e que se mostrou proveitoso, foi a determinação das principais características do C.E. através de cálculos simplificados. Pôde-se observar que dispondo de informações bem simples da barra controlada do C.E., tais como nível de curto-circuito nas principais condições operativas, é possível já se ter uma noção da ordem de grandeza dos limites de geração e absorção de reativo. Além disto, o capítulo 4 evidenciou ainda um outro item de grande importância para o entendimento dos C.E.'s — a grande dependência da atuação e eficiência de regulação do C.E. em relação ao nível de curto-circuito de sua barra controlada.

O capítulo 5 tratou do assunto principal deste trabalho, que é a modelagem dinâmica dos C.E.'s para estudos à freqüência industrial. Devido às hipóteses formuladas em tal tipo de simulação, verificou-se que os modelos a serem desenvolvidos deveriam representar apenas a atuação básica de controle do equipamento, com seus principais pontos de retardo. Maiores detalhes certamente fugiriam ao grau de precisão na representação do restante do sistema. Outro ponto de destaque é que no grau de detalhamento buscado todos os compensadores estáticos com unidades variáveis de controle externo podem ser representados por diagramas de blocos quase que idênticos. Nestes tipos de C.E.'s as diferenças nos modelos seriam atribuídas quase que exclusivamente à filosofia de controle adotada no regulador de tensão. Com relação ao reator de núcleo saturado, foi possível chegar-se, também, a um modelo tão simples quanto desejado. Contudo, neste caso, foi necessário um detalhamento maior de suas equações de funcionamento, de maneira a permitir a exata identificação dos pontos que levam ao retardo existente na resposta do equipamento. E a interessante conclusão obtida é que o retardo existente no RNS deve-se quase que exclusivamente ao capacitor de correção de inclinação.

Foram vistos também, de forma bem suscinta, somente em caráter informativo, os modelos de C.E.'s utilizados nos outros principais estudos digitais dos sistemas elétricos de potência, procurando indicar as melhores fontes bibliográficas específicas de cada assunto.

A etapa seguinte deste trabalho, que consistiu da implementação dos modelos desenvolvidos num programa de estabilidade transitória, [illegible] de algumas conclusões bastante ilus

trativas. A principal delas é que a modelagem dos compensadores estáticos através de fontes de corrente mostrou-se bem propícia ao método utilizado no programa para resolução das equações diferenciais, que é o trapezoidal implícito. Devido à necessidade de um processo iterativo na resolução por tal método, a transformação de susceptância em corrente não acumula a defasagem de um passo de integração, tornando a representação por fonte de corrente um artifício válido e sem introdução de qualquer tipo de erro oriundo de hipóteses simplificadoras neste âmbito.

A seguir, o trabalho desenvolvido na adaptação dos modelos do programa de estabilidade foi levado de maneira a permitir a obtenção de uma metodologia simples e prática para inclusão de novos tipos de C.E.'s no futuro. Como produto complementar, considerando que a introdução dos C.E.'s procurou seguir a filosofia já existente no programa, chegou-se à conclusão de que a mesma formulação algébrica e técnica de programação utilizada para os estáticos pode ser aplicada também na inclusão de novos reguladores, novos modelos de máquinas síncronas ou motores de indução ou, principalmente, na criação de novas representações que exijam o trabalho com equações diferenciais. Neste último caso, incluem-se os elos de corrente contínua , cargas com retificação estática, etc.

Finalizando, a etapa de testes serviu para comprovar a validade e qualidade dos modelos desenvolvidos, bem como da adaptação ao programa de estabilidade transitória. Além disto, as dificuldades encontradas nesta altura do trabalho levaram ao desenvolvimento de um algorítmo de auxílio de convergência através da suavização do crescimento da corrente dos C.E.'s dentro do processo iterativo de um passo de integração. A utilização deste método permitiu processar casos inicialmente divergentes, embora tivesse ficado patente dos próprios testes que ele não garante a convergência em todas as situações.

Como complementação serão apontados, a seguir, alguns tópicos que possam servir de base a futuros trabalhos. Na área de análise e ajuste dos parâmetros dos compensadores estáticos, seria de grande valia a formulação de uma metodologia simples e completa que possibilitasse não só a obtenção de uma primeira aproximação dos parâmetros, mas também o devido ajuste para que o estático auxilie no amortecimento de oscilações dinâmicas. E neste último caso, seria interessante um procedimento semelhante ao do cálculo de sinais adicionais estabilizadores dos reguladores de tensão das máquinas síncronas ([illegible]). No que tange ao processo de

suavização aqui iniciado, valeria uma pesquisa mais profunda de suas bases teóricas, a fim de otimizar os parâmetros limites que determinam a ação do algorítmo. E concluindo, em relação a trabalhos com o programa de estabilidade transitória, sugere-se a extensão do método de suavização a todas as fontes de corrente do programa, a inclusão de novos modelos de compensadores estáticos, principalmente aqueles com "droop" de corrente, e a adição de sinais estabilizadores de potência e freqüência nos reguladores de tensão. Esta última sugestão é oriunda das dificuldades de simulação encontradas no caso teste do Anexo III, comentadas em 7.2 .

I.1 - INTRODUÇÃO

O modelo de compensador estático com controle externo tendo "droop" de corrente, apresentado na Figura 5.14, não foi incluído no programa digital de estabilidade usado neste trabalho. Sendo assim, os cálculos de suas constantes não mereceram tanto destaque quanto aqueles apresentados em 5.4.3. No entanto, considerando o fato de que a Referência 19 já apresenta uma aplicação prática para os cálculos de tais parâmetros, considerou-se conveniente reproduzir estes cálculos como anexo.

I.2 - PARÂMETROS UTILIZADOS

O cálculo dos parâmetros utilizados seguiu a orientação dos fabricantes dos C.E.'s da ELETRONORTE, bem como a alguns cálculos que serão apresentados a seguir.

A determinação do ganho "K" foi feita a partir da fórmula simplificada abaixo, que foi fornecida pela CGEE-ALSTHOM.

$$K = \frac{1}{(B_{máx.} - B_{mín.})\,(X_{cc} - X_s)} \qquad \text{(I.1)} \quad \text{BASE} = 100 \text{ MVA}$$

Onde: $B_{máx.}$ = 70 MVAr = 0,7 p.u.

$B_{mín.}$ = -50 MVAr = -0,5 p.u.

X_{cc} = Reatância de curto-circuito do barramento controlado pelo C.E.

X_s = Estatismo do C.E.

Então, para cálculo de K necessita-se do estatismo, cujo cálculo é mostrado a seguir.

Inicializando por linearizar o diagrama da Figura 5.14 em torno do ponto de funcionamento B_o e V_o, tem-se:

A N E X O I

$I = -jB.V$ e, $I = I_o + \Delta I = -j(B_o + \Delta B)\ (V_o + \Delta V)$ (I.2)

Desprezando os termos de 2ª. ordem, obtém-se:

$$I_o = -jB_o\ V_o$$

$$\Delta I = -j(B_o\ \Delta V + V_o.\Delta B) \qquad (I.3)$$

Considerando que a reatância de curto-circuito X_{cc} é também a própria do barramento controlado, e que a única variação imposta a ele é ΔI, pode-se dizer que,

$$\Delta V = \Delta I\ .\ jX_{cc} \qquad (I.4)$$

$$\Delta I = B_o\ \Delta I\ X_{cc} + V_o\ (-j\ \Delta B) \qquad (I.5)$$

$$\Delta I = -j\ \frac{V_o\ \Delta B}{1 - B_o\ X_{cc}} \qquad (I.6)$$

Destas equações chega-se ao diagrama linearizado da Figura I.1.

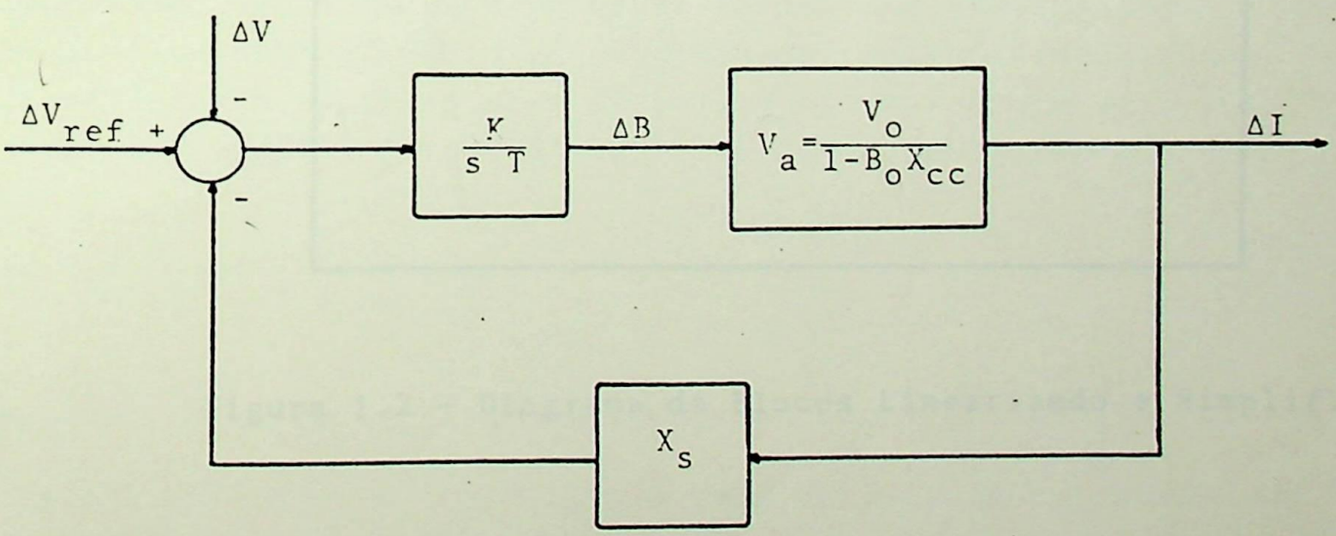


Figura I.1 - Diagrama de Blocos Linearizado do C.E

Tirando agora a realimentação através de X_s, obtém-se:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V_{ref} - \Delta V} = \frac{KV_a/sT}{1 + \frac{KV_a X_s}{sT}} = \frac{1/X_s}{1 + \frac{sT}{KV_a X_s}} \qquad (I.7)$$

Por fim, tem-se:

$e_{ss} = \Delta V_{ref} - \Delta V$ (I.8) (erro de tensão no regime permanente)

que é o valor que se deseja controlar dentro de certos limites. Com a eliminação acima obtém-se o diagrama da Figura I.2 .

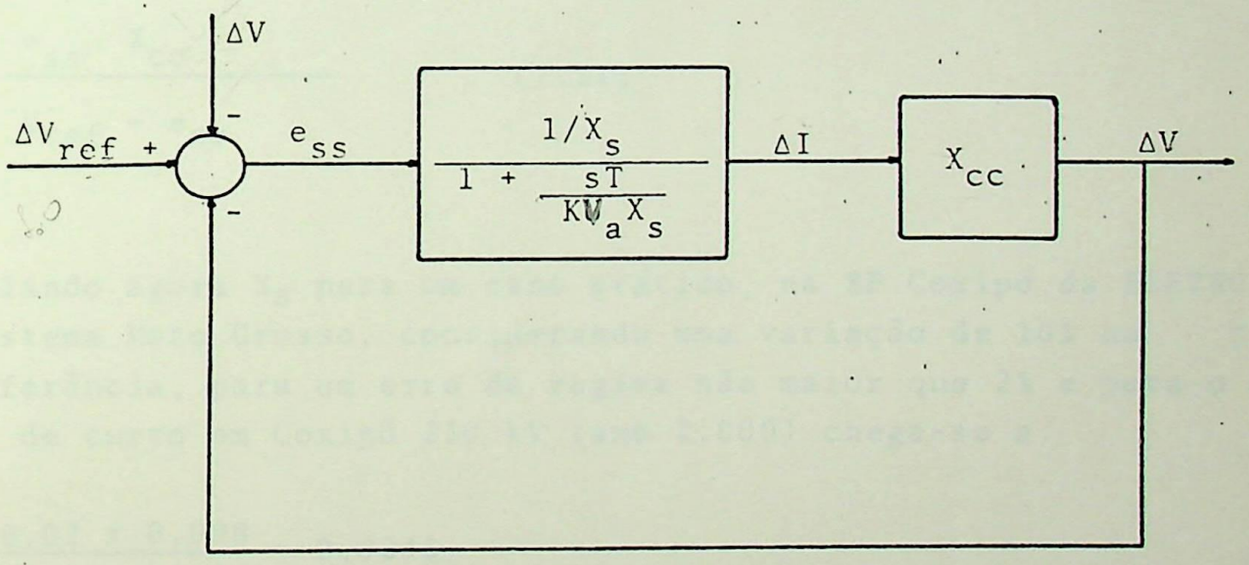


Figura I.2 - Diagrama de Blocos Linearizado e Simplificado

A partir deste ponto chega-se à seguinte função de transferência

linearizada:

$$\frac{e_{ss}}{\Delta V_{ref}} = \frac{1}{1 + \dfrac{X_{cc}/X_s}{1 + sT/KV_a\ X_s}} \qquad (I.9)$$

Calculando o valor de e_{ss} no regime permanente após um distúrbio na tensão de referência, isto é, fazendo $t = \infty$ no domínio do tempo ou $s = 0$ no domínio da freqüência, tem-se:

$$e_{ss} = \frac{\Delta V_{ref}}{1 + X_{cc}/X_s} \qquad (I.10) \quad \therefore$$

$$X_s = \frac{e_{ss}\ X_{cc}}{V_{ref} - e_{ss}} \qquad (I.11)$$

Calculando agora X_s para um caso prático, na SE Coxipó da ELETRONORTE — Sistema Mato Grosso, considerando uma variação de 10% na tensão de referência, para um erro de regime não maior que 2% e para o maior nível de curto em Coxipó 230 kV (ano 2.000) chega-se a:

$$X_s = \frac{0,02 \times 0,098}{0,10 - 0,02} = 0,0245$$

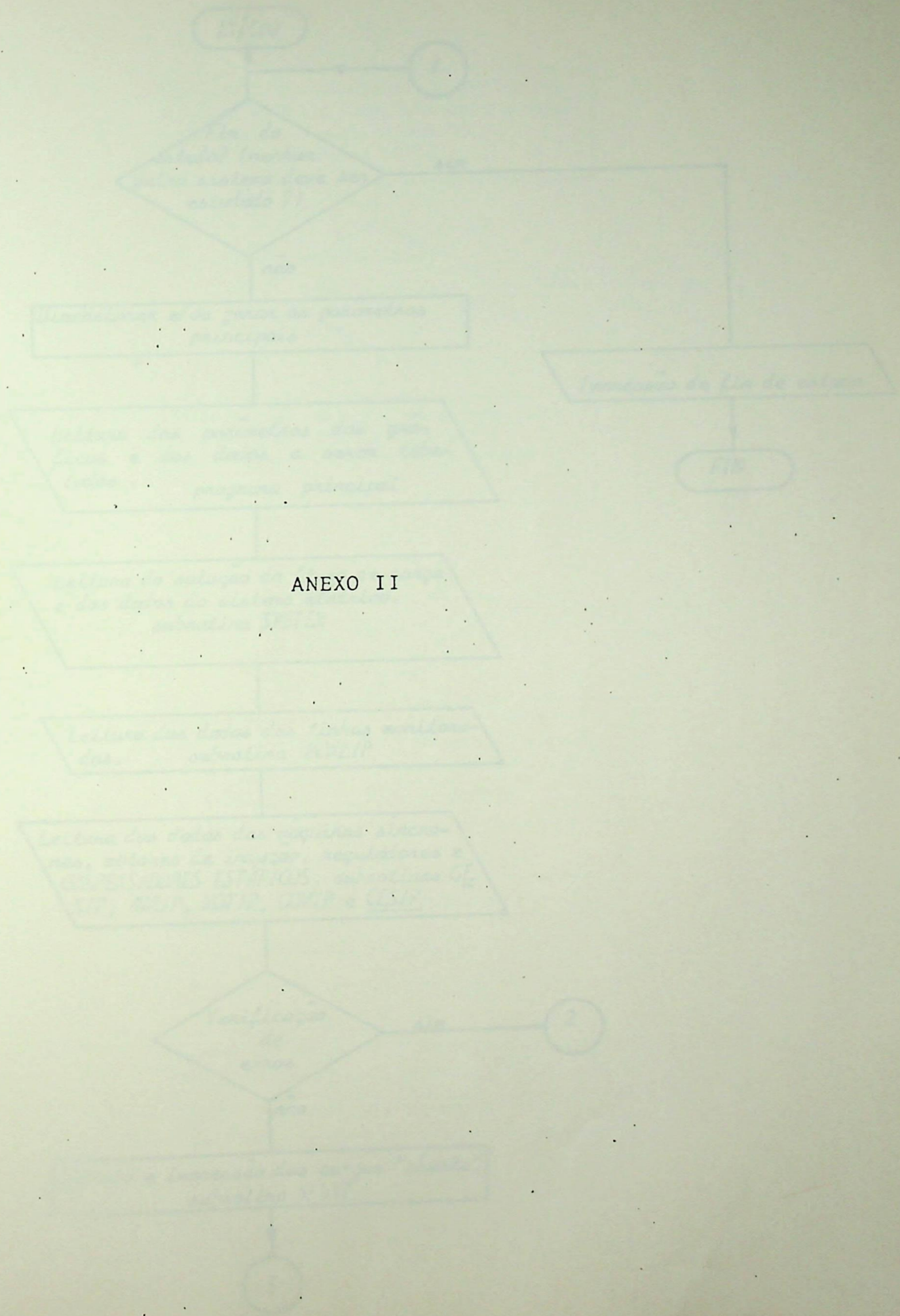
ou seja, deve-se utilizar um estatismo menor ou igual a este valor.

Supondo $X_s = 0,01$ e calculando K para o nível de curto mínimo, ano de 1988, tem-se:

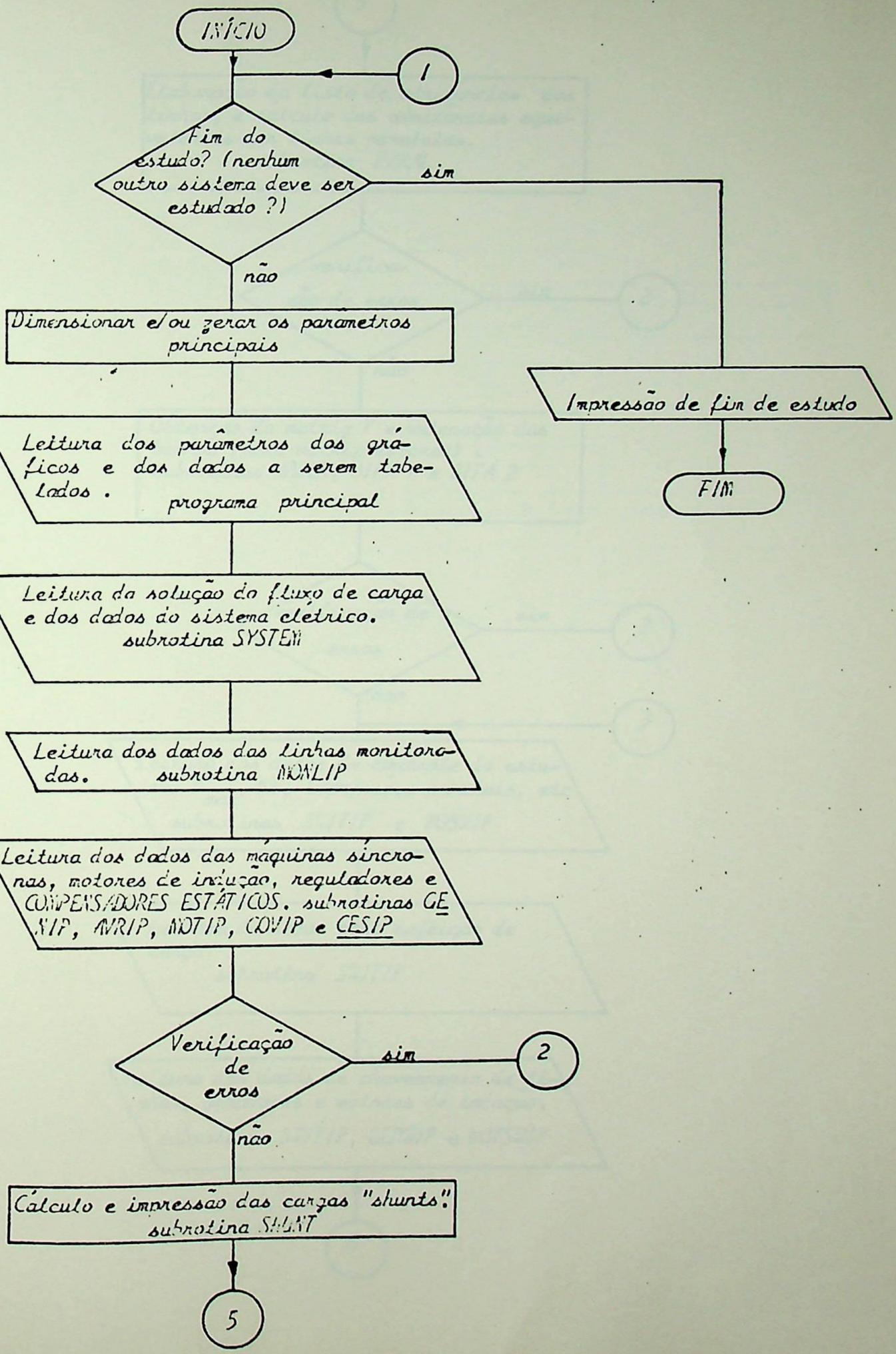
$$K = \frac{1}{(0,7+0,5)\ (0,22-0,01)} = 3,97$$

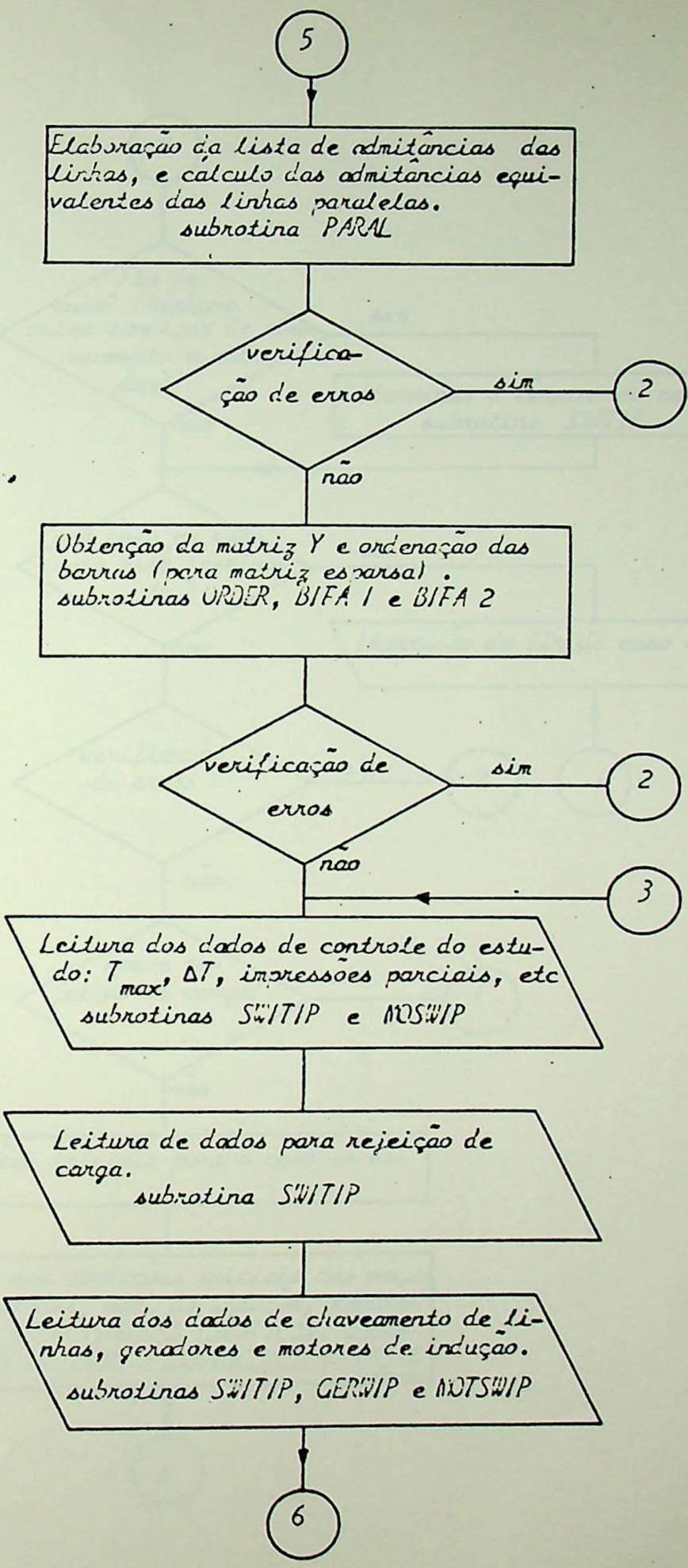
Adotou-se K = 4,00

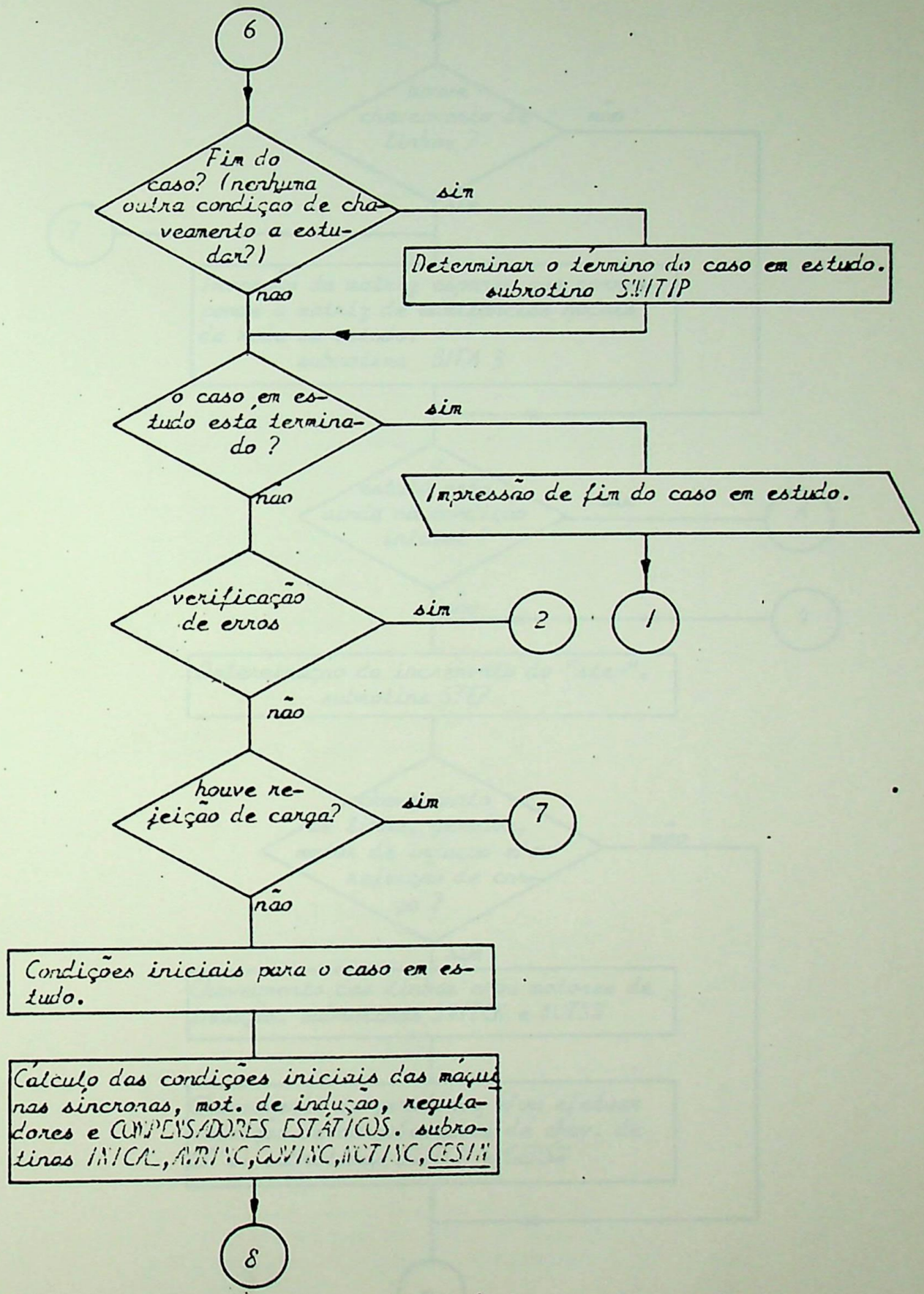
Por último, adotou-se a constante de tempo T = 0,017 seg., que é um valor típico, indicado pela CGEE-ALSTHOM.

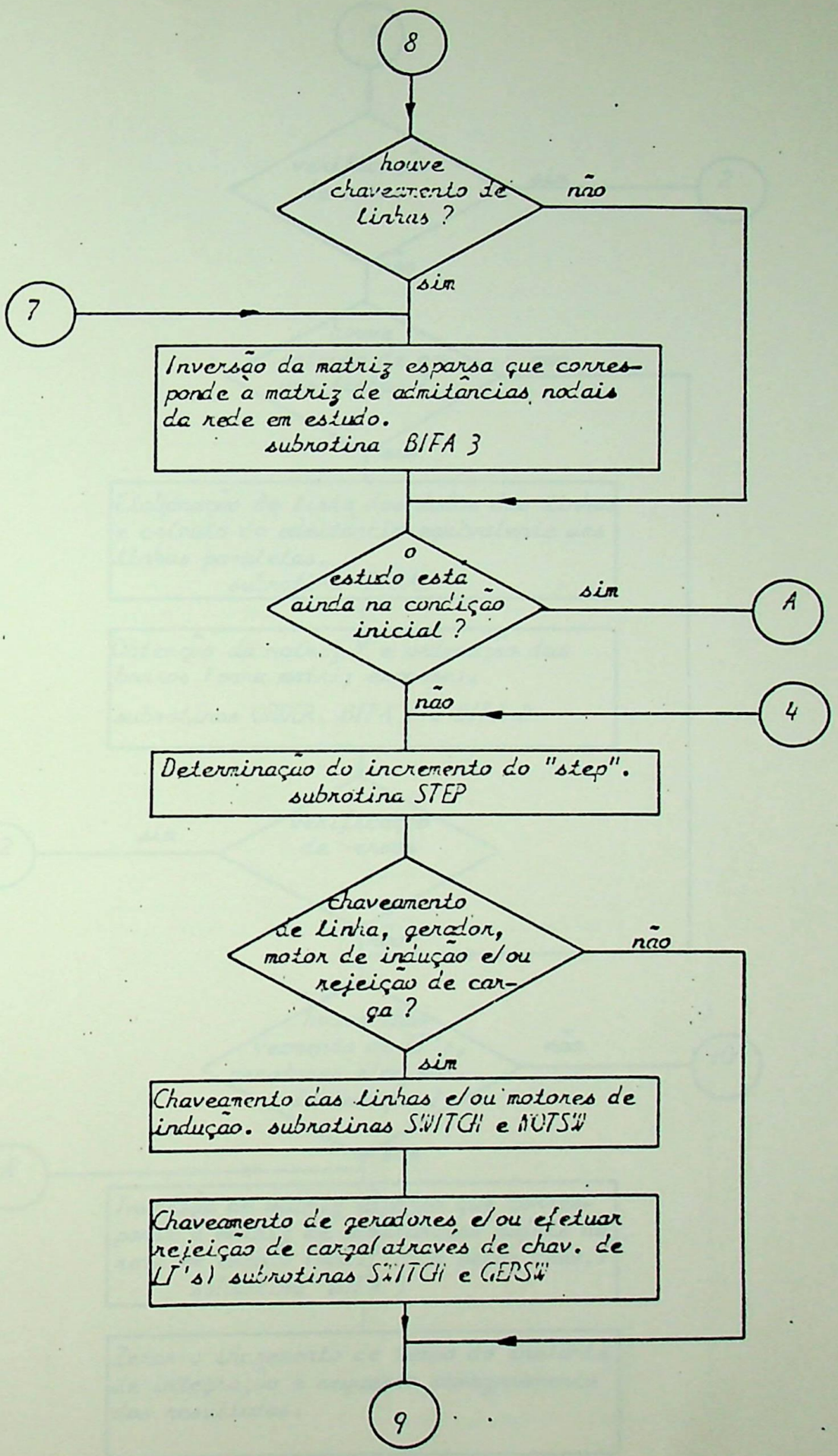


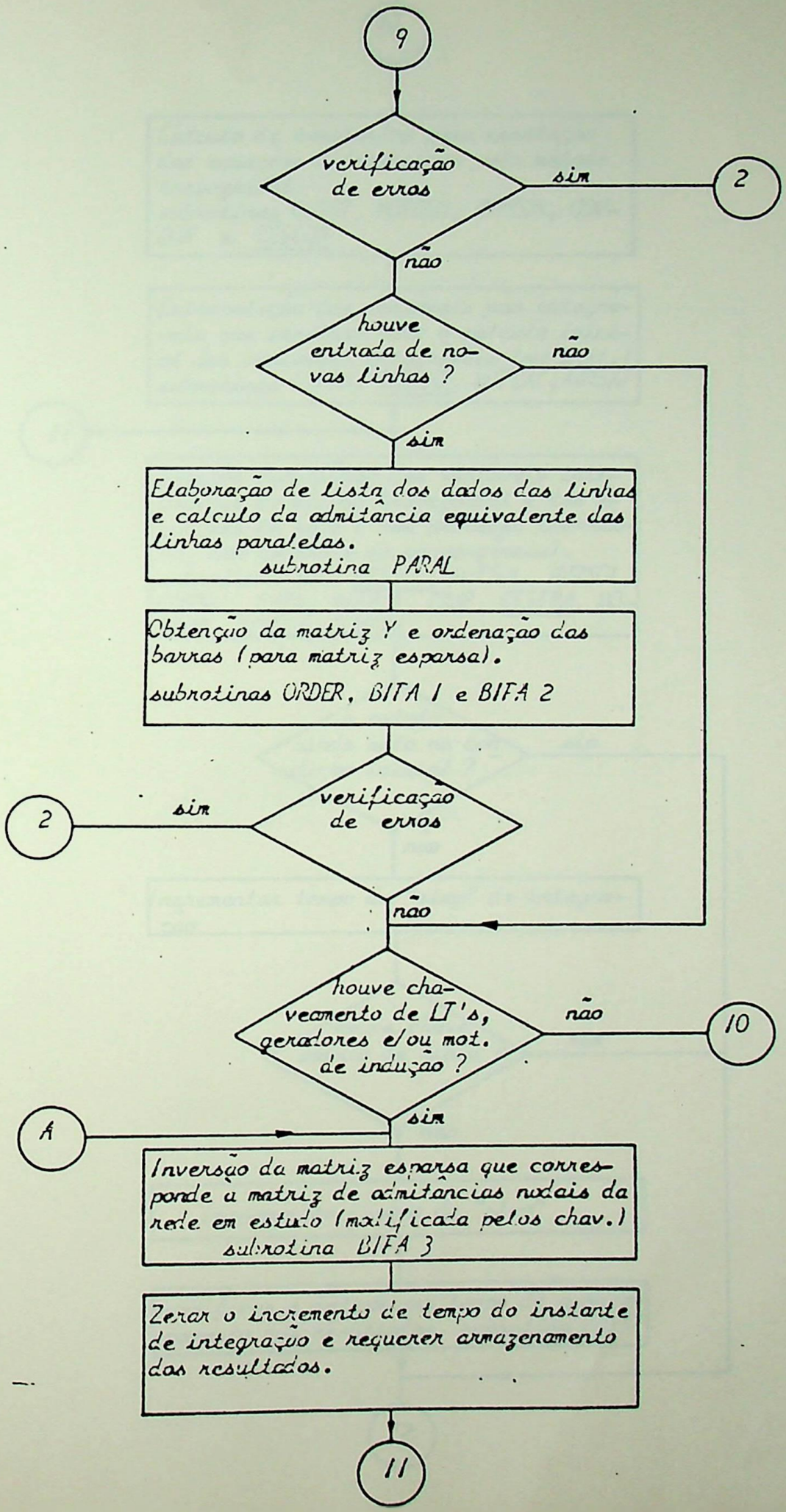
ANEXO II

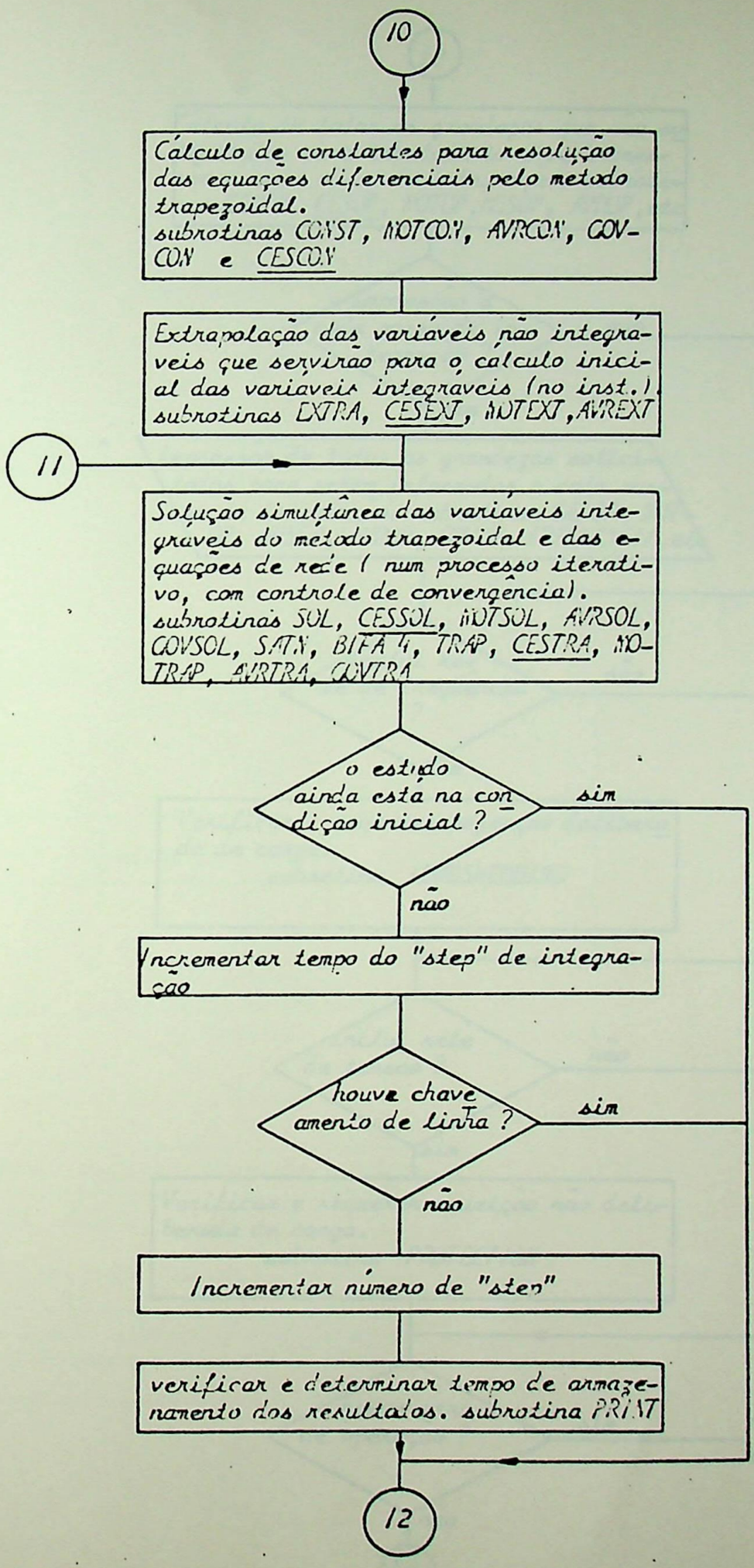

INÍCIO
1
Fim do estudo? (nenhum outro sistema deve ser estudado ?)
sim
não
Impressão de fim de estudo
FIM
Dimensionar e/ou zerar os parametros principais
Leitura dos parâmetros dos gráficos e dos dados a serem tabelados . programa principal
Leitura da solução do fluxo de carga e dos dados do sistema eletrico. subrotina SYSTEM
Leitura dos dados das linhas monitoradas. subrotina MONLIP
Leitura dos dados das máquinas síncronas, motores de indução, reguladores e COMPENSADORES ESTÁTICOS. subrotinas GESIP, AVRIP, MOTIP, COVIP e CESIP
Verificação de erros
sim
2
não
Cálculo e impressão das cargas "shunts" subrotina SALNT
5

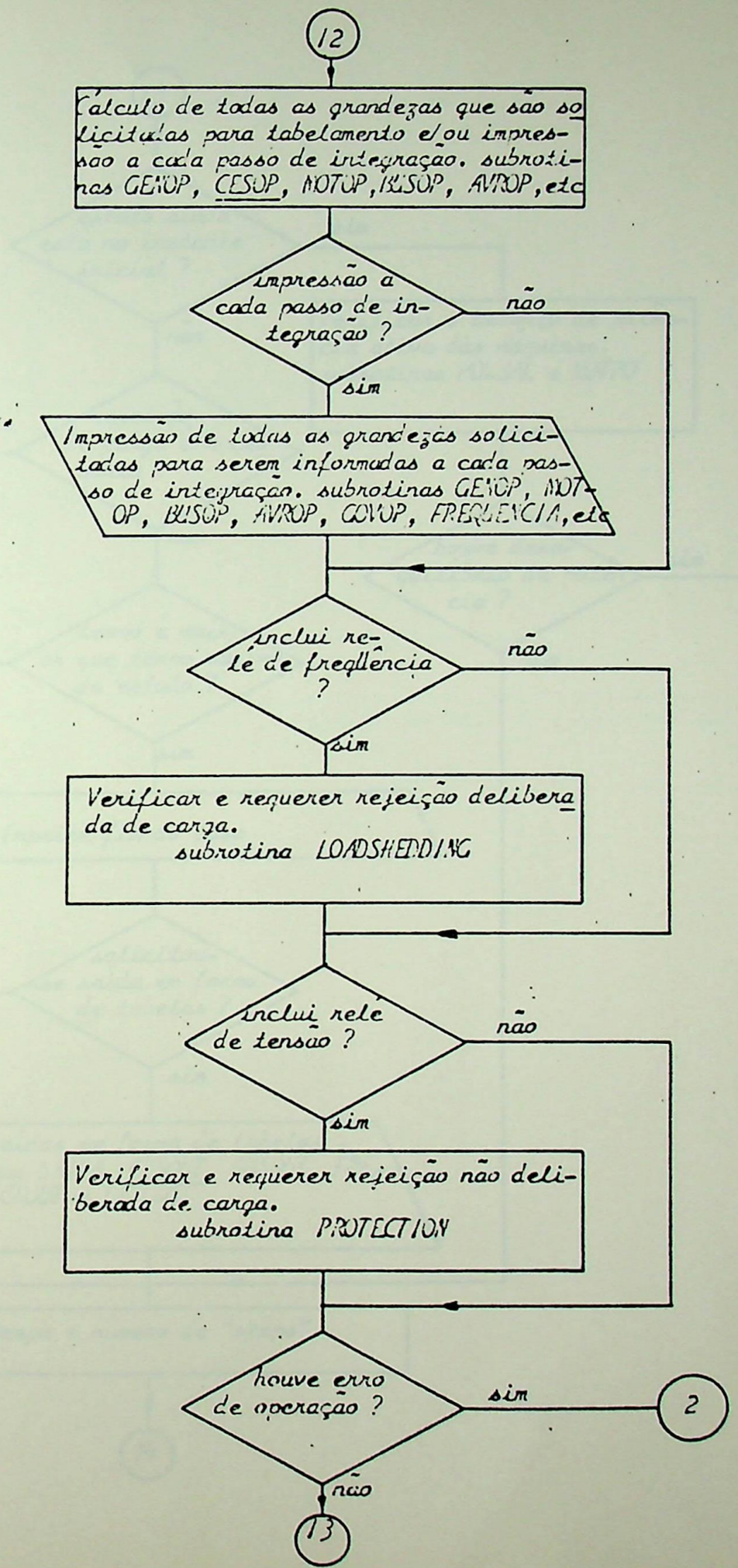

5
Elaboração da lista de admitâncias das linhas, e calculo das admitâncias equivalentes das linhas paralelas.
subrotina PARAL
verificação de erros
sim
2
não
Obtenção da matriz Y e ordenação das barras (para matriz esparsa).
subrotinas ORDER, BIFA 1 e BIFA 2
verificação de erros
sim
2
não
3
Leitura dos dados de controle do estudo: T_{max}, ΔT, impressões parciais, etc
subrotinas SWITIP e NOSWIP
Leitura de dados para rejeição de carga.
subrotina SWITIP
Leitura dos dados de chaveamento de linhas, geradores e motores de indução.
subrotinas SWITIP, GERSWIP e NOTSWIP
6

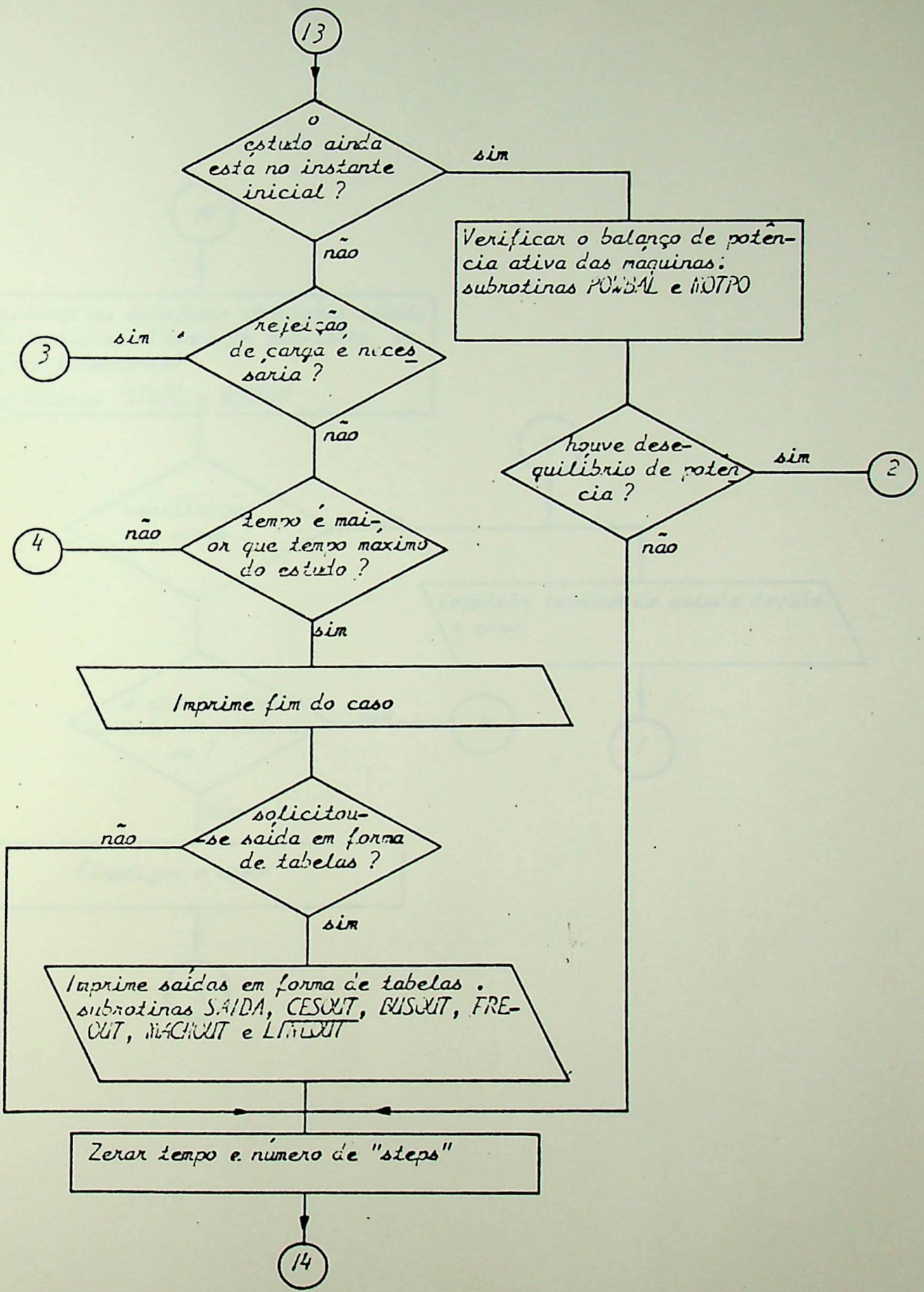

6
Fim do caso? (nenhuma outra condiçao de chaveamento a estudar?)
sim
Determinar o término do caso em estudo. subrotina SWITP
não
o caso em estudo está terminado ?
sim
Impressão de fim do caso em estudo.
não
verificação de erros
sim
2
1
não
houve rejeição de carga?
sim
7
não
Condições iniciais para o caso em estudo.
Cálculo das condições iniciais das máquinas sincronas, mot. de indução, reguladores e COMPENSADORES ESTÁTICOS. subrotinas INICAL, ARINC, GOVINC, AUTINC, CESTA
8

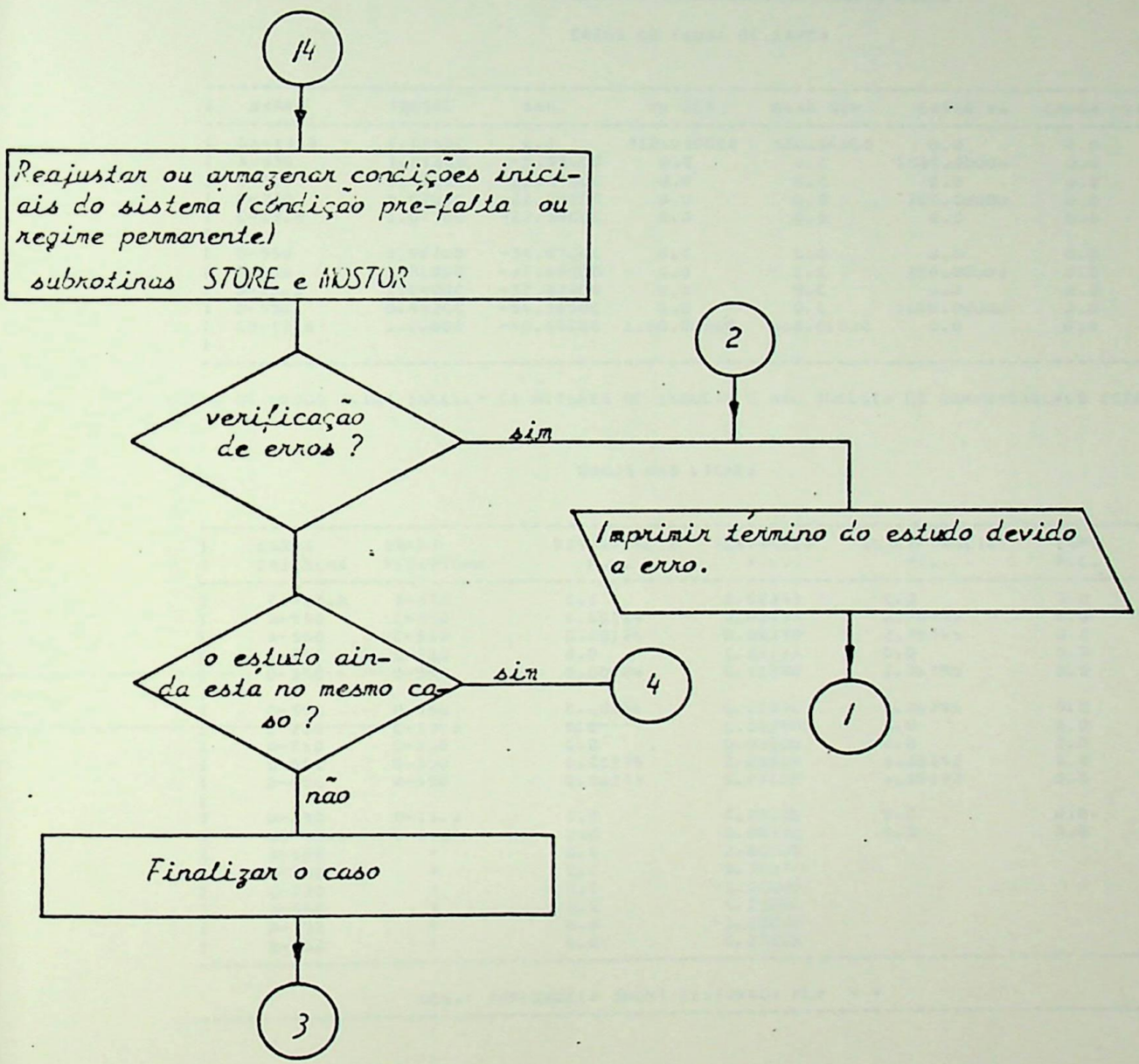

8
houve chaveamento de linhas ?
não
sim
7
Inversão da matriz esparsa que corresponde a matriz de admitâncias nodais da rede em estudo.
subrotina BIFA 3
o estudo esta ainda na condição inicial ?
sim
A
não
4
Determinação do incremento do "step".
subrotina STEP
Chaveamento de linha, gerador, motor de indução e/ou rejeição de carga ?
não
sim
Chaveamento das linhas e/ou motores de indução. subrotinas SWITCH e NOTSW
Chaveamento de geradores e/ou efetuar rejeição de carga através de chav. de LT's) subrotinas SWITCH e GERSW
9


9
verificação de erros
sim
2
não
houve entrada de novas linhas ?
não
sim
Elaboração de lista dos dados das linhas e calculo da admitância equivalente das linhas paralelas.
subrotina PARAL
Obtenção da matriz Y e ordenação das barras (para matriz esparsa).
subrotinas ORDER, BIFA 1 e BIFA 2
verificação de erros
sim
2
não
houve chaveamento de LT's, geradores e/ou mot. de indução ?
não
10
sim
A
Inversão da matriz esparsa que corresponde a matriz de admitancias nodais da rede em estudo (modificada pelos chav.)
subrotina BIFA 3
Zerar o incremento de tempo do instante de integração e requerer armazenamento dos resultados.
11


10
Cálculo de constantes para resolução das equações diferenciais pelo metodo trapezoidal.
subrotinas CONST, MOTCON, AVRCON, COVCON e CESCON
Extrapolação das variáveis não integráveis que servirão para o calculo inicial das variaveis integraveis (no inst.).
subrotinas EXTRA, CESEXT, MOTEXT, AVREXT
11
Solução simultânea das variáveis integraveis do metodo trapezoidal e das equações de rede (num processo iterativo, com controle de convergencia).
subrotinas SOL, CESSOL, MOTSOL, AVRSOL, COVSOL, SATN, BIFA 4, TRAP, CESTRA, MOTRAP, AVRTRA, COVTRA
o estado ainda esta na condição inicial ?
sim
não
Incrementar tempo do "step" de integração
houve chaveamento de linha ?
sim
não
Incrementar número de "step"
verificar e determinar tempo de armazenamento dos resultados. subrotina PRINT
12


12
Cálculo de todas as grandezas que são solicitadas para tabelamento e/ou impressão a cada passo de integração. subrotinas GERAOP, CESOP, MOTOP, BUSOP, AVROP, etc
impressão a cada passo de integração ?
não
sim
Impressão de todas as grandezas solicitadas para serem informadas a cada passo de integração. subrotinas GERAOP, MOTOP, BUSOP, AVROP, COVOP, FREQUENCIA, etc
inclui rele de freqüencia ?
não
sim
Verificar e requerer rejeição deliberada de carga.
subrotina LOADSHEDDING
inclui relé de tensão ?
não
sim
Verificar e requerer rejeição não deliberada de carga.
subrotina PROTECTION
houve erro de operação ?
sim
2
não
13


13
o estudo ainda esta no instante inicial ?
sim
não
Verificar o balanço de potência ativa das maquinas: subrotinas POWBAL e MOTPO
rejeição de carga e necessaria ?
sim
3
não
houve desequilibrio de potencia ?
sim
2
não
tempo é maior que tempo maximo do estudo ?
não
4
sim
Imprime fim do caso
solicitou-se saida em forma de tabelas ?
não
sim
Imprime saidas em forma de tabelas . subrotinas SAIDA, CESOUT, BUSOUT, FREOUT, MACHOUT e LINEOUT
Zerar tempo e número de "steps"
14


14
Reajustar ou armazenar condições iniciais do sistema (condição pre-falta ou regime permanente)
subrotinas STORE e UNSTOR
2
verificação de erros ?
sim
Imprimir término do estudo devido a erro.
o estudo ainda esta no mesmo caso ?
sim
4
1
não
Finalizar o caso
3

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

SIMULACAO DE UM SISTEMA TIPICO COM DUAS GERACOES E DOIS CE'S
CURTO CIRCUITO TRIFASICO NA BARRA A-550 POR 70MSEG
ELIMINACAO ATRAVES DA ABERTURA DA LT A-550/C-550
FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

BARRA	TENSAO	ANG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR
GA-13.8	1.02500	0.0	3126.30000	520.14000	0.0	0.0
A-550	1.01300	-5.93000	0.0	0.0	1000.00000	0.0
C-550	0.97500	-20.47000	0.0	0.0	0.0	0.0
C-230	1.02000	-22.39000	0.0	0.0	100.00000	0.0
C-13.8	1.07300	-22.39000	0.0	0.0	0.0	0.0
D-550	0.96200	-34.87000	0.0	0.0	0.0	0.0
D-230	1.01000	-37.82000	0.0	0.0	200.00000	0.0
D-13.8	1.04000	-37.82000	0.0	0.0	0.0	0.0
B-550	0.96200	-54.31000	0.0	0.0	3000.00000	0.0
GB-13.8	1.00000	-48.45000	1300.00000	568.01000	0.0	0.0

OBS.: OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCAO E NAO INCLUEM OS COMPENSADORES ESTATICOS.

DADOS DAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESISTENCIA P.U.	REATANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.U.
GA-13.8	A-550	0.0	0.00343	0.0	0.0
A-550	C-550	0.00184	0.02370	2.76795	0.0
A-550	C-550	0.00184	0.02370	2.76795	0.0
C-550	C-230	0.0	0.03333	0.0	0.0
C-550	D-550	0.00184	0.02370	2.76795	0.0
C-550	D-550	0.00184	0.02370	2.76795	0.0
C-230	C-13.8	0.0	0.06250	0.0	0.0
D-550	D-230	0.0	0.02500	0.0	0.0
D-550	B-550	0.00275	0.03555	4.15192	0.0
D-550	B-550	0.00275	0.03555	4.15192	0.0
D-230	D-13.8	0.0	0.03125	0.0	0.0
GB-13.8	B-550	0.0	0.00750	0.0	0.0
A-550	*	0.0	2.00000		
C-550	*	0.0	0.28571		
C-230	*	0.0	-2.00000		
D-550	*	0.0	0.25000		
D-230	*	0.0	-1.00000		
B-550	*	0.0	0.25000		

OBS.: IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

DADOS DAS MAQUINAS SÍNCRONAS

PARÂMETROS DAS MÁQUINAS

BARRA NOME	MAQUINA NO	MODEL	MVA BASE	CONST. INERC. DADO KW/KVA	REATANCIAS (P.U.) TRANSITORIA EIXO-D	TRANSITORIA EIXO-Q	SINCRONA EIXO-D	SINCRONA EIXO-Q	SUBTRANSITORIA EIXO-D	SUBTRANSITORIA EIXO-Q	POT-IER	RESIST. ARM. (P.U.)	O/C TCS (SEGS) TRANSITORIA EIXO-D	TRANSITORIA EIXO-Q	SUBTRANSITORIA EIXO-D	SUBTRANSITORIA EIXO-Q	FATOR SATURACAO
GA-13.8	0	4	350.00	46.000	0.0250	0.0500	0.0790	0.0500	0.0170	0.0170	0.0	0.0	5.50	0.0	0.0800	0.1500	0.0
GB-13.8	0	4	200.00	36.800	0.0313	0.0625	0.0988	0.0625	0.0212	0.0212	0.0	0.0	5.50	0.0	0.0800	0.1500	0.0

NOME DA BARRA	MAQ NO.	POTENCIA DE SAIDA DA MAQUINA MW	MVAR	FATOR AMORTECIMENTO
GA-13.8	0	3126.30000	520.14000	0.0
GB-13.8	0	1300.00000	563.01000	0.0

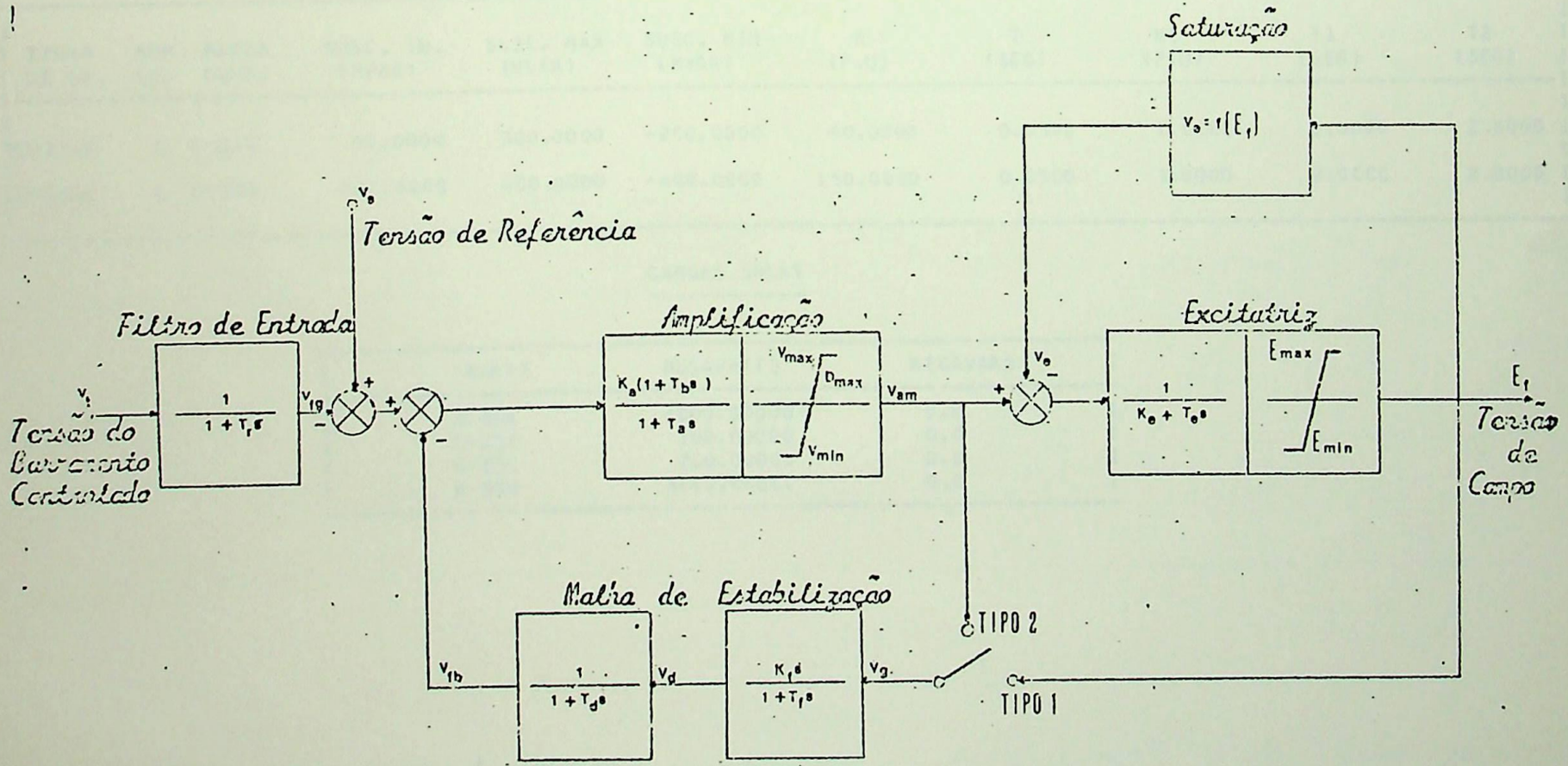
DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSAO

NOME DA BARRA	MQ NO	AVR TIPO	FILTRO C.T.	REG. GANHO	REG. TA	REG. TB	CS.T.	LIMITE REG. MAX	LIMITE REG. MIN	EXCITADOR TAXA	EXCITADOR GANHO	EXCITADOR C.T.	F/BK GANHO	F/BK TF	F/BK TD	CS.T. LIMITE EXCITADOR MAX	CS.T. LIMITE EXCITADOR MIN	SATUR.(SE) .75MAX	SATUR.(SE) MAX
GA-13.8	0	1	0.0	3.962	6.500	2.320		4.520	-9.999	99.99	1.000	0.010	0.0	9.999	0.0	4.520	-3.920	0.0	0.0
GB-13.8	0	1	0.0	3.962	6.500	2.320		4.520	-9.999	99.99	1.000	0.010	0.0	9.999	0.0	4.520	-3.920	0.0	0.0

REG.AUT.TENSAO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

* NOTA : QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL OMITIDO DOS DADOS *
* DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NOS *
* PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *
* UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *
* 9999. *

Eletronorte



MODELO DO REGULADOR DE TENSÃO UTILIZADO

DADOS DOS COMPENSADORES ESTATICOS COM MODELO GENERICO

BARRA DO CE.	NUM CE.	BARRA CONT.	SUSC. IN. (MVAR)	SUSC. MAX (MVAR)	SUSC. MIN (MVAR)	K (P.U)	T (SEG)	K1 (P.U)	T1 (SEG)	T2 (SEG)
C-13.8	1	C-230	91.0000	300.0000	-200.0000	90.0000	0.0500	1.0000	2.0000	2.8000
D-13.8	1	D-230	100.0000	600.0000	-400.0000	150.0000	0.0500	1.0000	2.0000	2.8000

CARGAS SHUNT

BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS
A-550	1000.00000	0.0
C-230	100.00000	0.0
D-230	200.00000	0.0
B-550	3000.00000	0.0

SISTEMA 1 CASO NO. 1

MAQ. REF.= NO. 1 NA BARRA GA-13.8
STEP DE INTEGRACAO (SEG) = 0.005000
DURACAC DO ESTUDO (SEG) = 2.000000
INTERVALC DE IMPRESSAO (SEG) = 0.005000
ANGULO LIMITE DA MAQ.SINC. = 99999.GRAUS

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVEAMENTO

TEMPO CHAVEAMENTO	CHAVEAMENTO IN/CUT	BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	RESISTENCIA P.U.	REATANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.
0.0	CUT	GA-13.8	A-550	0.0	0.00343	0.0	0.0
0.0	IN	GA-13.8	A-550	0.0	0.00343	0.0	0.0
0.0500	CUT	A-550	*	0.0	2.00000		
0.0500	IN	A-550	*	0.0	0.00010		
0.1200	CUT	A-550	*	0.0	0.00010		
0.1200	IN	A-550	*	0.0	2.00000		
0.1200	CUT	A-550	C-550	0.00184	0.02370	2.76795	0.0

CONDICOES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NOME DA BARRA	MAQ NO.	ANG. ROTOR GRAUS	ESCORREG. ROTOR P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAIDA ATIVA MW	POT. DE SAIDA REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSAO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
GA-13.8	0	21.65	0.0	3126.300	3126.236	520.108	1.025	30.920	1.313	1.313	60.000
GB-13.8	0	-29.46	0.0	1300.000	1299.995	567.779	1.000	14.187	1.420	1.420	60.000

DADOS DOS COMPENSADORES ESTATICOS NO INST. INICIAL

BARRA DO C.E	BARRA CONT.	NUMERO DO CE	SUSCEPTANCIA INICIAL (P.U)
C-13.8	C-230	1	0.790391
D-13.8	D-230	1	0.930104

FREQUENCIA DA BARRA DO GERADOR
BARRA (GA-13.8) FREQUENCIA =60.000HZ
BARRA (GB-13.8) FREQUENCIA =60.000HZ.

********** FREQUENCIA DO SISTEMA=60.000HZ **********

TAXA DE MUDANCA= 0.0

TENSAO NAS BARRAS

BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO
GA-13.8	1.025	-0.00	A-550	1.013	-5.93	C-550	0.975	-20.47	C-230	1.020	-22.39
C-13.8	1.073	-22.39	D-550	0.962	-34.87	D-230	1.010	-37.82	D-13.8	1.040	-37.82
B-550	0.962	-54.32	GB-13.8	1.000	-48.50						

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00343 P.U.FOI DESLIGADA , ENTRE AS BARRAS GA-13.8 E A-550 AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00343P.U. FOI LIGADA ENTRE A BARRAS GA-13.8 E A-550 AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

SHUNT DE IMPEDANCIA 0.0 +J 2.00000 P.U. FOI REMOVIDO DA BARRA A-550 AO TEMPO DE 0.0500 SEGUNDOS

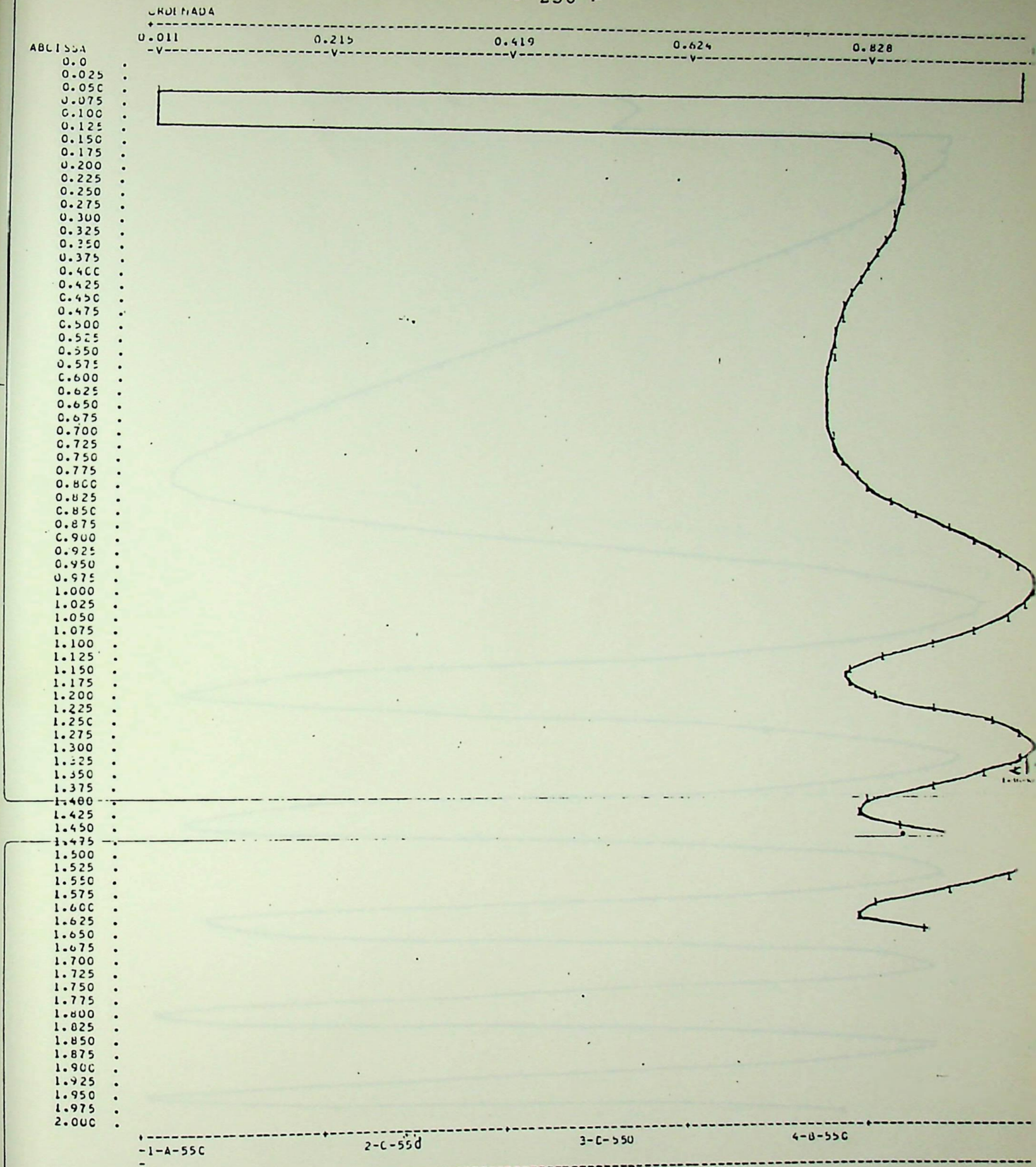
SHUNT DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00010 P.U. FOI APLICADO A BARRA A-550 AO TEMPO DE 0.0500 SEGUNDOS

SHUNT DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00010 P.U. FOI REMOVIDO DA BARRA A-550 AO TEMPO DE 0.1200 SEGUNDOS

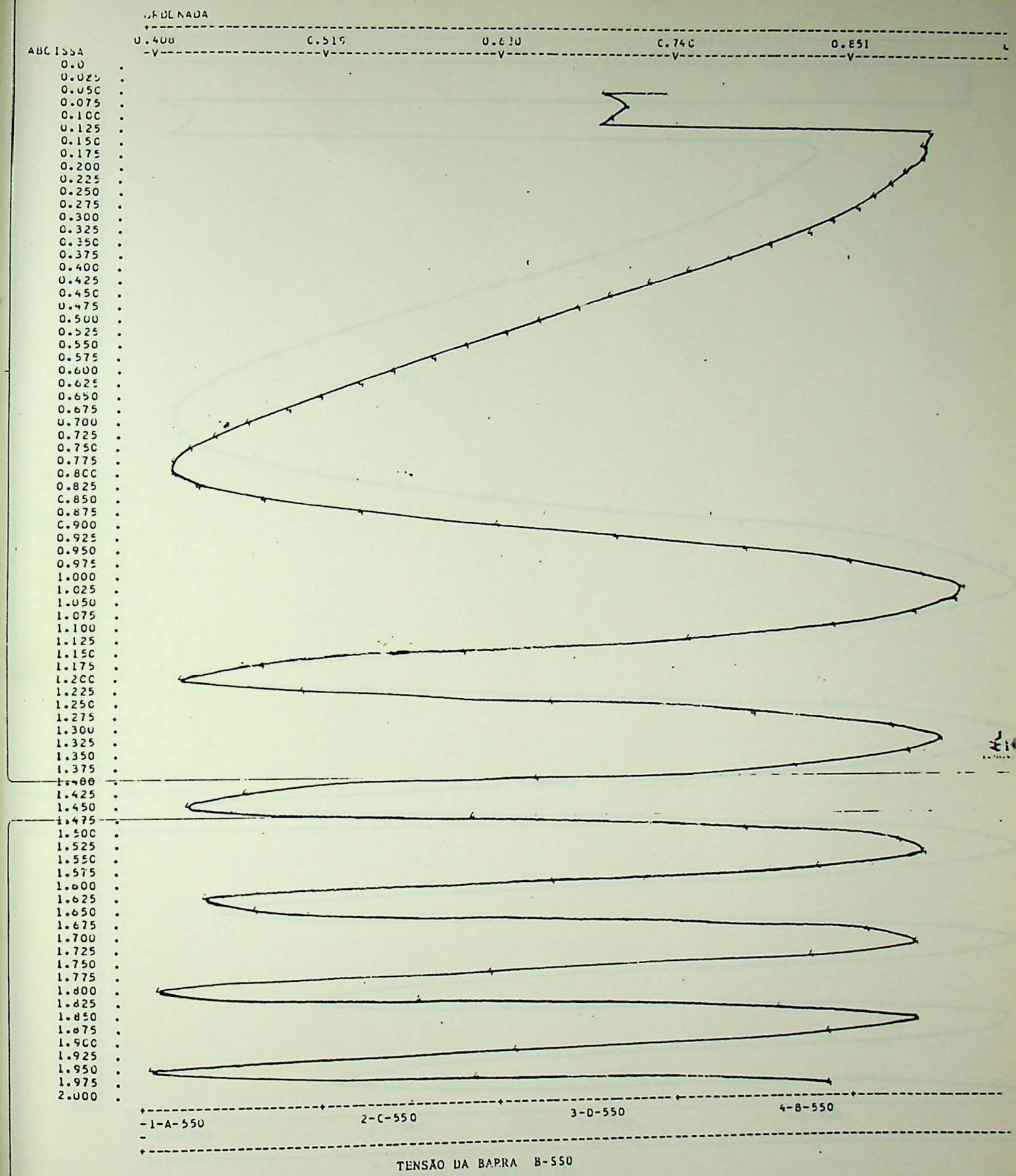
SHUNT DE IMPEDANCIA 0.0 +J 2.00000 P.U. FOI APLICADO A BARRA A-550 AO TEMPO DE 0.1200 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.00184 +J 0.02370 P.U.FOI DESLIGADA , ENTRE AS BARRAS A-550 E C-550 AO TEMPO DE 0.1200 SEGUNDOS

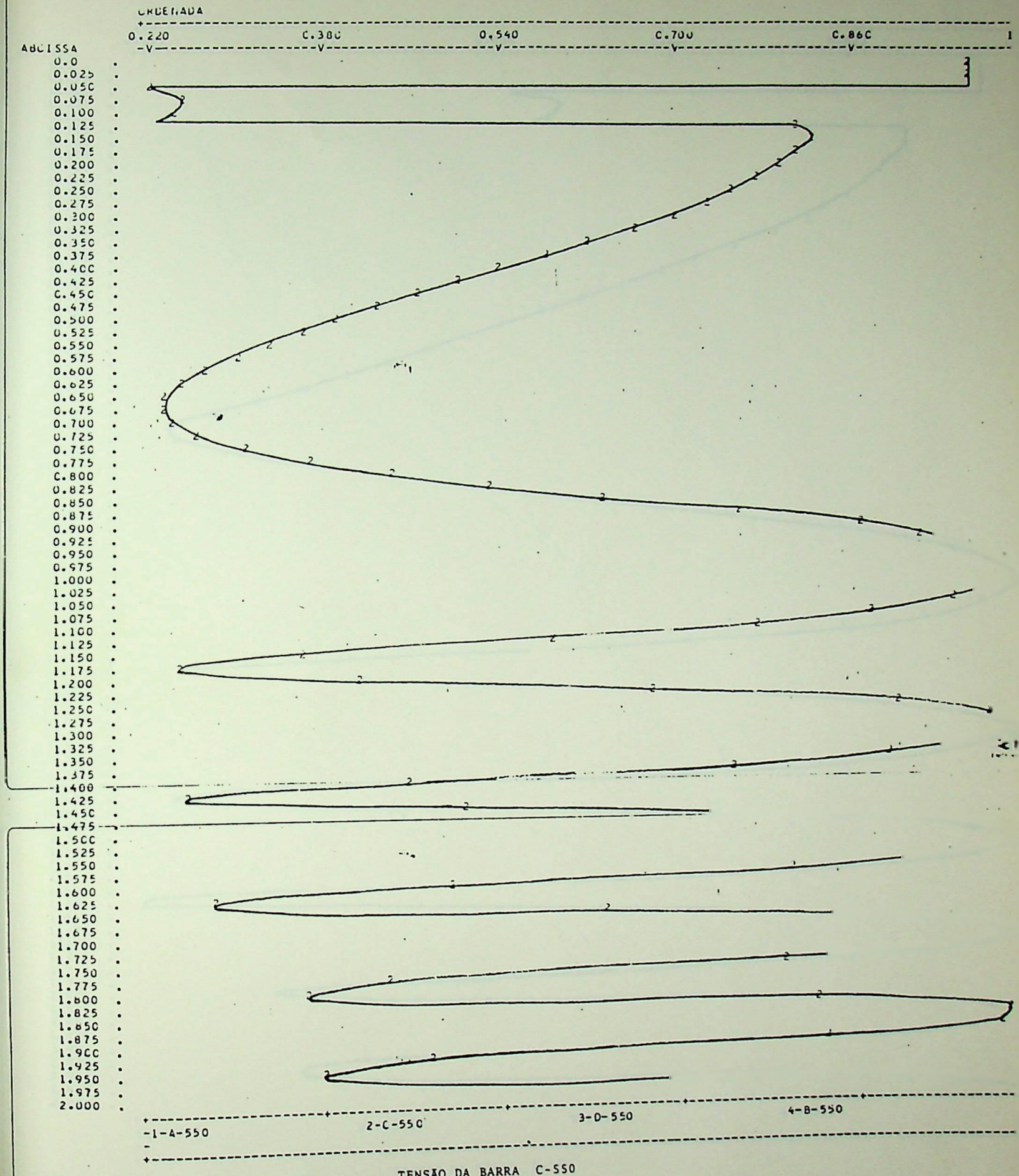
FINAL DO CASO



TENSÃO DA BARRA A-550

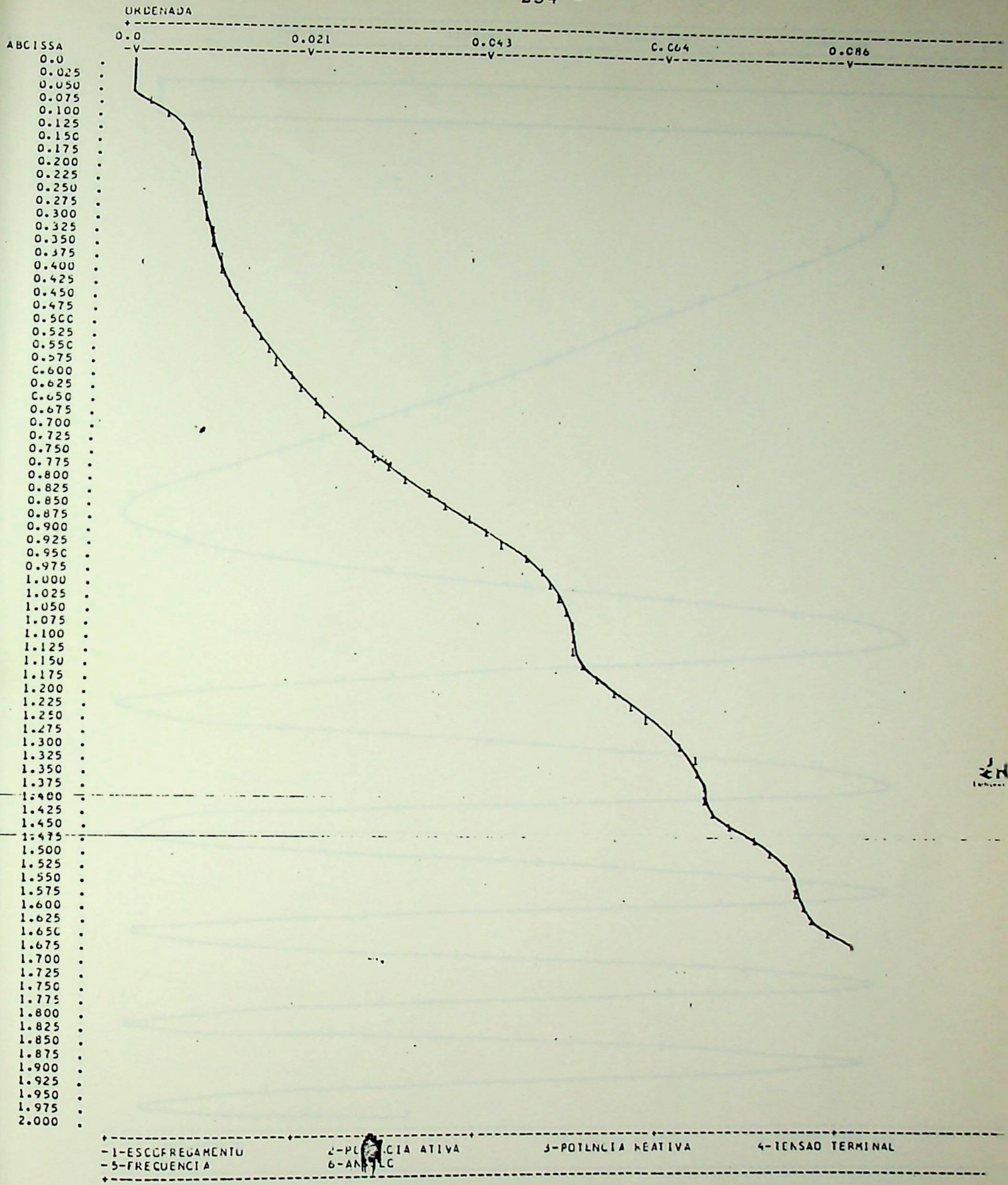


TENSÃO DA BARRA B-550

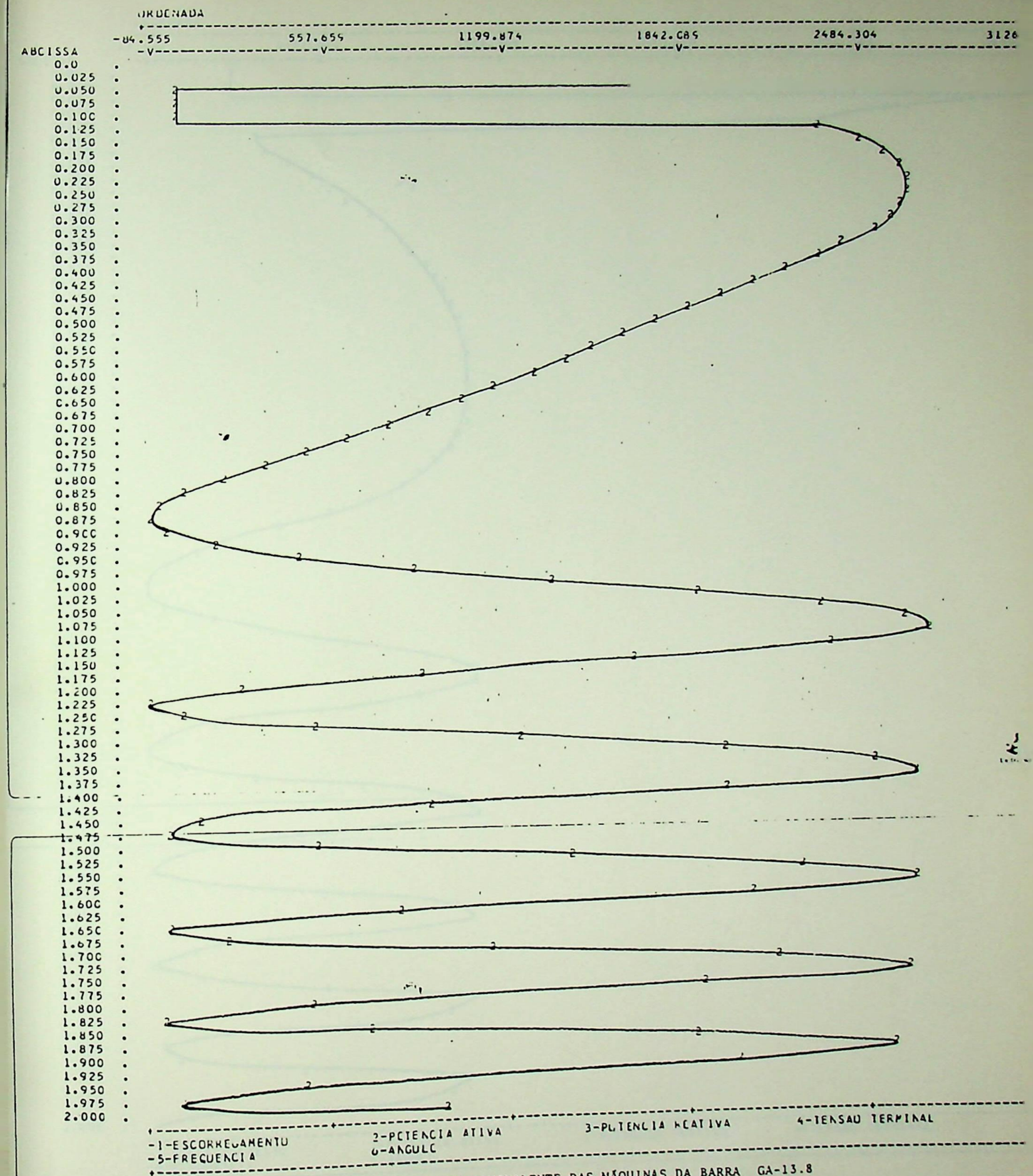


TENSÃO DA BARRA C-550

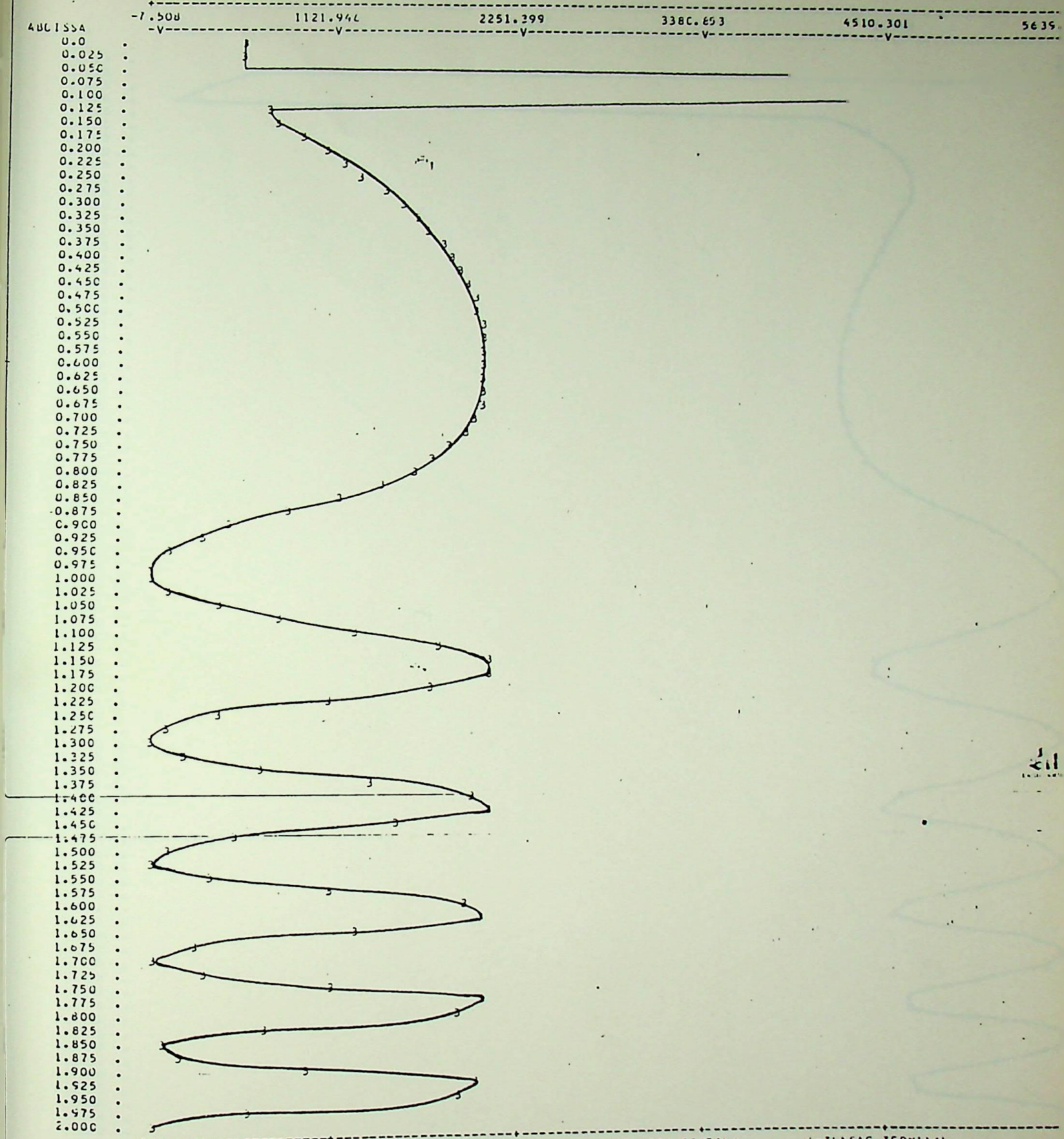
TENSÃO DA BARRA D-550



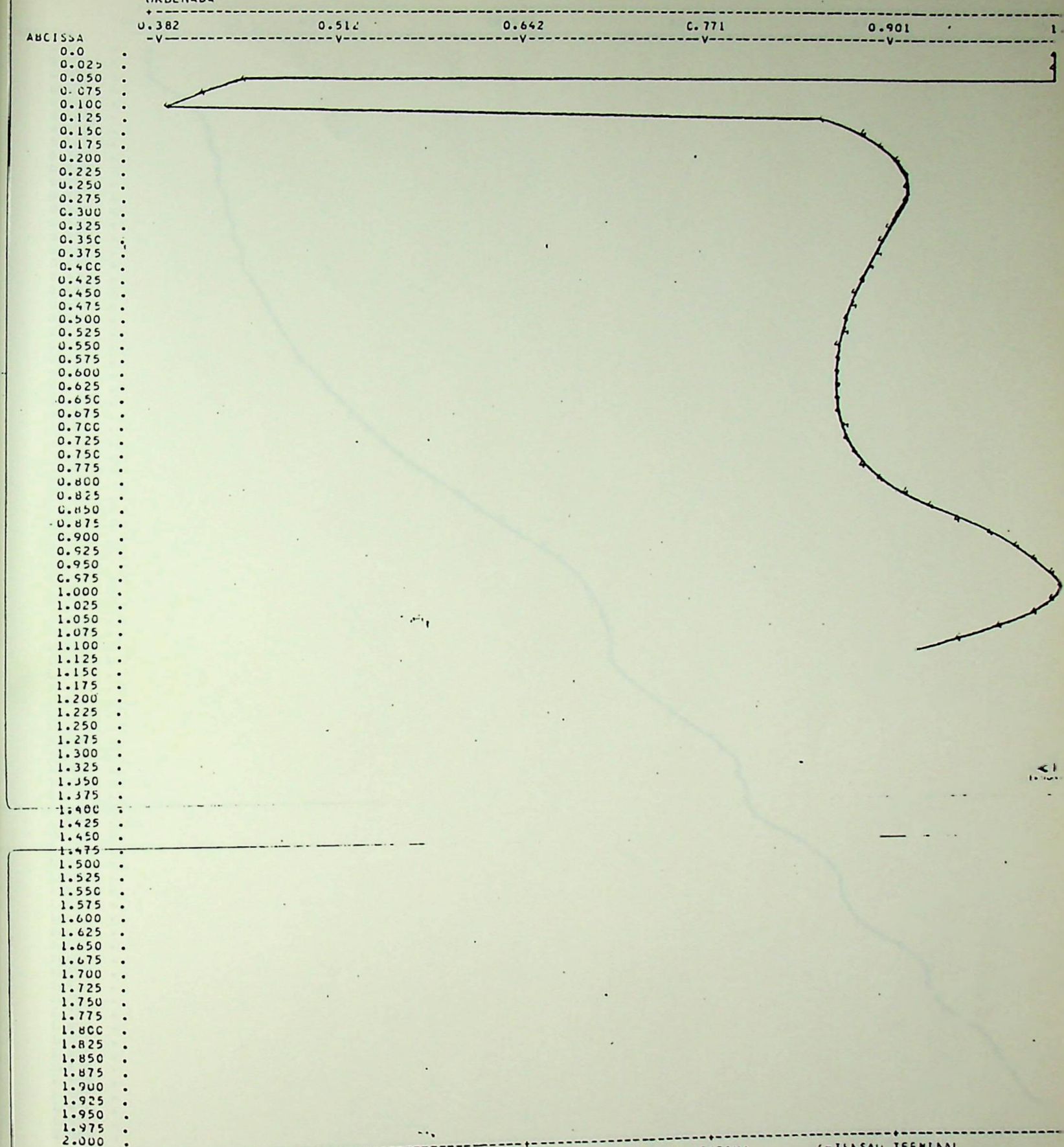
ESCORREGAMENTO DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GA-13.8



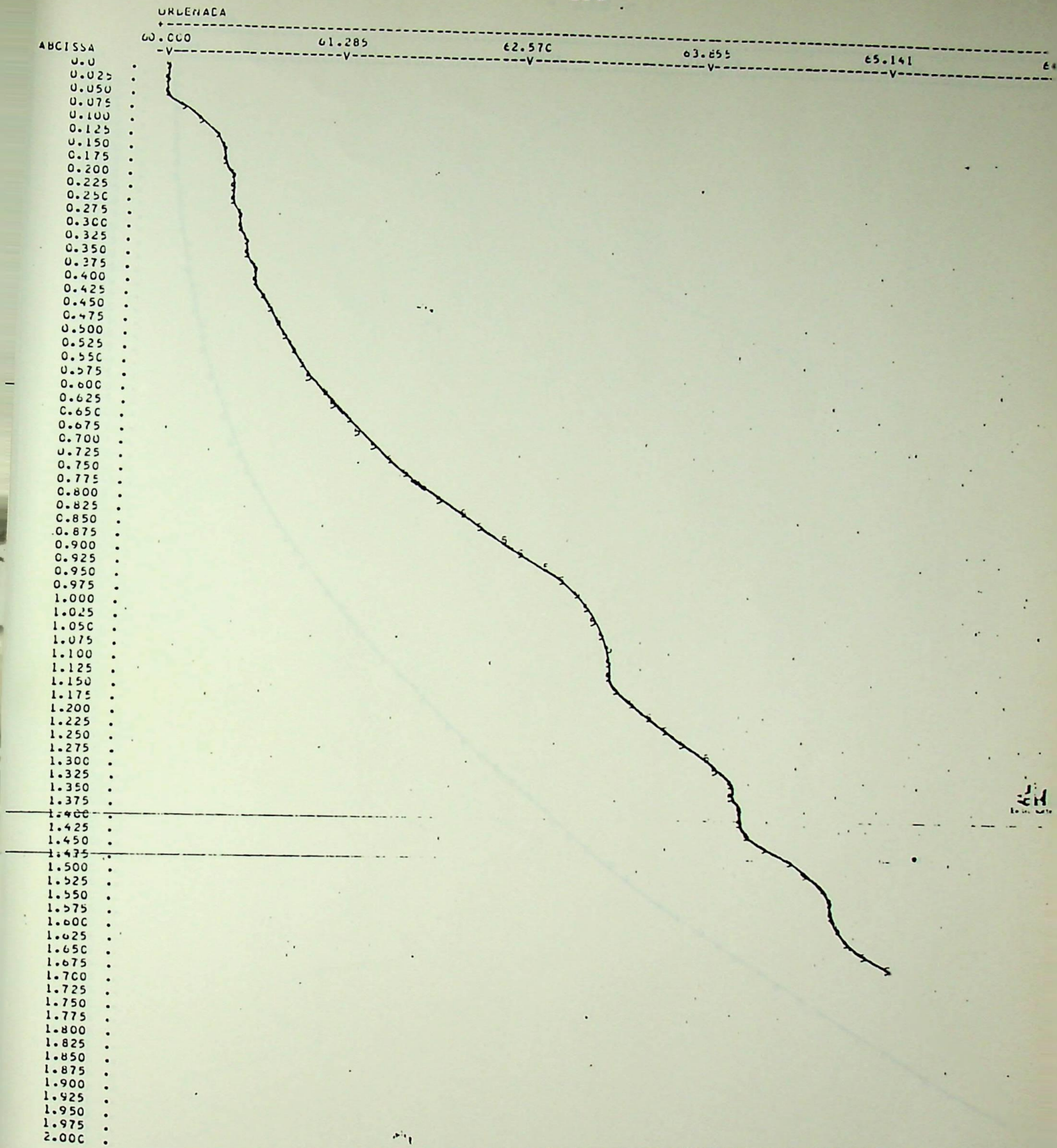
POTENCIA ELÉTRICA DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GA-13.8



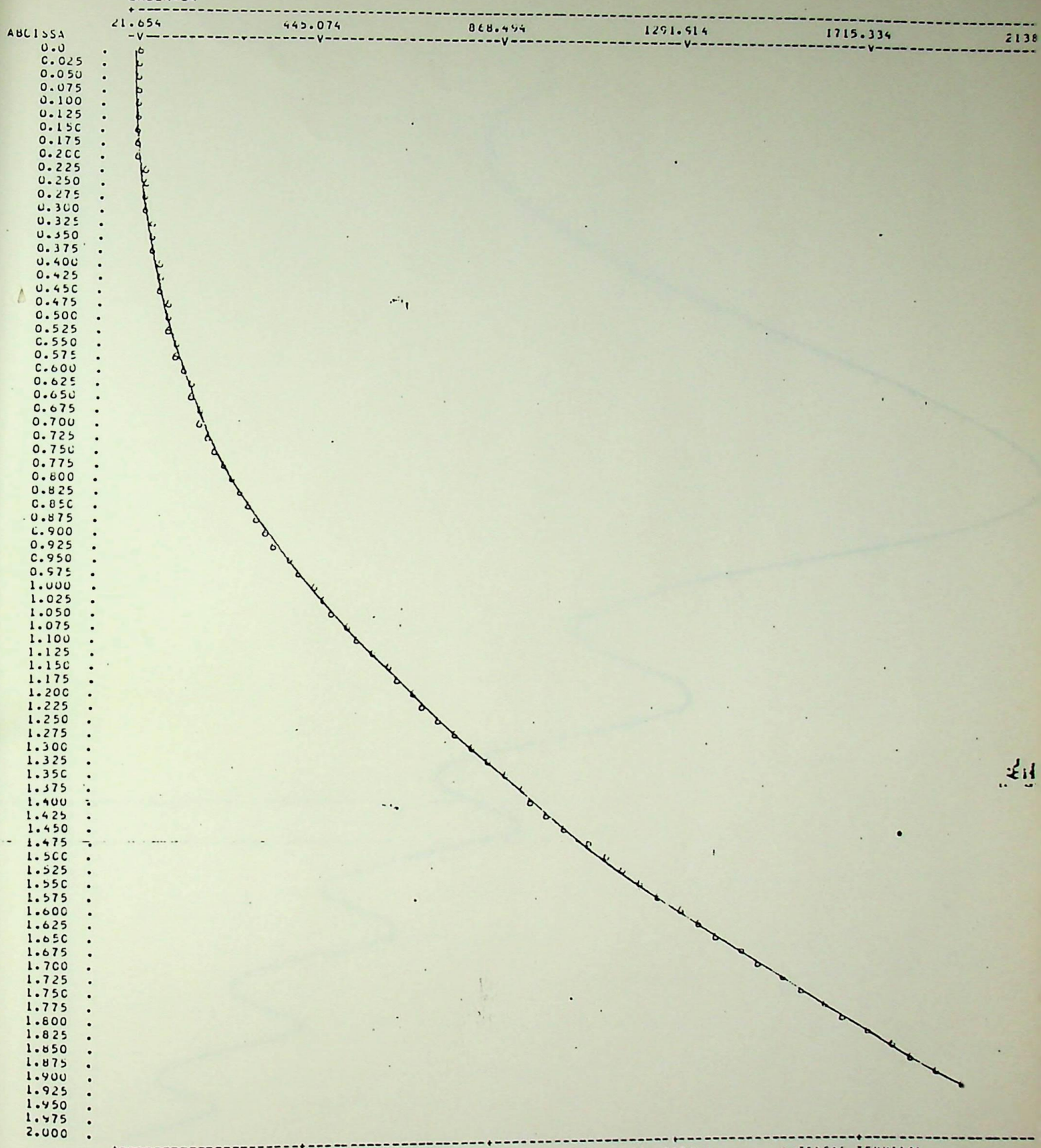
POTENCIA REATIVA DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GA-13.8



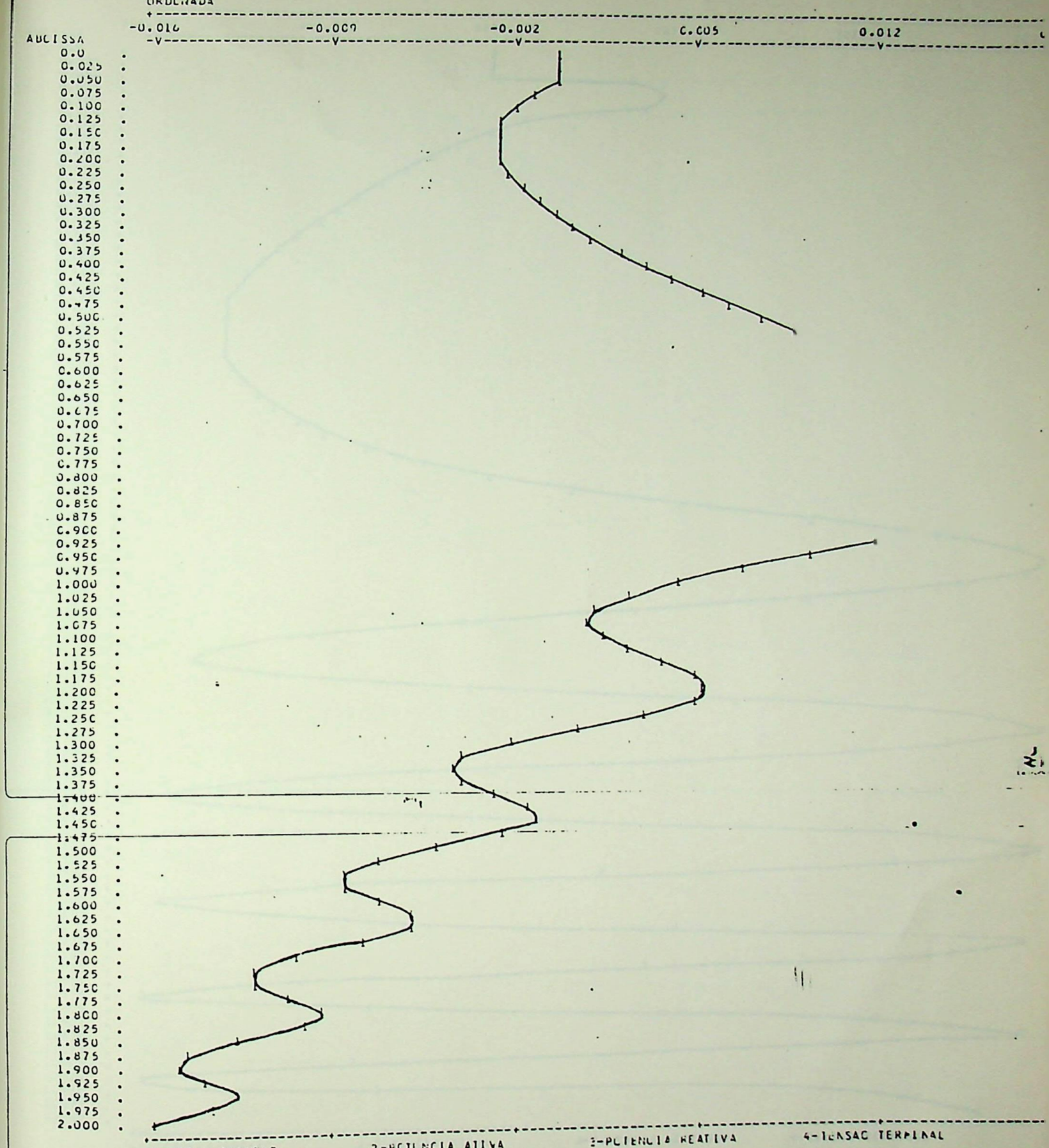
TENSÃO TERMINAL DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GA-13.8



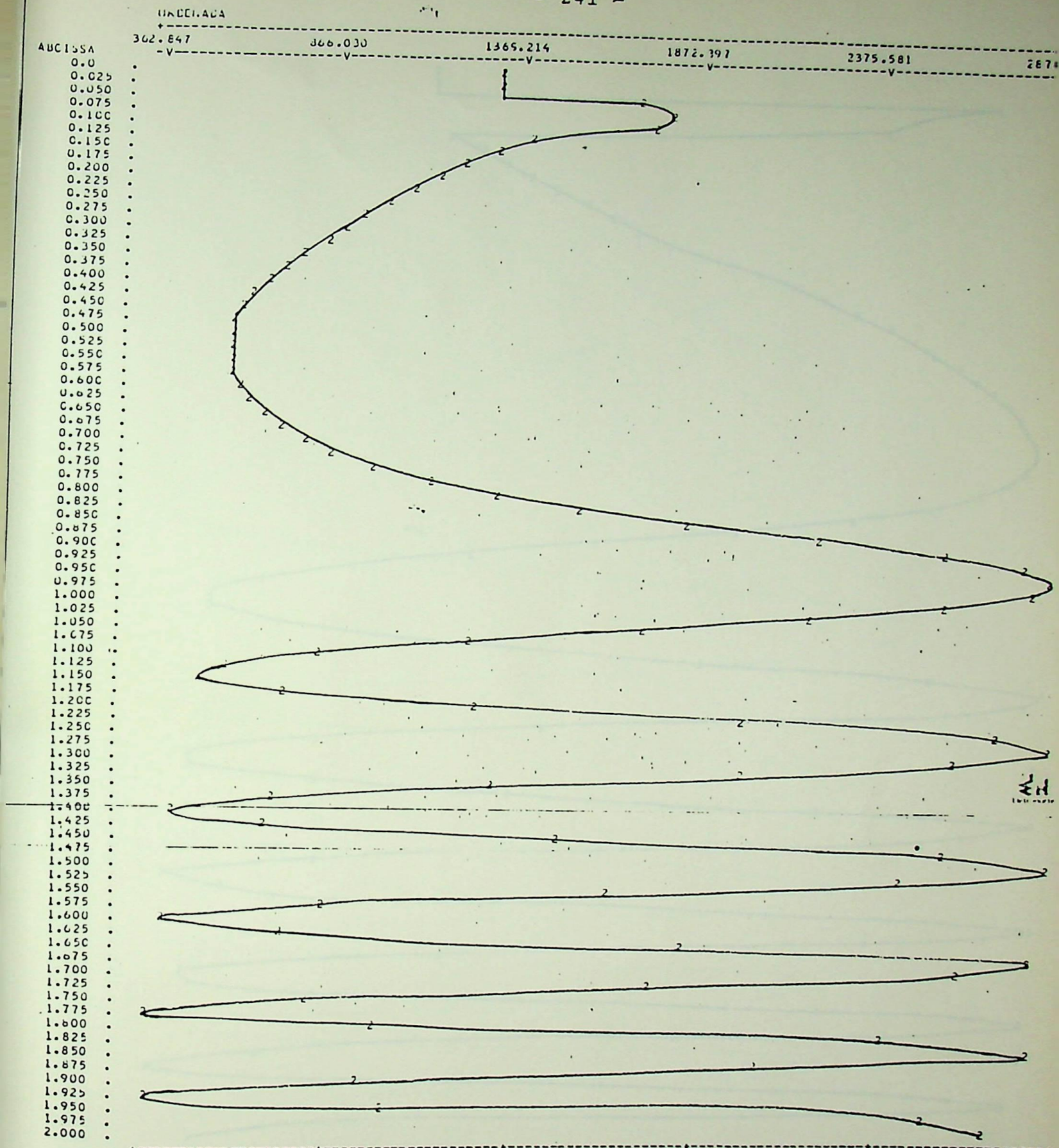
FREQÜÊNCIA DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GA-13.8



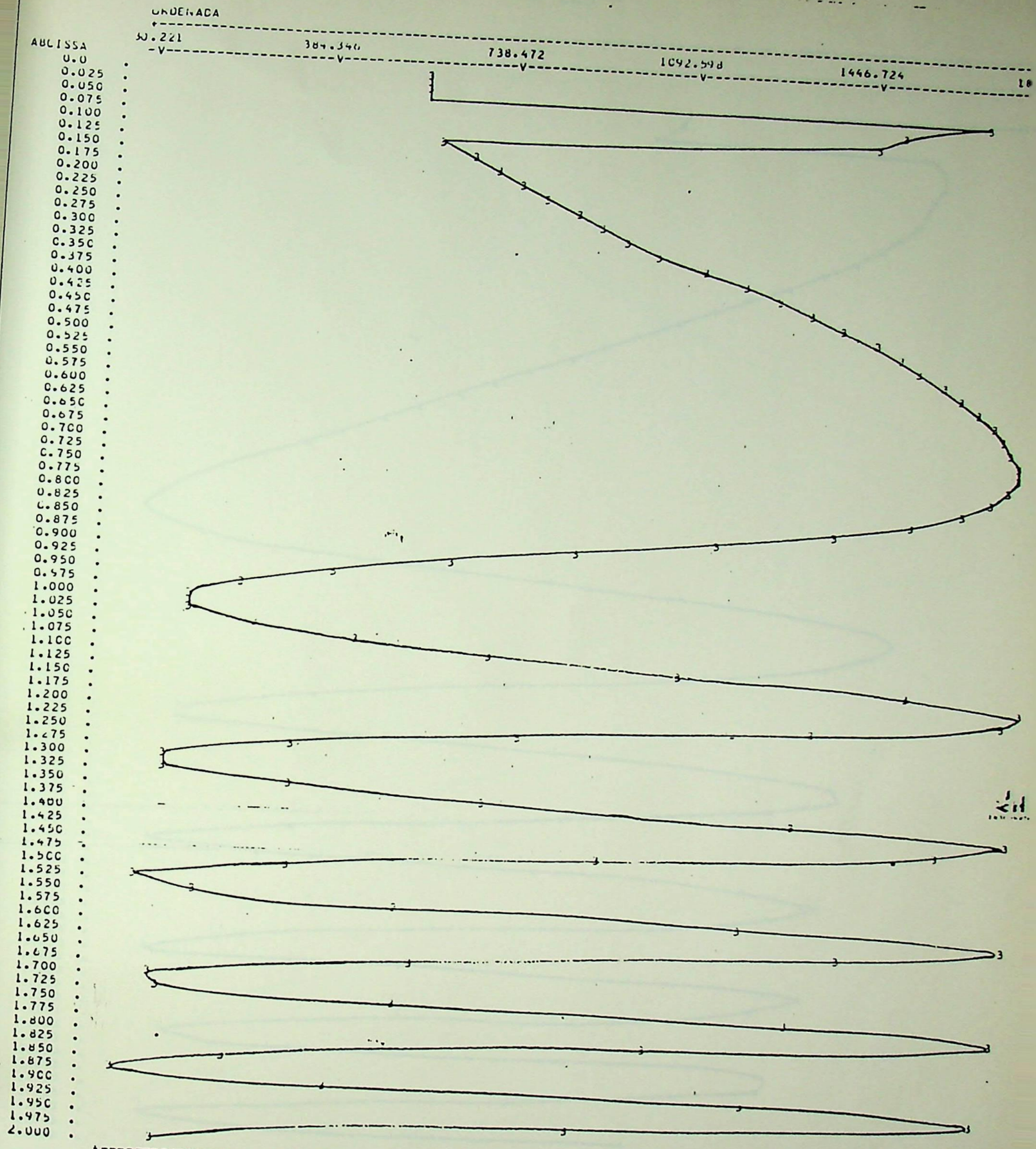
ÂNGULO DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GB-13.8



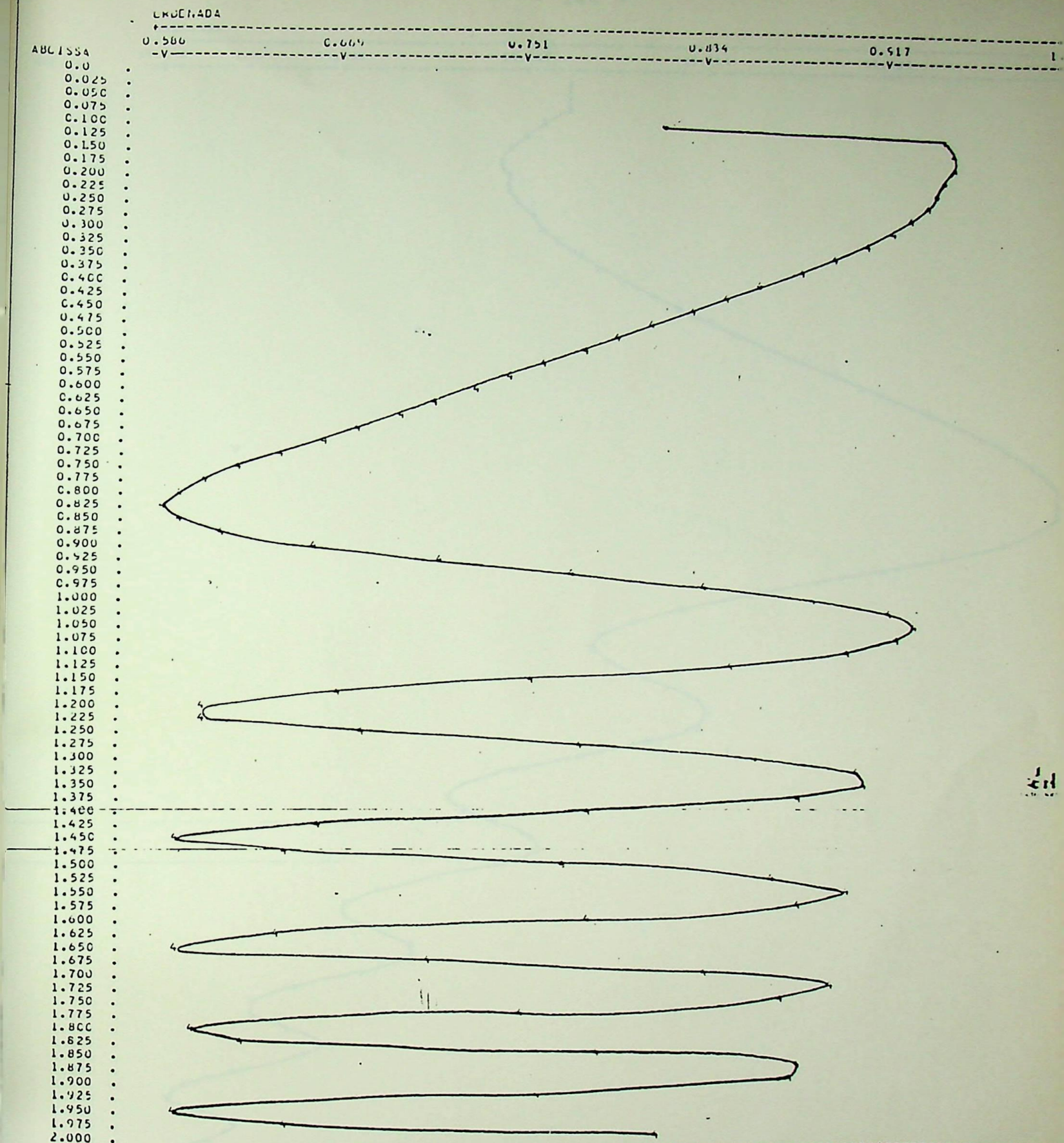
ESCORREGAMENTO DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GB-13.8



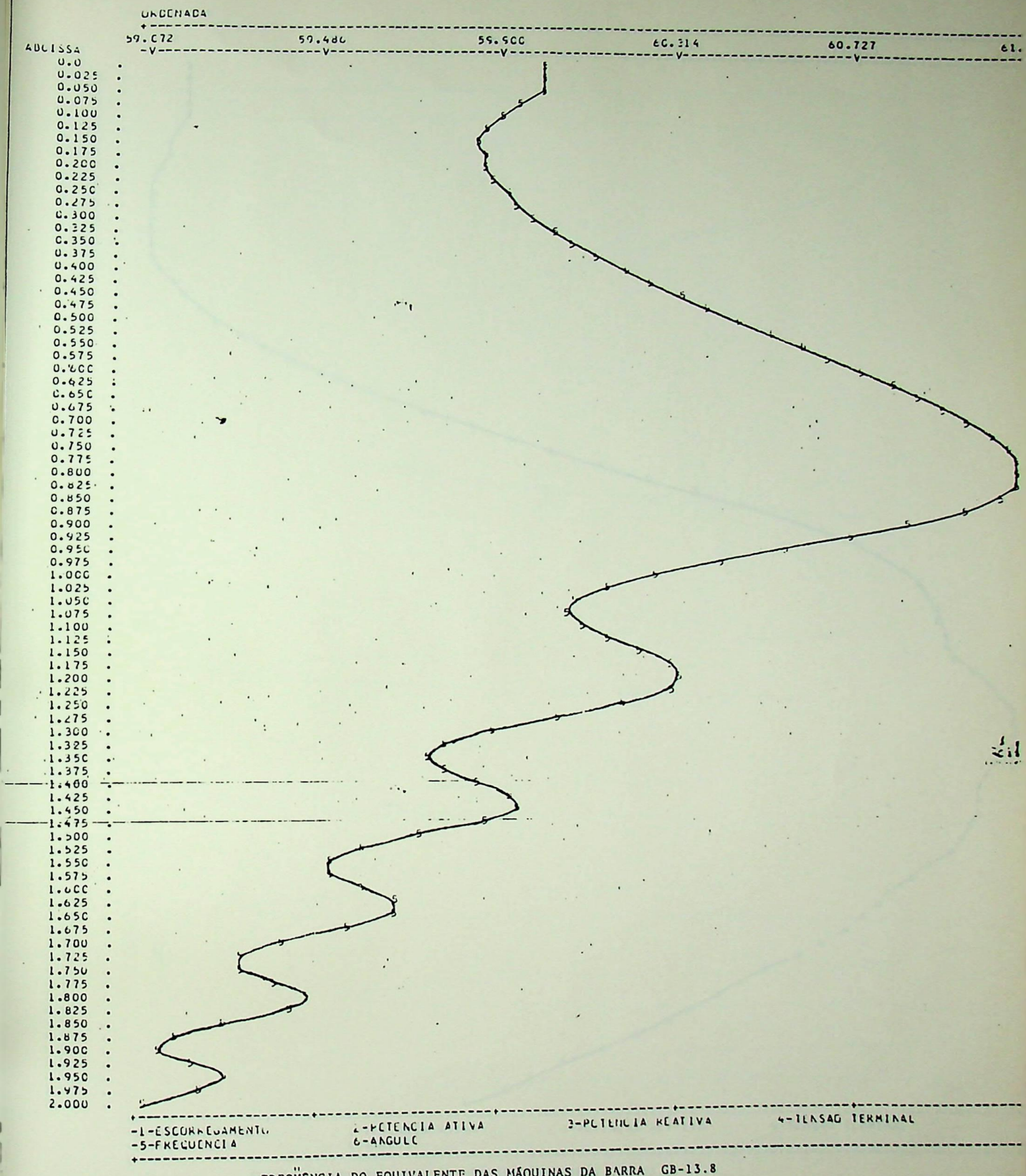
POTÊNCIA ELÉTRICA DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GB-13.8



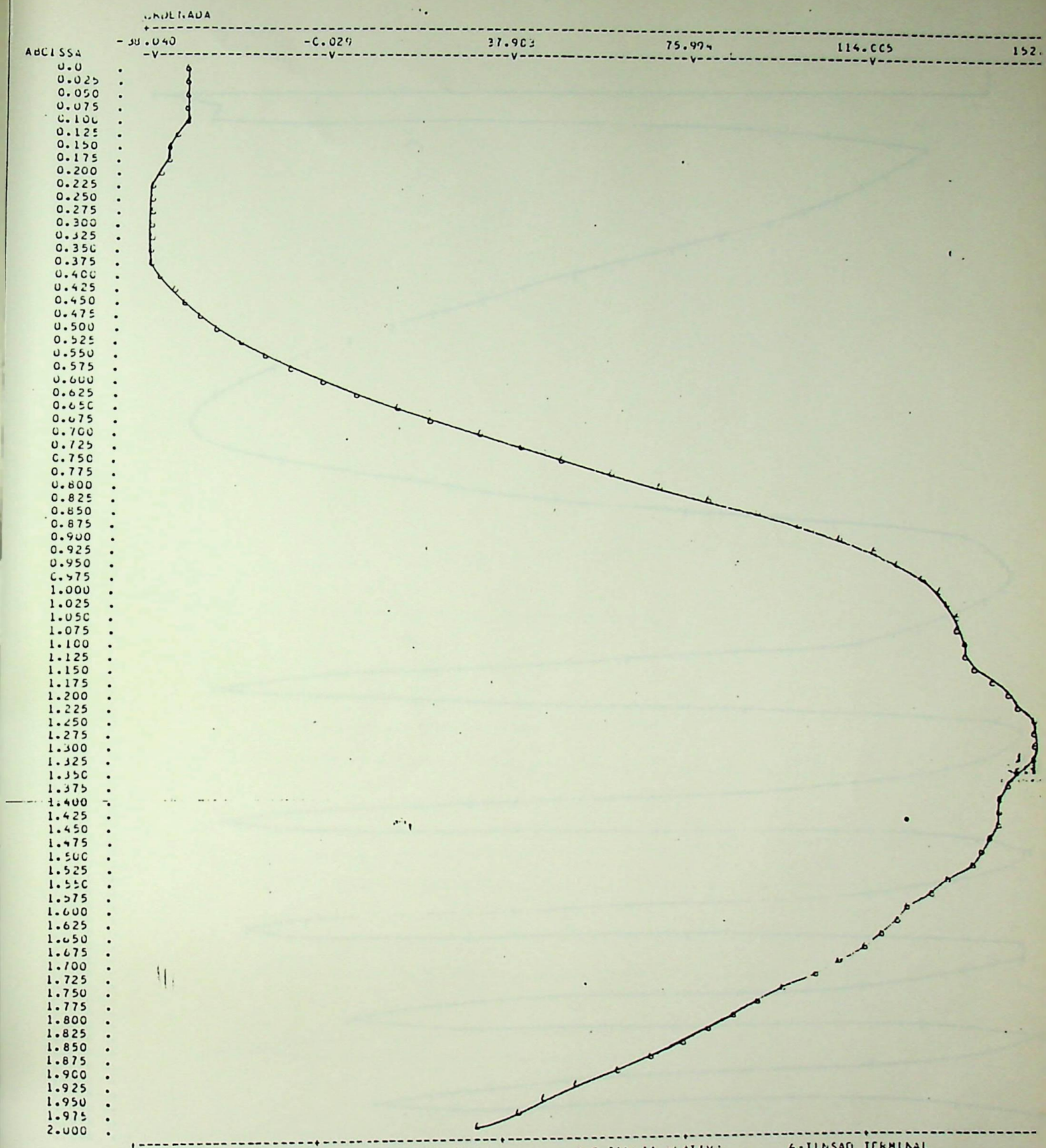
POTÊNCIA REATIVA EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GB-13.8



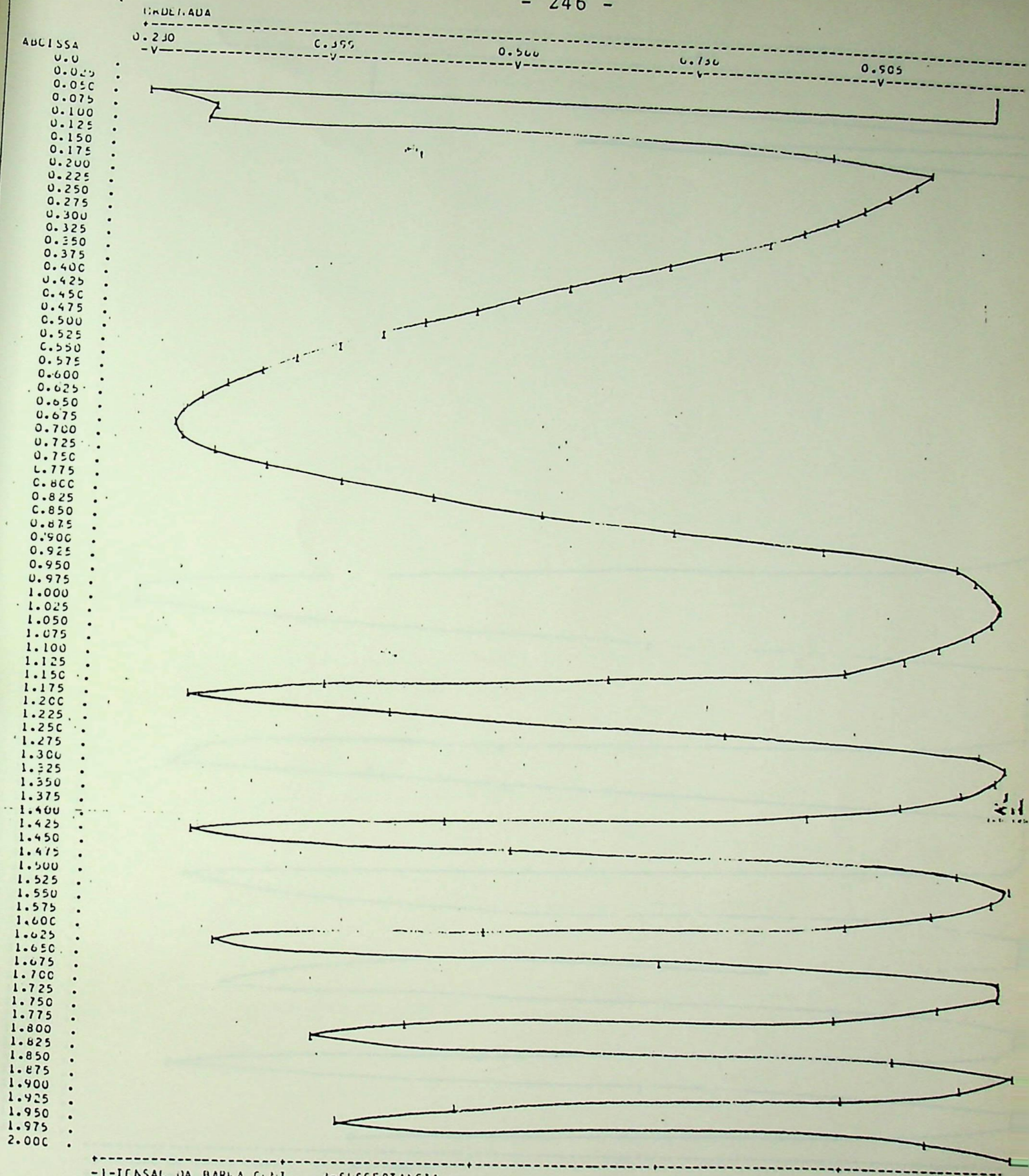
TENSÃO TERMINAL DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GB-13.8



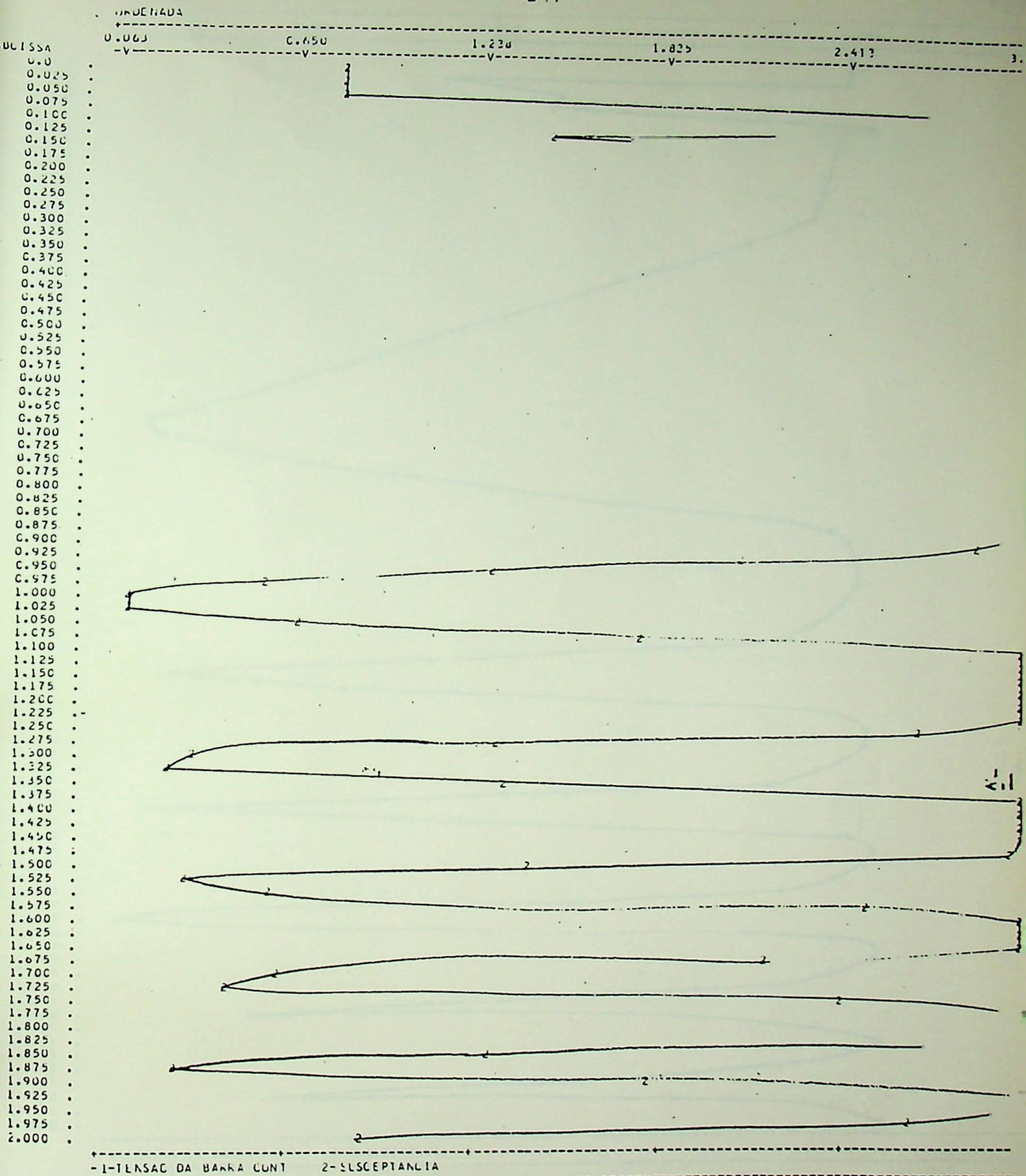
FREQUÊNCIA DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GB-13.8



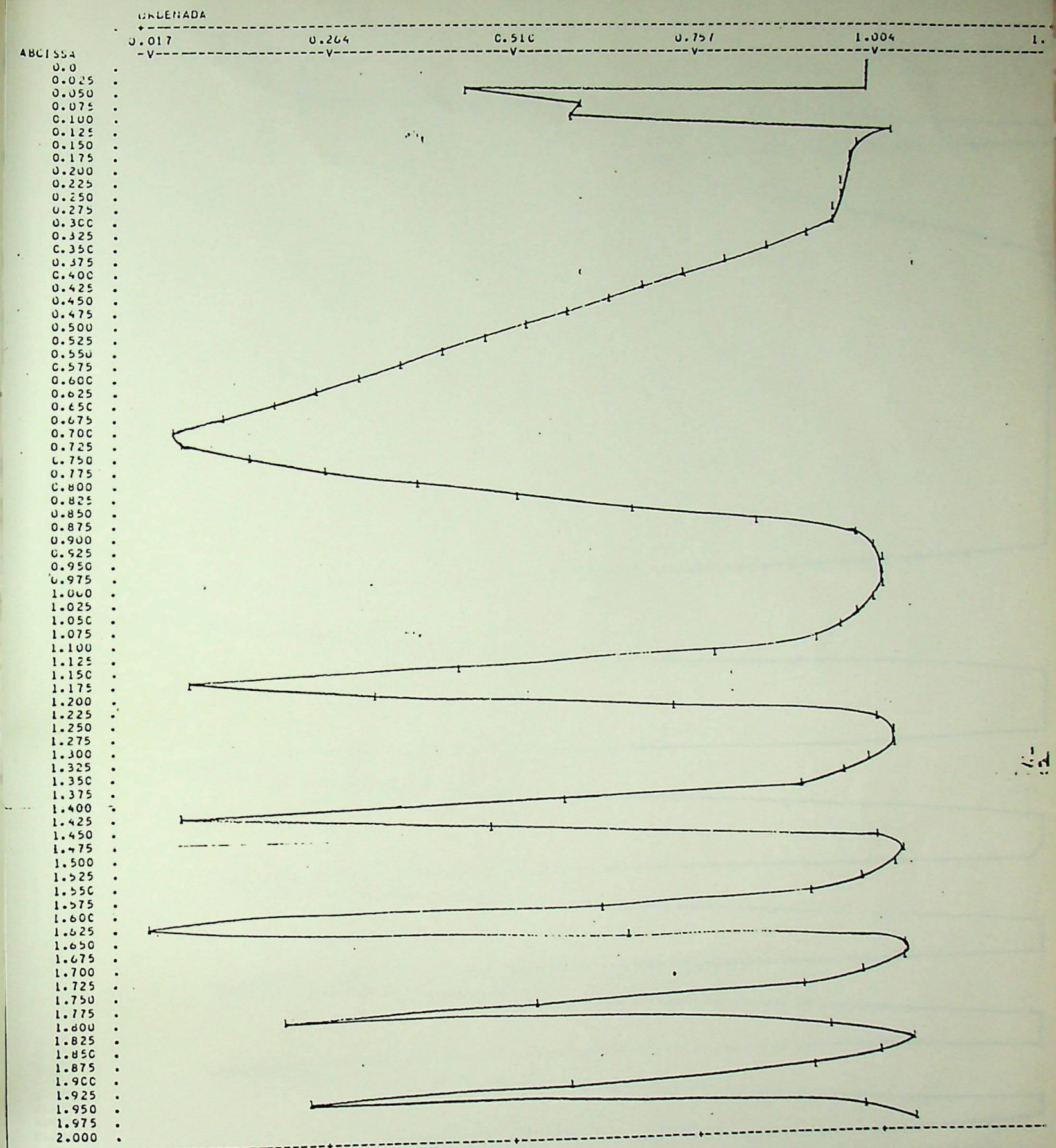
ÂNGULO DO EQUIVALENTE DAS MÁQUINAS DA BARRA GB-13.8



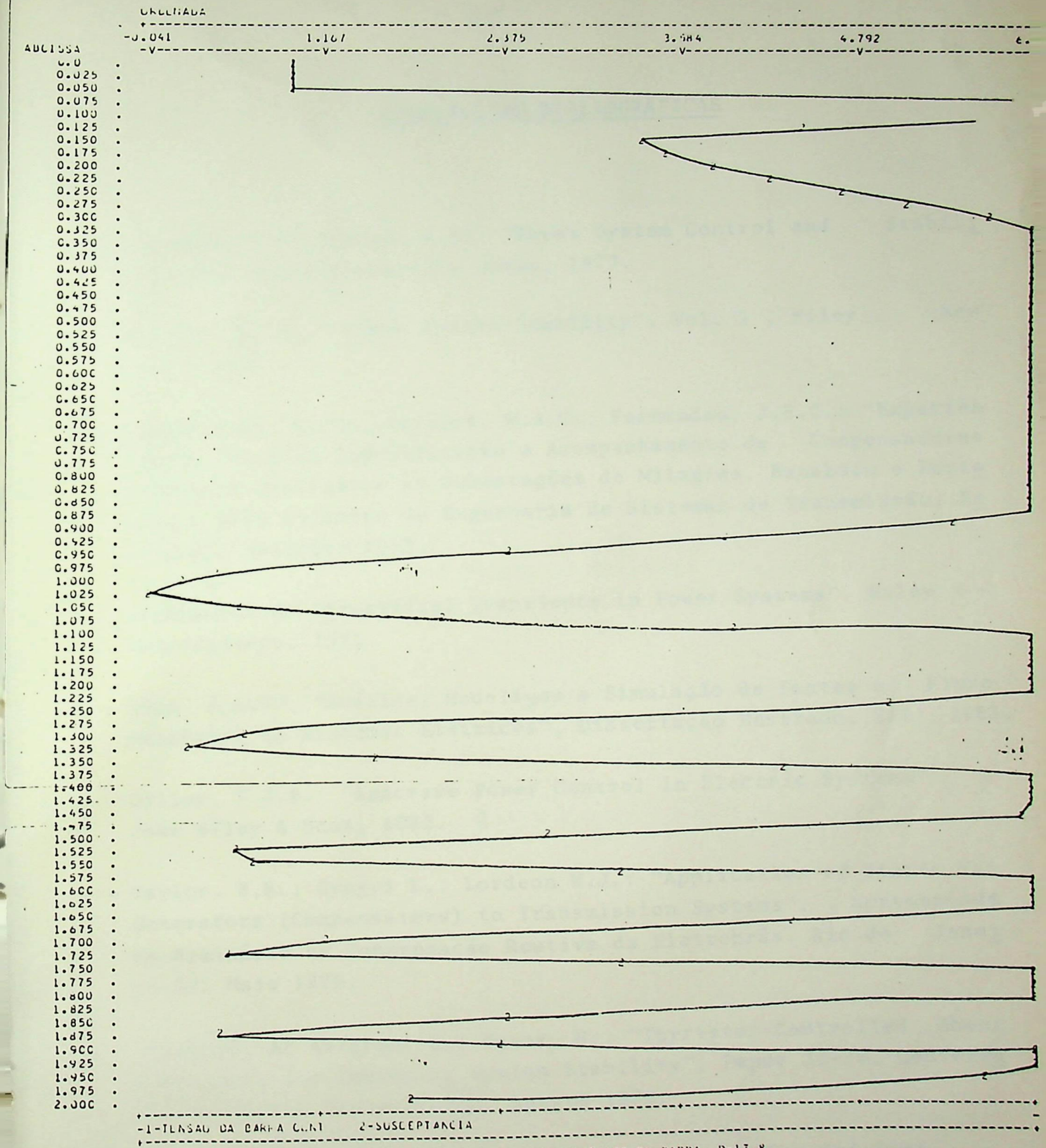
TENSÃO DA BARRA C-230 , CONTROLADA PELO COMPENSADOR ESTÁTICO DA BARRA C-13.8



SUSCEPTÂNCIA LÍQUIDA DO COMPENSADOR ESTÁTICO DA BARRA C-13.8



TENSÃO DA BARRA D-230 , CONTROLADA PELO COMPENSADOR ESTÁTICO DA BARRA D-13.8



SUSCEPTÂNCIA LÍQUIDA DO COMPENSADOR ESTÁTICO DA BARRA D-13.8

FINAL DO ESTUDO DE SIS. N.

FIM

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - Anderson, P.M.; Fouad, A.A.: "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, 1977.

2 - Kimbark, E. W.: "Power System Stability", Vol. 1 , Wiley , New York , 1948 .

3 - Vasconcelos, A. N., Pereira, M.A.C., Fernandes, J.E.C.: "Experiência da Chesf na Especificação e Acompanhamento de Compensadores Estáticos destinados às Subestações de Milagres, Banabuiu e Fortaleza", XIII Encontro de Engenharia de Sistemas de Transmissão, Recife-PE, Setembro 1983.

4 - Greenwood, A: "Electrical Transients in Power Systems", Wiley - Interscience, 1971.

5 - Góes, N.L.V.: "Análise, Modelagem e Simulação de Fontes e Fluxo Harmônico em Sistemas Elétricos", Dissertação Mestrado, EFEI, 1981.

6 - Miller, T.J.E.: "Reactive Power Control in Electric Systems" , John Wiley & Sons, 1982.

7 - Taylor, E.R.; Gyugyi L.; Lordeon W.J.: "Application of Static Var Generators (Compensators) to Transmission Systems", apresentado no Seminário de Compensação Reativa da Eletrobrás, Rio de Janeiro-RJ, Maio 1979.

8 - Olwegard, A; Ahlgren, L.; Frank, H.: "Thyristor-Controlled Shunt Capacitors for Improving System Stability", Paper 32-20, Conferência do Cigrè, Paris-França, Agosto 1976.

9 - Slemon, G.R.: "Magnetoelectric Devices", John Wiley and Sons , 1966.

10 - Cigre Working Group 31.01 - "Modeling of Static Var Systems (SVS) for System Analysis", Electra, Vol. Nº 51, Março 1977.

11 - Stagg G.W.; El-Abiad, A.H.: "Computer Methods in Power System Analysis"; McGraw-Hill, 1968.

12 - Vasconcelos, A.N.; Fonseca, L.C.A.; Lima, M.V.B.C.: "Correntes Harmônicas geradas por Compensadores Estáticos", apresentado no VII SNPTEE, Brasília-DF, Dezembro 1984.

13 - GCOI: "Critérios e Metodologias para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais", Relatório SCEL-GTEE-03/84, Julho 1984.

14 - Bélanger, J.; Dias, L.E.N.; Moraes, S.A.; Frontin, S.O.: "Application of a Static Var System on The Furnas 138 kV Transmission Network in Brazil", IREQ, 1979.

15 - Hauth, R.L.; Moran, R.J.: "The Performance of Thyristor-Controlled Static Var Systems in HVAC Applications, Part II - Performance Modeling Concepts", apresentado no Tutorial Course on Power Electronics Applications in Power Systems - IEEE Summer Power Meeting, 1978.

16 - Schweickardt, H.E.: "Static Var Sources, Their Alternatives and Uses in Transmission Systems", apresentado no EPRI Seminar , Duluth-Minnesota, Outubro 1978.

17 - ASEA: "Description of Regulator Function Units", NR 500025E , Agosto 1981.

18 - Hochstetter, W.: "Properties of Static Compensators of Power Supply Systems", Siemens Review, Agosto 1977.

19 - GCPS: "Suprimento ao Mato Grosso - Estudos de Estabilidade Transitória - Período 1989/1993", Relatório GCPS/N-NE/CTST/GTSC/RF . 007.84, Julho 1984.

20 - Hauth, R.L.; Humann, T.; Newell, R.J.: "Application of a Static Var System to Regulate System Voltage in Western Nebraska" , IEEE Trans., Vol. Pas - 97, Nº 5, Setembro/Outubro 1978.

1 - Drummond M.A.G.: "Modelagem de Reatores Controlados por Tiristores para Simulação de Transitórios Eletromagnéticos no Programa EMTP", Dissertação Mestrado, PUC-RJ, 1982.

22 - Arnold, C.P.: "A New Electrical Power-System Transient-Stability Programme", Dissertação M. Sc., UMIST, 1970.

23 - Arnold, C.P.: "Solution of Multi-Machine Power System Stability Problem", Tese Ph.D., UMIST, 1976.

24 - Shin, C.G.: "Simulação Digital para Estudos de Estabilidade Transitória e Rejeição de Carga em Sistemas Elétricos de Potência", Dissertação Mestrado, EFEI, 1981.

25 - Gardino, Mário: "Determinação das Sobretensões à Freqüência Industrial durante a Energização de Linhas de Transmissão", Dissertação Mestrado, PUC-RJ, 1975.

26 - Ogata, R.: "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, 1970.

27 - Santos, J.A.R.: "Mini-Calculadoras Eletrônicas", Editora Edgard Blücher, 1979.

28 - Atkinson, K.E.: "An Introduction to Numerical Analysis", John Wiley & Sons, 1978.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

DATA 26/07/1985
PROC PPG
PED.
LIV
NCr$ Doação

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200432
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA