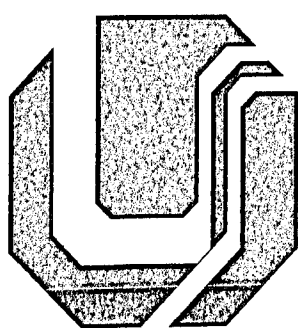


100  
5713  
5 1001  
TES/MEAI

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**DIRBI/UFU**



1000187004

**REATOR CONTROLADO A TIRISTORES: MODELAGEM**  
**PARA ANÁLISES SOB CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM**  
**REGIMES PERMANENTE E TRANSITÓRIO**

**Marcelo Fandi**

**Julho**

**1998**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**REATOR CONTROLADO A TIRISTORES: MODELAGEM PARA**  
**ANÁLISES SOB CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM REGIMES**  
**PERMANENTE E TRANSITÓRIO**

Dissertação apresentada por **Marcelo Fandi** à  
Universidade Federal de Uberlândia para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Elétrica aprovada  
em 10/07/98 pela Banca Examinadora:

Professor José Wilson Resende, PhD.(Orientador)

Professor Antônio César Baleeiro Alves, Dr. (UFG)

Professor Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.(UFU)



**REATOR CONTROLADO A TIRISTORES: MODELAGEM PARA  
ANÁLISES SOB CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM REGIMES  
PERMANENTE E TRANSITÓRIO**

**Marcelo Fandi**

Dissertação apresentada por **Marcelo Fandi** à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

---

Prof. José Wilson Resende, PhD  
(Orientador)

---

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD  
(Coordenador do curso de pós-graduação)

Aos meus pais Amim e Olga,  
à minha irmã Ana Cláudia,  
à minha querida esposa Juliane e  
às minhas filhas Natália e Isabela.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e conforto em todos os momentos difíceis da vida.

Ao professor José Wilson Resende meu sincero agradecimento pela orientação segura, paciência, atenção, e sobretudo, por ampliar as minhas perspectivas profissionais direcionadas à Engenharia Elétrica.

Ao professor José Carlos de Oliveira, pelo constante incentivo e motivação no prosseguimento dos estudos.

À ELETRONORTE, nas pessoas dos engenheiros Wilkens Geraldes Filho e Josias Matos de Araújo, pelo material bibliográfico enviado.

Aos meus pais, Amim Fandi e Olga Maria Fandi, pelo carinho, amor e dedicação com que me proporcionaram os estudos.

À minha esposa Juliane, pelo carinho, incentivo e inestimável colaboração em todas as etapas deste trabalho.

Aos colegas da pós-graduação: Olívio, Anderson, Rui e Francis pelas discussões e sugestões.

Aos demais amigos da pós-graduação.

À CAPES pela ajuda financeira recebida.

## RESUMO

Esta dissertação trata da modelagem de compensadores estáticos do tipo reator controlado a tiristores, no domínio do tempo. Inicialmente é mostrada a teoria de funcionamento desse compensador. Em seguida, a modelagem e a implementação computacional no simulador “SABER”, das diversas unidades componentes do equipamento é apresentada. O tratamento desenvolvido é trifásico. Finalmente, a qualidade da modelagem desenvolvida é analisada através de estudos de casos simulados computacionalmente. Os resultados obtidos são, então, comparados com medições efetuadas.

## ABSTRACT

This work deals with the modelling of the thyristor controlled reactor (TCR) static compensator, in the time domain. Firstly, the TCR basic theory is introduced. The TCR modelling and computer implementation in the SABER simulator is then presented and discussed. Finally, the modelling performance is discussed through digital computer simulations. The corresponding results found are then compared to measurement oscillograms. Besides, the great flexibility of the SABER simulator is also illustrated along the work.

## SUMÁRIO

• <b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO GERAL</b>	01
1.1 - Aspectos gerais	01
1.2 - O estado da arte	02
1.3 - A motivação e a estrutura da dissertação	03
• <b>CAPÍTULO II - COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS DO TIPO REATOR CONTROLADO A TIRISTORES (RCT)</b>	06
2.1 - Considerações iniciais	06
2.2 - Princípio de funcionamento do RCT	07
2.3 - Características e desempenho de um RCT	28
2.4 - Reator controlado a tiristores com capacitores em paralelo	36
2.4.1 - Arranjo com capacitores fixos	36
2.4.2 - Arranjo com capacitores fixos e chaveados	38
2.5 - Considerações finais	44

<b>• CAPÍTULO III - MODELAGEM DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO DO TIPO RCT PARA SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS</b>	<b>45</b>
3.1 - Considerações iniciais	45
3.2 - Configuração do RCT a ser incorporado no Simulador "SABER"	46
3.3 - Modelagem	49
3.3.1 - Modelagem da unidade de potência	49
3.3.2 - Modelagem da unidade de medição	59
3.3.3 - Modelagem do sistema de controle do compensador estático	70
3.3.3.1 - Modelagem da unidade de controle	74
3.3.3.2 - Modelagem da unidade de distribuição dos pulsos de disparo	95
3.4 - Considerações finais	113
<b>• CAPÍTULO IV - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COM VISTAS À VALIDAÇÃO DA MODELAGEM</b>	<b>115</b>
4.1 - Considerações iniciais	115
4.2 - Descrição do sistema elétrico de suprimento ao estado de Mato Grosso em dezembro de 1990	116
4.2.1 - Descrição dos dados de entrada dos diversos componentes constituintes do sistema elétrico	119

4.3 - Comparação entre os resultados obtidos nas simulações computacionais com aqueles provenientes das medições de campo	122
4.3.1 - Caso A: Ensaio para avaliação de harmônicos	122
4.3.2 - Caso B: Ensaio de energização e desenergização do CCT	132
4.3.2.1 - Caso B1	133
4.3.2.2 - Caso B2	139
4.3.2.3 - Caso B3	143
4.4 - Considerações finais	149
• <b>CAPÍTULO V - CONCLUSÕES GERAIS</b>	151
• <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	154



# ***CAPÍTULO I***

## ***INTRODUÇÃO GERAL***

### **1.1 - ASPECTOS GERAIS**

Nos últimos anos, com os grandes avanços tecnológicos ocorridos na fabricação de componentes eletrônicos, os computadores passaram a ser largamente utilizados nos mais diferentes segmentos de atividade da sociedade moderna. A constante evolução destes equipamentos, tornando-os cada vez mais rápidos, confiáveis e com alta capacidade de armazenamento de informações, contribuiu para o desenvolvimento de programas computacionais (*softwares*) que proporcionam a solução imediata para a maioria de suas aplicações que, até pouco tempo atrás, levariam horas, dias ou até mesmo meses para serem resolvidas. Em alguns casos, devido a complexidade envolvida, não existiam soluções para determinados problemas que atualmente são facilmente equacionados pelos métodos numéricos utilizados por *softwares* específicos.

---

Dentro destes aspectos, os estudos associados à Engenharia Elétrica passaram a ser realizados utilizando-se de programas computacionais. Neste sentido, é comum nos dias atuais identificar alguns *softwares* específicos para determinadas análises de um sistema elétrico. Dentre os inúmeros programas computacionais utilizados, os mais conhecidos são aqueles vinculados aos estudos de curto-circuito, penetração harmônica, fluxo de carga, etc. Diante da crescente necessidade de tais análises, é extremamente interessante que uma única ferramenta computacional seja capaz de realizar todos os estudos desejados, o que resultaria em uma maior flexibilidade para o usuário. Além disso, surge também a questão da representação dos diferentes equipamentos constituintes de um sistema elétrico de potência. A busca de modelos mais exatos para tais componentes tem sido uma preocupação que cresce em importância para as mais diversas áreas da Engenharia Elétrica.

É dentro deste contexto que este trabalho está inserido. As metas do mesmo estão voltadas para a modelagem de um compensador estático de reativos, do tipo reator controlado a tiristores (RCT), em uma nova ferramenta computacional, denominada Simulador “Saber”, a qual é capaz de realizar a simulação dos mais diferentes fenômenos elétricos no domínio do tempo.

## **1.2 - O ESTADO DA ARTE**

De um modo geral, a maioria dos modelos encontrados na literatura especializada referentes aos compensadores estáticos do tipo RCT são monofásicos e, portanto, ficam limitados ao emprego em programas que estudam apenas a operação sob

---

condições ideais. Já o modelo apresentado na referência [1] é trifásico, o que permite verificar o comportamento de um RCT quando submetido às condições não-ideais de operação. Porém, a sua modelagem é no domínio da frequência e a sua aplicabilidade fica limitada aos estudos de fenômenos que ocorrem em regime permanente, como por exemplo, a análise harmônica.

As referências [2-5] propõem modelos matemáticos no domínio do tempo, implementados no programa EMTP (“Eletromagnetic Transients Program”). Trata-se de modelagens desenvolvidas com base nas placas eletrônicas que perfazem o circuito de controle em compensadores reais.

### **1.3 - A MOTIVAÇÃO E A ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Conforme já mencionado, o Simulador “Saber” é uma ferramenta computacional extremamente versátil que engloba a simulação dos principais estudos necessários em um sistema elétrico. Este expressivo “pacote” computacional se destaca entre os demais devido aos seus incomparáveis recursos gráficos, a possibilidade do passo de integração ser autoajustável dá uma maior qualidade nas formas de onda. Outro fato que o torna mais atraente que o “EMTP”, seu principal “concorrente”, é a simplicidade da sua linguagem de programação o que permite facilmente a introdução ou alteração de novos recursos em seus modelos, além de possuir uma interface gráfica de altíssimo nível, ou seja, praticamente inexistem preocupações como a entrada de dados entre outras.

---

Dentro deste contexto surgiu esta dissertação, cujos principais objetivos são o desenvolvimento, implementação e incorporação junto ao Simulador “Saber” de um modelo matemático para o reator controlado a tiristores. Trata-se de uma modelagem altamente flexível, pois esta será trifásica com as fases independentemente representadas.

Com vistas a atingir estas metas, este trabalho apresenta-se desenvolvido de acordo com a seguinte estrutura:

- **Capítulo II - Compensador estático de reativos do tipo reator controlado a tiristores (RCT)**

Esse capítulo é destinado a explanação dos princípios de funcionamento dos compensadores estáticos de reativos do tipo RCT, bem como a identificação dos principais arranjos trifásicos utilizados com este tipo de compensador nos sistemas elétricos de potência.

- **Capítulo III - Modelagem de um compensador estático do tipo RCT para simulações computacionais**

Esse capítulo é dedicado a apresentar o desenvolvimento de um modelo matemático para o reator controlado a tiristores associado com o capacitor chaveado a tiristor, ambos com conexão em triângulo. Outras configurações foram implementadas, porém devido à grande quantidade de detalhes envolvidos,

---

será descrito apenas o desenvolvimento do modelo mais completo, pois este engloba as demais opções do compensador estático em questão.

- **Capítulo IV - Simulações computacionais com vistas à validação da modelagem**

Esse capítulo faz uma confrontação entre resultados obtidos através das simulações com aqueles oriundos de medições. Os resultados de campo que serão utilizados na análise comparativa foram obtidos e fornecidos pela *ELETRONORTE*. As medições foram realizadas no sistema de transmissão de energia elétrica do estado de Mato Grosso, em dezembro de 1990, na época do comissionamento do compensador estático da “Subestação de Coxipó”.

- **Capítulo V - Conclusões gerais**

Finalmente, esse capítulo apresenta as principais constatações e conclusões desta dissertação, bem como propostas para trabalhos futuros.

---

## ***CAPÍTULO II***

### ***COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS DO TIPO REATOR CONTROLADO A TIRISTORES (RCT)***

#### **2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Este capítulo tem por objetivo apresentar os fundamentos teóricos da operação dos compensadores estáticos de reativos do tipo reator controlado a tiristores. Os estudos a serem desenvolvidos terão como base a representação monofásica deste dispositivo. Dentro deste contexto, além de uma abordagem analítica, serão destacadas as suas principais características operacionais e limitações quanto à absorção de energia reativa. Adicionalmente, apresentar-se-á as possíveis configurações trifásicas adotadas nos sistemas elétricos, tais como: compensador estático constituído por apenas um RCT de seis ou doze pulsos, RCT associado com capacitores (fixos e/ou chaveados) e, finalmente, identificar as principais conclusões sobre a flexibilidade e o desempenho pertinentes à cada um desses arranjos.

---

## 2.2 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO RCT

Dentre os diversos fatores que influenciam no desempenho de um sistema elétrico de potência, o controle do fluxo de energia reativa é, sem dúvida alguma, um dos elementos de maior importância para garantir uma qualidade satisfatória no suprimento da energia elétrica. O dimensionamento de um sistema elétrico como um todo está intimamente relacionado com a quantidade de reativos a ser transportado pelas linhas de transmissão. Desta forma, se o fluxo de energia reativa ultrapassar os limites que foram previstos durante o projeto, devido à natureza reativa das linhas, haverá um aumento nas perdas, ocorrerão flutuações de tensão e a capacidade de transmissão da rede ficará reduzida. Mediante estes fatos, fica evidenciada a importância de um eficiente controle do fluxo de reativos nas linhas a fim de limitar o seu domínio de variação. Basicamente isto é conseguido utilizando-se equipamentos locais conhecidos como compensadores de reativos que têm por característica de operação, manter a corrente de alimentação do conjunto carga/compensadores dentro de uma faixa razoavelmente constante, conforme se pode observar na figura 2.1 [6].

A figura 2.1 ilustra uma compensação típica de reativos onde o dispositivo de compensação é conectado em derivação “shunt” com a carga. Em alguns casos, a barra mostrada na figura 2.1 corresponde ao ponto de acoplamento comum (PAC) entre a instalação e o restante do sistema elétrico. Para esta situação, a carga representada é o equivalente de toda a instalação.

---

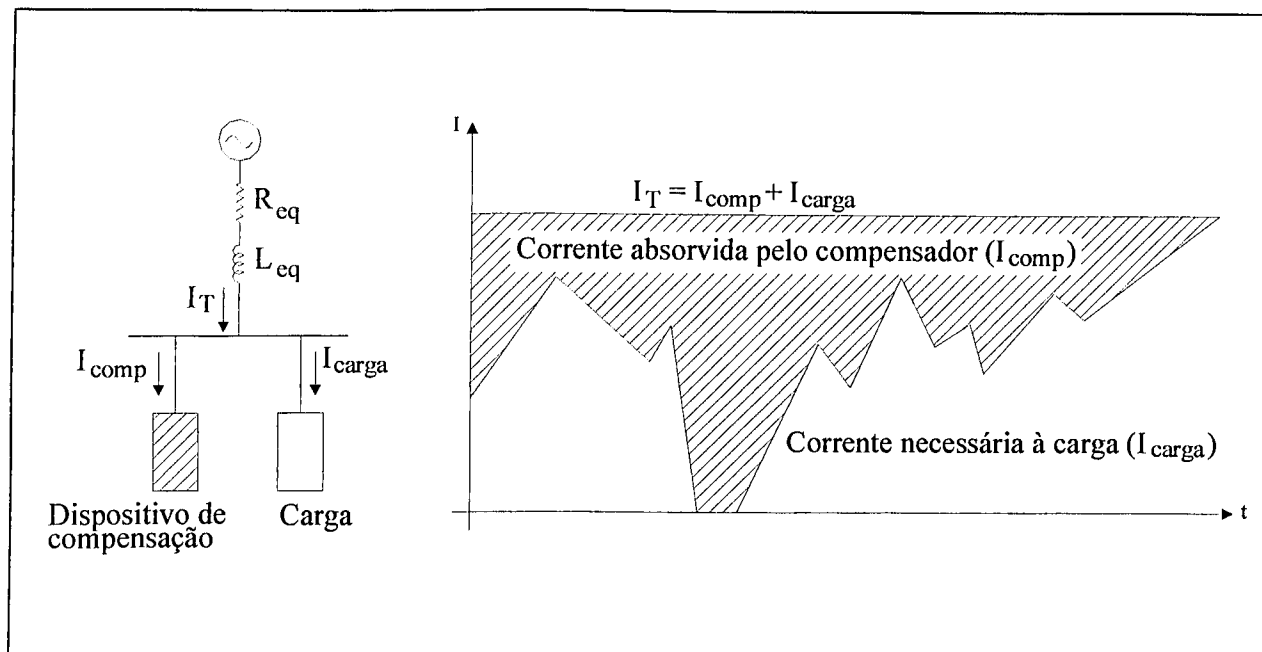


Figura 2.1 - Compensação típica de reativos.

Conforme pode se observar na figura 2.1, qualquer variação que ocorra na corrente da carga,  $I_{carga}$ , é rapidamente compensada pela corrente no dispositivo de compensação,  $I_{comp}$ , de tal forma que a corrente total da instalação,  $I_T$ , permaneça razoavelmente constante. Neste sentido, a queda de tensão ao longo do sistema será sempre a mesma, possibilitando, desta forma, que a tensão de alimentação do conjunto carga/dispositivo de compensação seja mantida dentro de um valor pré-determinado.

Os compensadores de reativos podem ser divididos em síncronos e estáticos. Um compensador síncrono (CS) nada mais é do que um motor síncrono sem nenhuma carga no seu eixo. Assim sendo, a potência ativa consumida pelo CS é pequena e é referente às perdas mecânicas. Já a sua potência reativa varia com a tensão de excitação a qual é imposta pela excitatriz ao enrolamento de campo (rotor). Aumentando-se a tensão de excitação acima de uma determinada referência



(ponto de neutralidade: 0 MVar), a máquina passa a fornecer energia reativa. Nestas condições ela se comporta como se fosse um capacitor, donde a denominação usual de condensadores síncronos [7]. Por outro lado, reduzindo-se a tensão de excitação abaixo do valor de referência, a energia magnética torna-se insuficiente para o seu funcionamento e o CS passará a absorver da rede a diferença de energia necessária, num comportamento típico de um reator. Diante do exposto, se o dispositivo de compensação mostrado na figura 2.1 fosse um CS, o valor da corrente  $I_{\text{comp}}$  seria alterado através da variação da tensão imposta pela excitatriz.

Nos últimos anos, com os avanços na tecnologia de componentes de estado sólido, os compensadores síncronos foram substituídos na maioria das aplicações pelos chamados compensadores estáticos (C.E.), pois estes últimos podem operar independentemente em cada fase, o que os torna ideais para compensar cargas desequilibradas. Outra fato a favor dos C.E's é o seu tempo de resposta que é da ordem de 1 a 9 ciclos, enquanto que os síncronos mais rápidos ficam em cerca de 15 ciclos [8]. Os custos de manutenção dos C.E's são menores que os dos síncronos, além de não possuírem partes rotativas, o que elimina a possibilidade de instabilidade eletromecânica.

Feitas essas observações surge então o natural questionamento do que vem a ser um compensador estático. Na realidade, quando se fala em compensador estático o que se tem em mente não é um equipamento isolado, mas sim um sistema de compensação "shunt" usado para variar o intercâmbio de potência reativa de uma determinada barra com o restante do sistema elétrico. 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. A sua principal característica é que, a partir dos elementos que o compõem, ele pode controlar o 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) [8].

Sendo o C.E. um equipamento composto somente por elementos passivos, surge a dúvida de como ele consegue uma variação tão rápida, e até mesmo contínua, de potência reativa. Em outras palavras, se o dispositivo de compensação mostrado na figura 2.1 for agora um C.E., de que maneira será alterada a sua corrente  $I_{comp}$ .

Para uma melhor compreensão deste assunto, é interessante que seja inicialmente analisada apenas a absorção de reativos pelo C.E., deixando a geração para ser estudada durante a apresentação das estruturas trifásicas.

No tocante à absorção de energia reativa, os reatores lineares controlados por tiristores (RCT) se destacam entre os demais compensadores estáticos devido à sua grande flexibilidade operacional pois, conforme será visto neste capítulo, os RCT's, além de serem excelentes reguladores de tensão, podem também ser usados no controle de várias outras grandezas elétricas.

A figura 2.2 ilustra o circuito de potência de um RCT monofásico, o qual é constituído por um reator linear em série com dois tiristores em anti-paralelo. Estes tem a finalidade de conduzir a corrente  $i(t)$  em alternados meio-ciclos. A

---

absorção de potência reativa é controlada pelo instante de disparo dos tiristores e consiste na passagem de maior ou menor quantidade da corrente  $i(t)$  pelo reator.

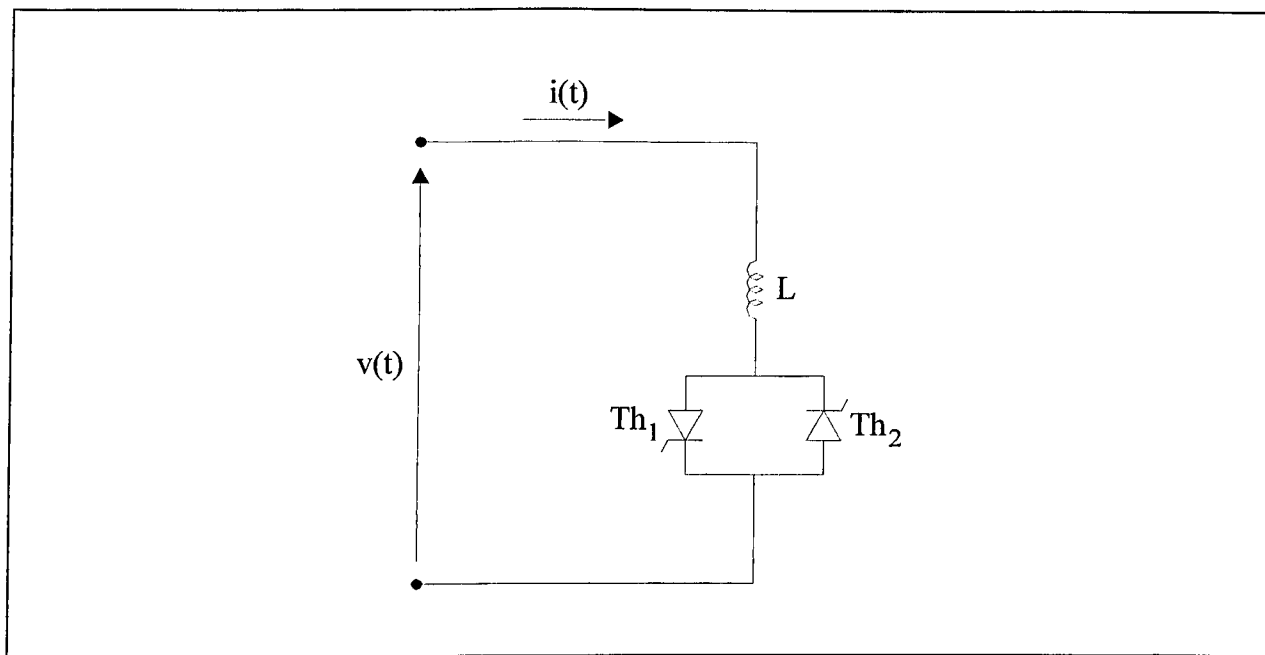
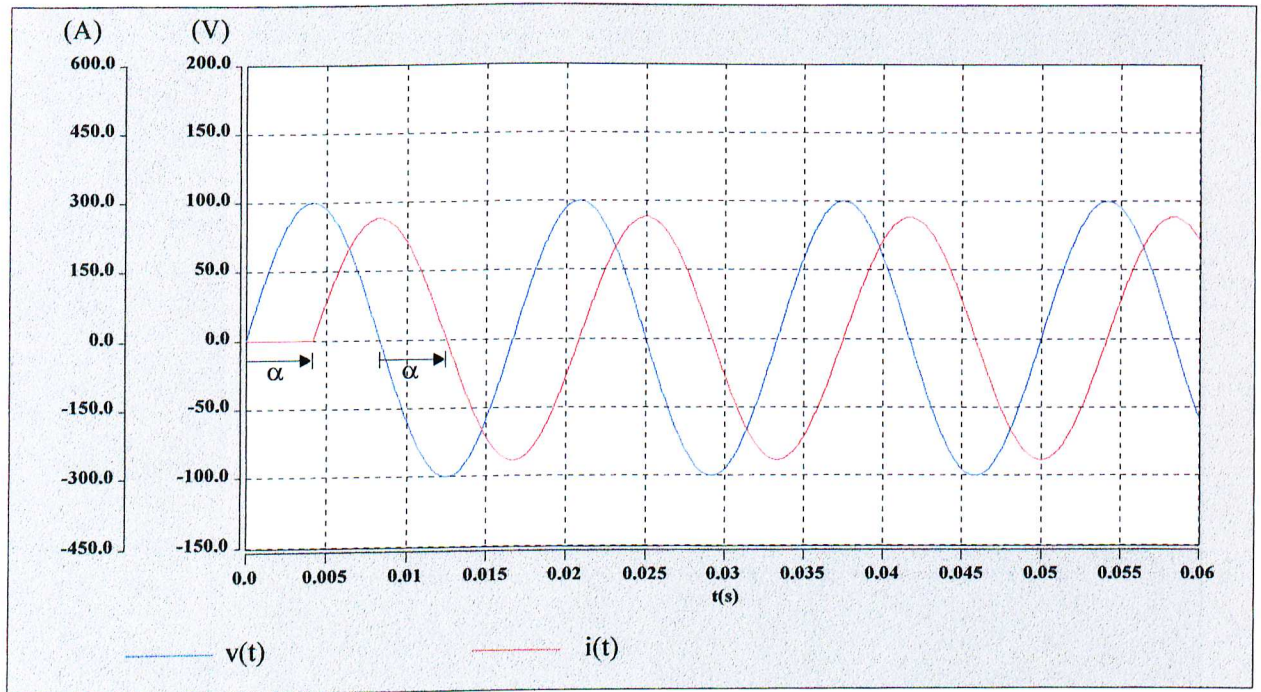


Figura 2.2 - Circuito monofásico de um RCT ideal.

Na figura 2.2 pode-se observar que o consumo de reativos pelo reator  $L$  é controlado pela tensão a que o mesmo está submetido. No instante em que um dos tiristores entra em condução, a tensão  $v(t)$  é aplicada sobre os terminais do reator. Desta forma, se os tiristores  $Th_1$  e  $Th_2$  forem sempre disparados, respectivamente, quando a tensão  $v(t)$  estiver passando por seu valor máximo e mínimo, então a corrente  $i(t)$  será a mesma de um reator fixo, ou seja, estará atrasada de  $90^\circ$  em relação a tensão  $v(t)$  com forma de onda senoidal. Nestas condições, o ângulo de disparo dos tiristores, que é medido a partir de um cruzamento por zero da tensão  $v(t)$ , é igual a  $90^\circ$ , conforme indicado pela figura 2.3.



**Figura 2.3 - Forma de onda da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$ , da figura 2.2, com ângulo de disparo  $90^\circ$ , indutância do reator  $L = 0,001$  H e valor máximo de  $v(t) = 100$  V.**

Da observação da figura 2.3, verifica-se que os dois tiristores são disparados com o mesmo ângulo  $\alpha$ , no caso  $90^\circ$ . Os tiristores  $Th_1$  e  $Th_2$  conduzem igualmente a corrente  $i(t)$  durante os semiciclos positivo e negativo, respectivamente. Quando  $Th_1$  é bloqueado (cruzamento de  $i(t)$  por zero),  $Th_2$  imediatamente entra em condução e vice-versa. Nestas condições, diz-se que os tiristores estão conduzindo em suas plenitudes e a corrente  $i(t)$  ao percorrer o reator  $L$  provoca um consumo máximo de reativos. Porém se o ângulo  $\alpha$  for superior a  $90^\circ$ , isto é, se a permissão para os disparos dos tiristores demorar mais para ocorrer, então a corrente  $i(t)$  será menor e isto provocará uma diminuição no consumo de reativos.

A título de exemplificação, a figura 2.4 ilustra a corrente absorvida pelo RCT, mostrado na figura 2.2, para diferentes ângulos de disparo.



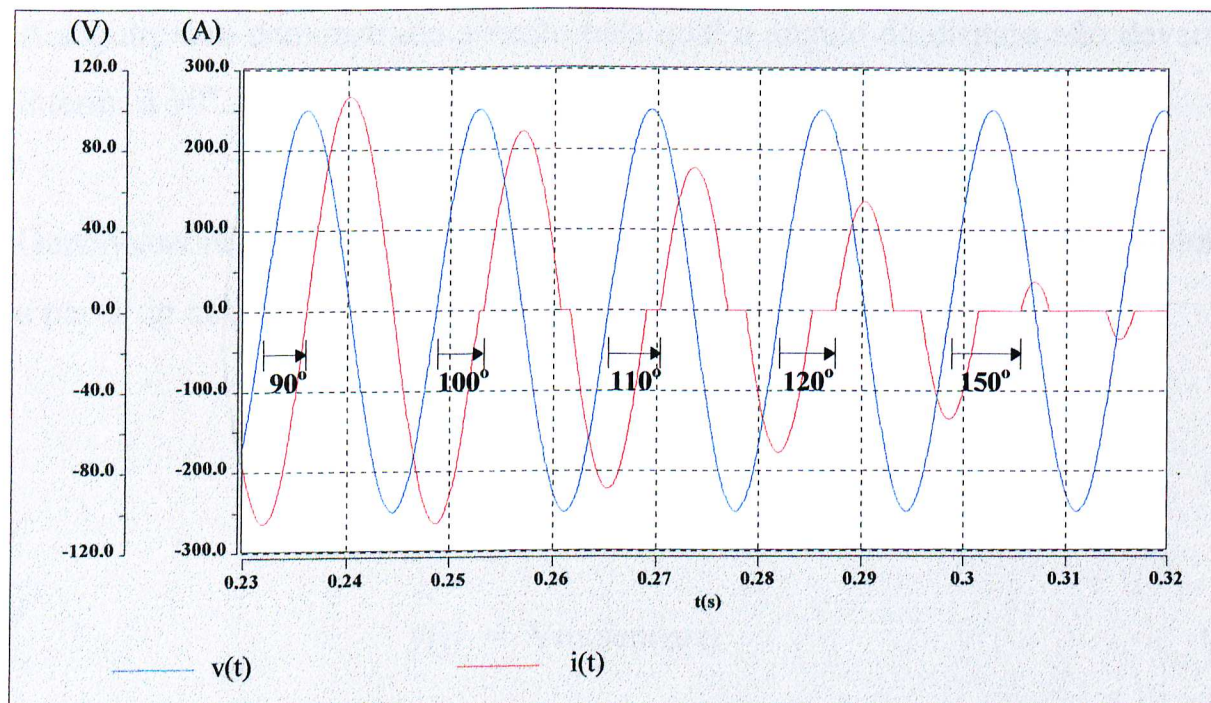


Figura 2.4 - Forma de onda da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$ , da figura 2.2, para diferentes ângulos de disparo com a indutância do reator  $L = 0,001$  H e valor máximo de  $v(t) = 100$  V.

Conforme anteriormente mencionado, verifica-se através da figura 2.4 que, a corrente  $i(t)$  diminui com o aumento de  $\alpha$ . Além disso, a sua forma de onda vai se tornando cada vez menos senoidal. Isto ocorre porque os tiristores ( $Th_1$  e  $Th_2$ ) conduzem parcialmente com ângulos de disparo entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

Da figura 2.4, pode-se concluir que, através da modificação do instante de disparo dos tiristores ( $Th_1$  e  $Th_2$ ), consegue-se controlar a corrente que percorre o reator do RCT. Como consequência deste controle, ocorre uma variação na quantidade de reativos consumido pelo RCT. A faixa de variação vai de 0 ( $\alpha = 180^\circ$ ) até um valor máximo ( $\alpha = 90^\circ$ ).

A seguir, será demonstrado a razão pela qual o ângulo de disparo não deverá ser inferior à  $90^\circ$ .

Genericamente, quando ocorre um disparo com um ângulo  $\alpha$  qualquer, obtém-se a partir do circuito mostrado na figura 2.2, a seguinte expressão:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.1)$$

$$v(t) = V_m \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.2)$$

Substituindo (2.2) em (2.1) e isolando-se  $i(t)$ , obtém-se:

$$i(t) = \frac{V_m}{L} \int_{t_0}^t \text{sen}(\omega t) dt \quad (2.3)$$

Onde:

$$t_0 = \frac{\alpha}{\omega} \text{ (tempo correspondente a } \alpha \text{)}$$

Resolvendo-se (2.3), tem-se:

$$i(t) = \frac{V_m}{\omega L} (\cos \alpha - \cos(\omega t)) \quad (2.4)$$

Da análise da equação (2.4), verifica-se que o primeiro termo será sempre positivo se  $\alpha$  for menor que  $90^\circ$  e corresponde a uma componente contínua cujo valor diminui com o aumento de  $\alpha$  ( $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ ).

---

A título de exemplificação, as figuras 2.5, 2.6 e 2.7 ilustram a forma de onda da corrente  $i(t)$  quando o ângulo de disparo é igual a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $85^\circ$ , respectivamente.

Observa-se na figura 2.5, onde o ângulo de disparo é  $\alpha = 0^\circ$ , que a corrente é sempre positiva, ou seja, somente o tiristor  $Th_1$  conduz. Isto ocorre porque o instante em que a corrente passa por zero (bloqueio natural de  $Th_1$ ) coincide com o momento do seu disparo para o próximo semiciclo. A componente contínua, neste caso, assume o máximo valor possível e este fato faz com que a amplitude da corrente  $i(t)$  fique duas vezes maior quando comparada com a da figura 2.3 ( $\alpha = 90^\circ$ ).

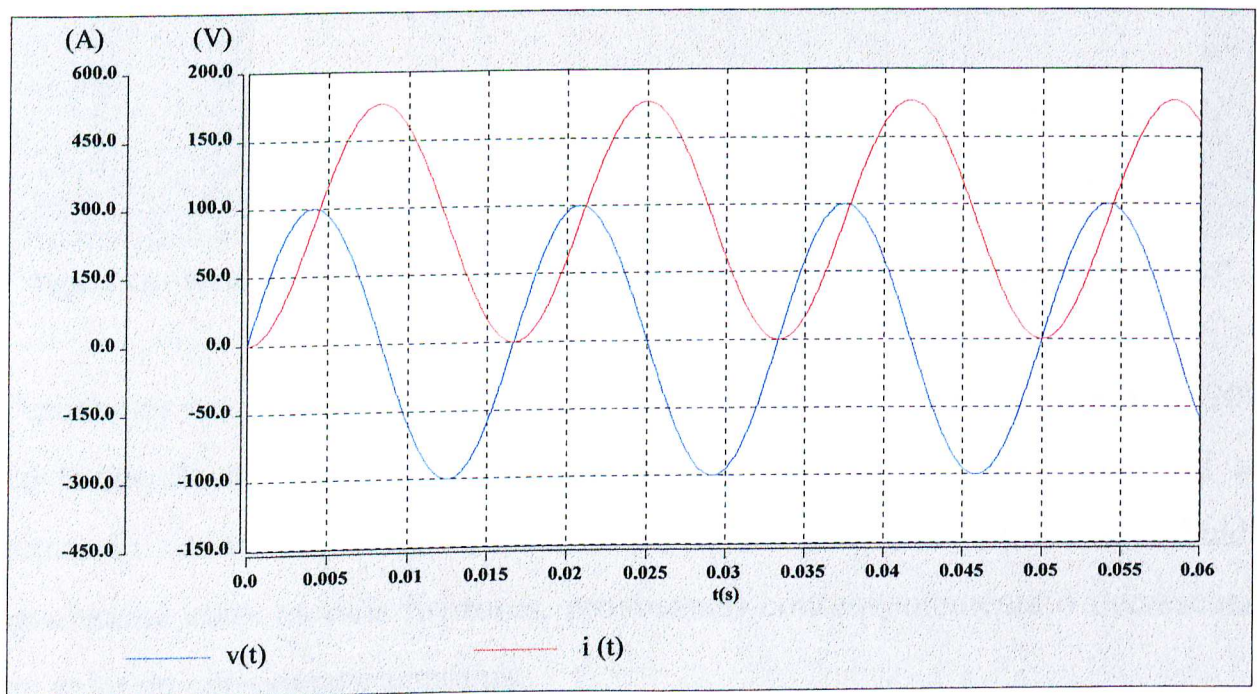


Figura 2.5 - Forma de onda da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$ , da figura 2.2, com ângulo de disparo  $0^\circ$ .

A figura 2.6 representa a operação do RCT com ângulo de disparo  $\alpha = 45^\circ$ . Como pode ser observado, neste caso haverá condução de  $Th_2$ . No entanto, este tiristor conduz somente  $\frac{1}{4}$  de ciclo, enquanto  $Th_1$  conduz durante  $\frac{3}{4}$  de ciclo.



Analogamente ao caso anterior a corrente  $i(t)$  não se distribui equitativamente entre os dois tiristores, provocando o surgimento de uma componente contínua no sistema.

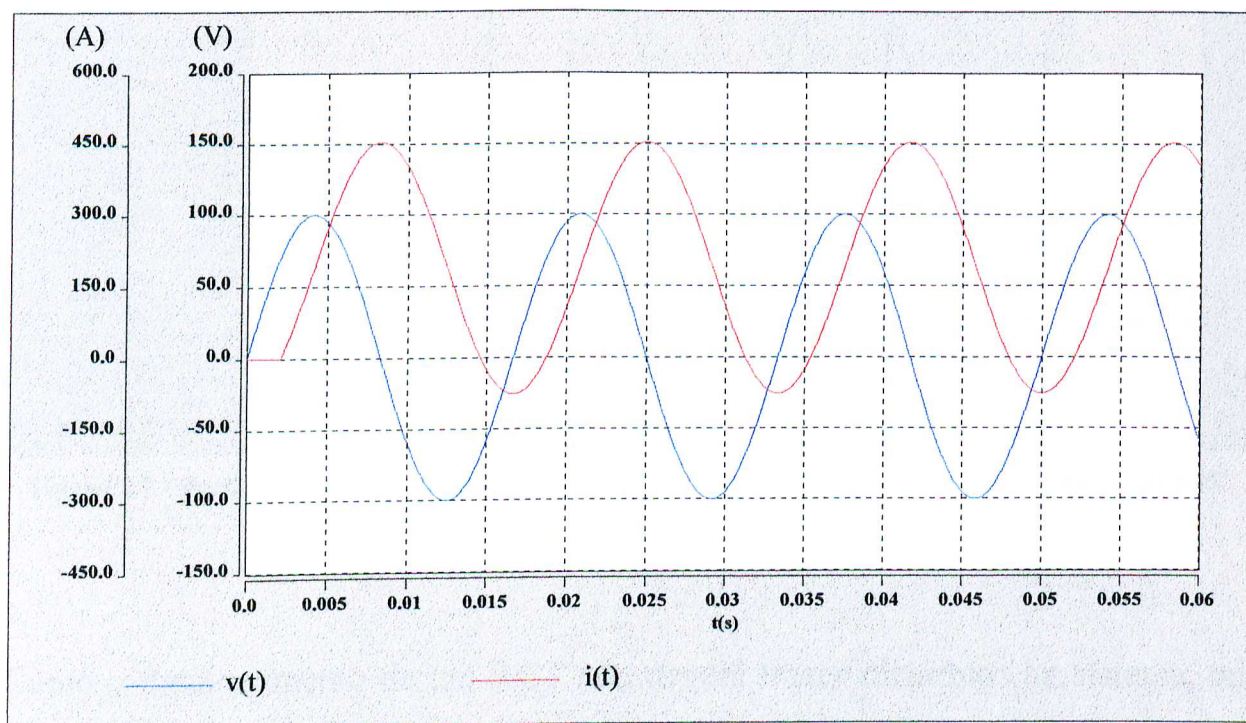


Figura 2.6 - Forma de onda da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$ , da figura 2.2, com ângulo de disparo  $45^\circ$ .

Percebe-se que a medida que o ângulo de disparo vai se aproximando de  $90^\circ$ , conforme ilustra a figura 2.7, o período de condução do tiristor  $Th_2$  vai se tornando cada vez maior. Desta forma, a corrente tende a ser distribuída igualmente entre os dois tiristores, provocando conseqüentemente o decréscimo no valor da componente contínua.



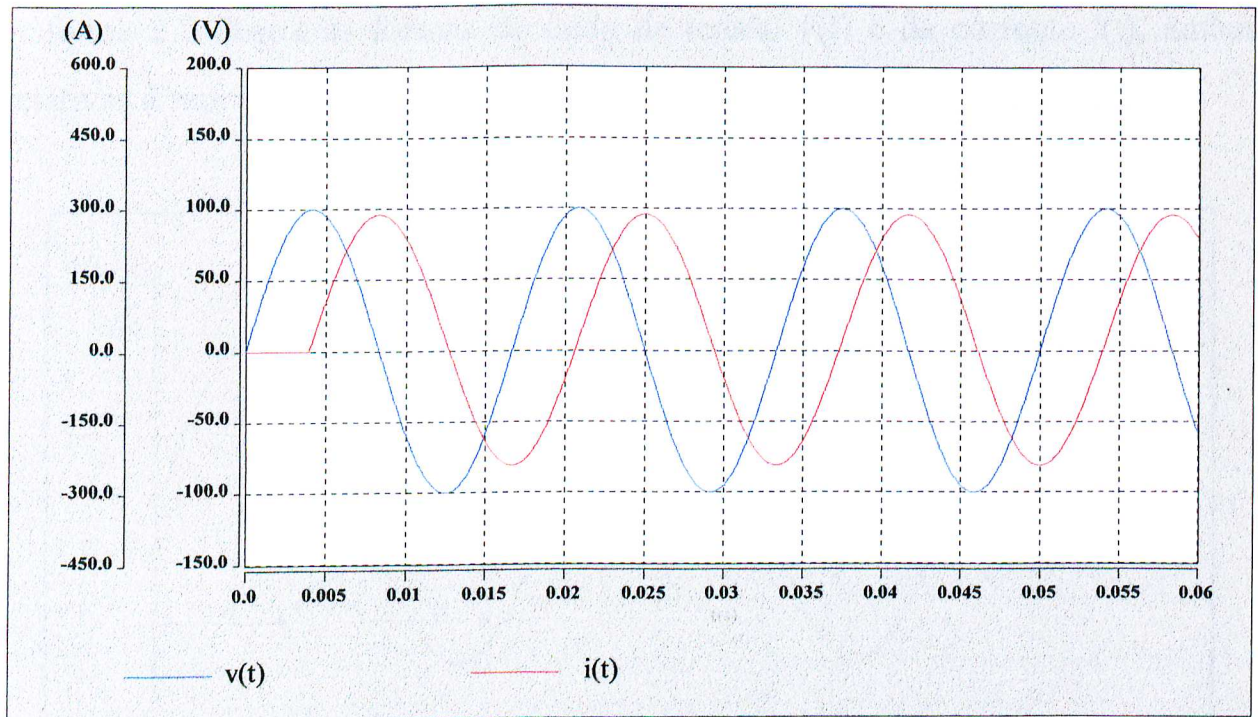
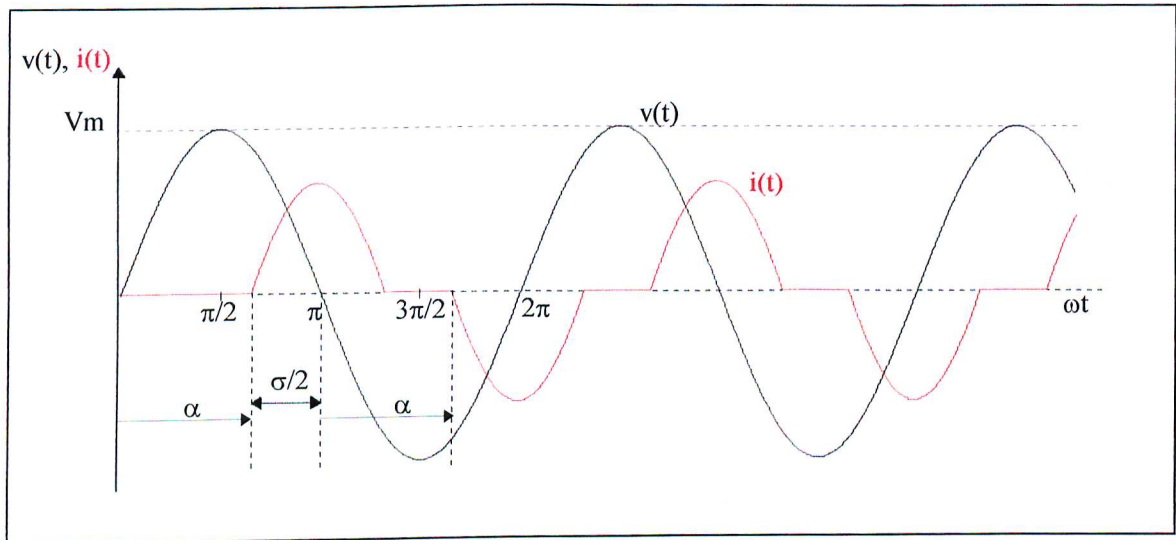


Figura 2.7 - Forma de onda da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$ , da figura 2.2, com ângulo de disparo  $85^\circ$ .

Como o funcionamento de um RCT não deverá trazer distúrbios ao sistema, tais como a injeção de corrente contínua, vê-se de imediato que o reator controlado a tiristores não deverá operar com ângulo de disparos inferiores a  $90^\circ$ . Caso isso ocorra, o RCT provocará a circulação de corrente contínua no sistema, além de operar com um tiristor mais carregado que o outro [6].

Dentro do que foi acima exposto, é evidente que a faixa de operação do ângulo de disparo ficará limitada entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$  [9]. Deste modo, a forma de onda da corrente  $i(t)$  sempre apresentará intervalos de tempo com valor nulo para ângulos de disparo maiores que  $90^\circ$  e menores que  $180^\circ$ , como genericamente mostrado na figura 2.8.

A figura 2.8 ilustra as formas de onda da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$ , ambas relativas à representação monofásica do RCT, já introduzida na figura 2.2.



**Figura 2.8 - Forma de onda da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$ , da figura 2.2, com ângulo de disparo  $\alpha$ .**

Observa-se nesta figura a presença do ângulo de disparo  $\alpha$  e do ângulo  $\sigma$ , sendo este último denominado ângulo de condução, pois indica a medida do tempo que o reator permanece conduzindo corrente em cada semiciclo. A relação entre estes dois ângulos, é dada pela equação (2.5).

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \tag{2.5}$$

Onde:

$\alpha$  e  $\sigma$  são dados em radianos

O ângulo de condução  $\sigma$ , por sua própria definição, é muito usado na literatura como sendo um indicativo da energia reativa absorvida pelo reator em cada semiciclo.

A corrente instantânea, ilustrada na figura 2.8, é dada pela expressão (2.6):

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{V_m}{\omega L} (\cos\alpha - \cos\omega t), \text{ para } \alpha < \omega t < (\alpha + \sigma) \\
 i &= 0, \text{ para } (\alpha + \sigma) < \omega t < (\alpha + \pi) \\
 i &= \frac{V_m}{\omega L} (-\cos\alpha - \cos\omega t), \text{ para } (\alpha + \pi) < \omega t < (\alpha + \pi + \sigma) \\
 i &= 0, \text{ para } (\alpha + \pi + \sigma) < \omega t < (\alpha + 2\pi)
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Onde:

$V_m$  - Valor máximo da tensão nos terminais do reator, em V;

$L$  - Indutância do reator, em H;

$\omega = 2\pi f$

$f$  - Frequência do sistema, em Hz;

$\alpha$  - Ângulo de atraso do disparo, em radianos.

Decompondo a forma de onda através da série de Fourier, obtém-se as componentes harmônicas e fundamental da corrente  $i(t)$ , as quais são apresentadas a seguir [10].

- Componente fundamental - valor eficaz:

$$I_{1_{rms}} = \frac{V_m}{\omega L} \times \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \text{sen}(2\alpha) \right) \tag{2.7}$$


---

- Componentes harmônicas - valor eficaz:

$$I_{n\text{rms}} = \frac{2\sqrt{2} V_m}{\pi\omega L} \times \left( \frac{\text{sen}[(n+1)\alpha]}{2(n+1)} + \frac{\text{sen}[(n-1)\alpha]}{2(n-1)} - \frac{\text{sen}(n.\alpha)}{n} \times \cos\alpha \right) \quad (2.8)$$

Onde “n” é a ordem harmônica (n = 3, 5, 7,...).

A equação (2.7) permite afirmar que o valor eficaz da componente fundamental diminui com o aumento do ângulo de disparo,  $\alpha$ . Sob este aspecto, pode-se dizer que o RCT é “visto” pelo sistema à frequência fundamental, como sendo uma carga de impedância variável, cujo consumo de potência reativa é definido a seguir:

Sendo o circuito monofásico do RCT puramente indutivo (figura 2.2), pois este RCT é ideal (sem resistência), então o valor eficaz da potência reativa pode ser obtido através da equação (2.9).

$$Q_{\text{rms}} = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \quad (2.9)$$

Onde:

$V_{\text{rms}}$  e  $I_{\text{rms}}$  são os valores eficazes de  $v(t)$  e  $i(t)$ , respectivamente.

Substituindo-se (2.7) em (2.9), têm-se:

$$Q_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \times \frac{V_m}{\omega L} \times \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \text{sen}(2\alpha) \right) \quad (2.10)$$

A potência reativa pode ainda ser escrita da seguinte forma:

$$Q_{\text{rms}} = V_{\text{rms}}^2 \times \beta \quad (2.11)$$

Onde:

$\beta$  é a susceptância oferecida pelo reator ao sistema.

Igualando-se as equações (2.10) e (2.11), obtém-se:

$$\beta = \frac{1}{\omega L} \times \frac{2}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \text{sen}(2\alpha) \right) \quad (2.12)$$

Analisando-se a equação (2.12), constata-se que a susceptância oferecida pelo reator é ajustada e controlada pelo ângulo de disparo  $\alpha$ .

Do que foi exposto, pode-se concluir que a potência reativa absorvida pelo reator, tem o seu valor definido pelo ângulo de disparo, através do controle da susceptância. Assim, a máxima energia reativa absorvida é alcançada com  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , ou seja, com condução plena de corrente. Neste caso, a susceptância

oferecida pelo reator é máxima, sendo denominada por  $\beta_{\text{max}} = \frac{1}{\omega L}$ . Nestas

condições, a equação (2.12) pode ser rescrita como:

---



$$\beta = \beta_{\max} \times \frac{2}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \text{sen}(2\alpha) \right) \quad (2.13)$$

ou ainda,

$$\beta \text{ (p.u.)} = \frac{2}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \text{sen}(2\alpha) \right) \quad (2.14)$$

Deve-se notar ainda que, no outro caso extremo, isto é,  $\alpha = \pi$ , as válvulas nunca disparam e, portanto, a susceptância  $\beta$  é igual a zero. Nessas condições o RCT não absorve nenhuma quantidade de reativos.

A figura 2.9 ilustra o comportamento da susceptância em função do ângulo de disparo, tendo  $\beta_{\max}$  como valor base.

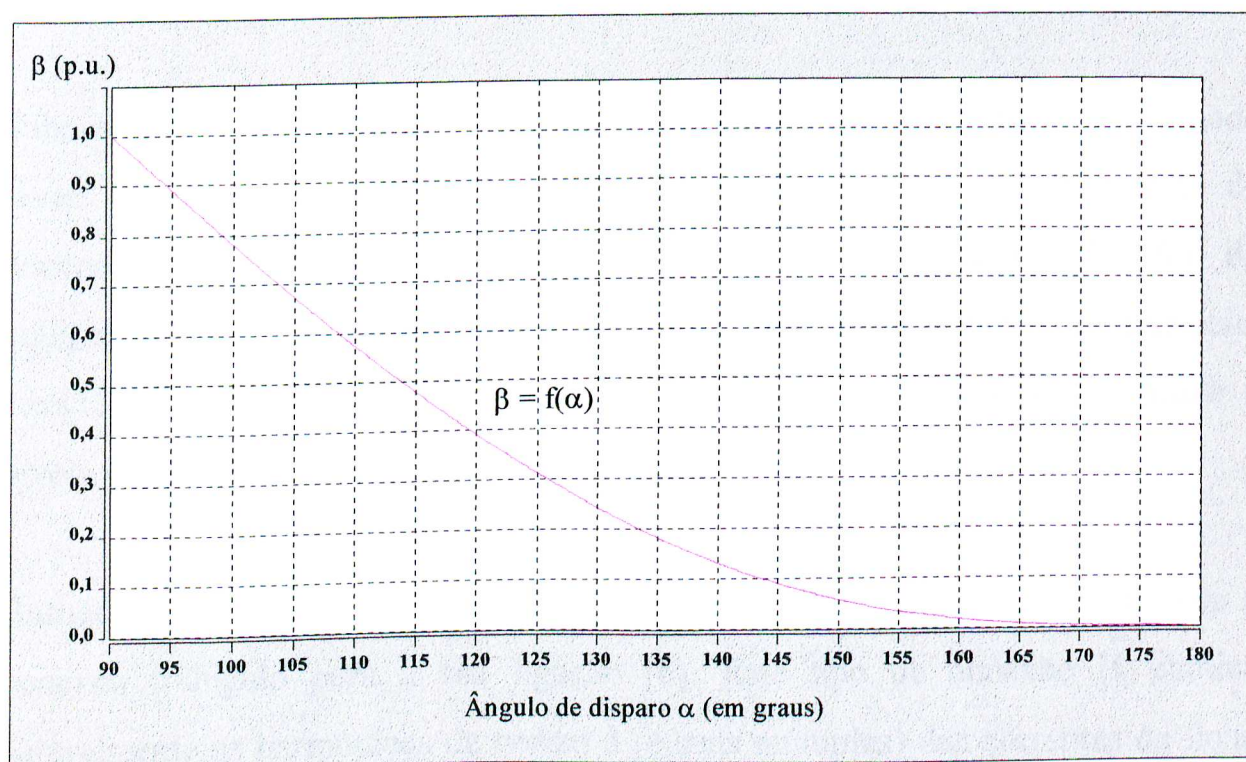


Figura 2.9 - Susceptância em p.u., em função do ângulo de disparo.

Da observação da figura 2.9, nota-se que a susceptância do reator vista pelo sistema pode ser rapidamente alterada pela modificação do ângulo de disparo dos tiristores. Por esta razão é que o tempo de resposta de um RCT é relativamente pequeno, sendo este um dos principais motivos do seu crescente emprego.

Em suma, pode-se dizer que o RCT é um dispositivo que apresenta um excelente desempenho no controle da sua potência reativa que, conforme visto, consiste no controle da componente fundamental da corrente que percorre o seu reator. No entanto, deve-se ressaltar que a operação de um RCT, com exceção quando os disparos dos seus tiristores são efetuados com  $\alpha = 90^\circ$  ou  $180^\circ$ , tem como inconveniente a geração de correntes harmônicas. Em condições ideais, de acordo com a equação (2.8), o RCT injeta no sistema somente harmônicos de ordem ímpar, sendo estes chamados de harmônicos característicos.

Sabe-se que a presença de correntes harmônicas em um sistema elétrico pode levar a efeitos indesejados, tais como: interferências em sistemas de telecomunicações adjacentes, perdas adicionais e diminuição da vida útil de equipamentos elétricos, distorções de tensão, sobretensões devido a ressonância, etc [11]. De um modo geral, são tomadas medidas para minimizar ou reduzir a níveis aceitáveis a injeção de harmônicos no sistema.

Baseado nestes fatos, em sistemas trifásicos, o RCT é utilizado adotando-se a conexão triângulo para a sua ligação [6]. Este tipo de conexão já elimina naturalmente as harmônicas de ordem 3 (e suas múltiplas) das correntes de linha desde que: o sistema e o RCT sejam balanceados, a tensão de alimentação seja pura (sem distorção e desequilíbrios) e o ângulo de disparo seja o mesmo para

---

todos os tiristores. Nestas condições ditas ideais, as correntes harmônicas de ordem 3 e suas múltiplas serão de seqüência zero e portanto, estarão em fase e circularão apenas dentro das fases do RCT.

A figura 2.10 mostra o diagrama trifilar típico de um RCT, utilizado em sistemas trifásicos.

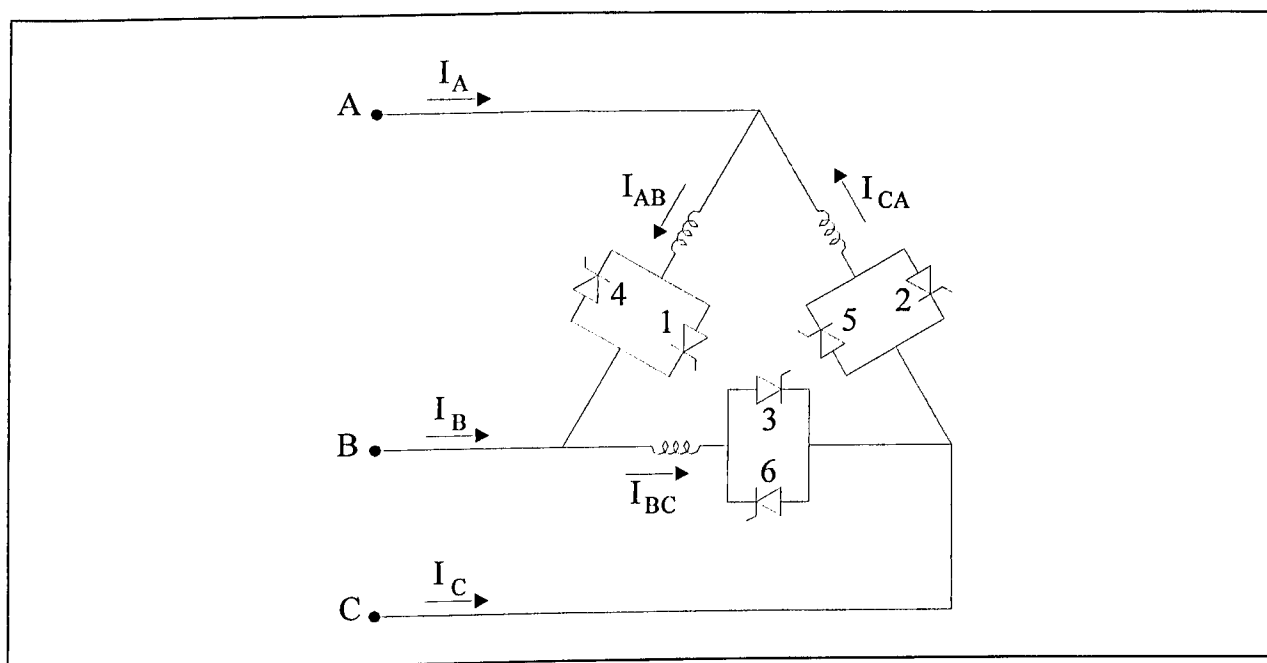


Figura 2.10 - Diagrama trifilar simplificado de um RCT.

O RCT apresentado na figura 2.10 é conhecido como sendo de seis pulsos (seis tiristores). As correntes harmônicas presentes na linha de um RCT de “p” pulsos serão de ordem “n”, onde  $n = p.k \pm 1$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ). Assim, para o RCT de 6 pulsos, a corrente harmônica de menor ordem é a 5<sup>a</sup>. As demais serão a 7<sup>a</sup>, a 11<sup>a</sup>, a 13<sup>a</sup>, etc.[1]

A título de exemplificação, a figura 2.11 ilustra as formas de onda da corrente na fase e na linha do RCT mostrado na figura 2.10 para vários ângulos de disparo.



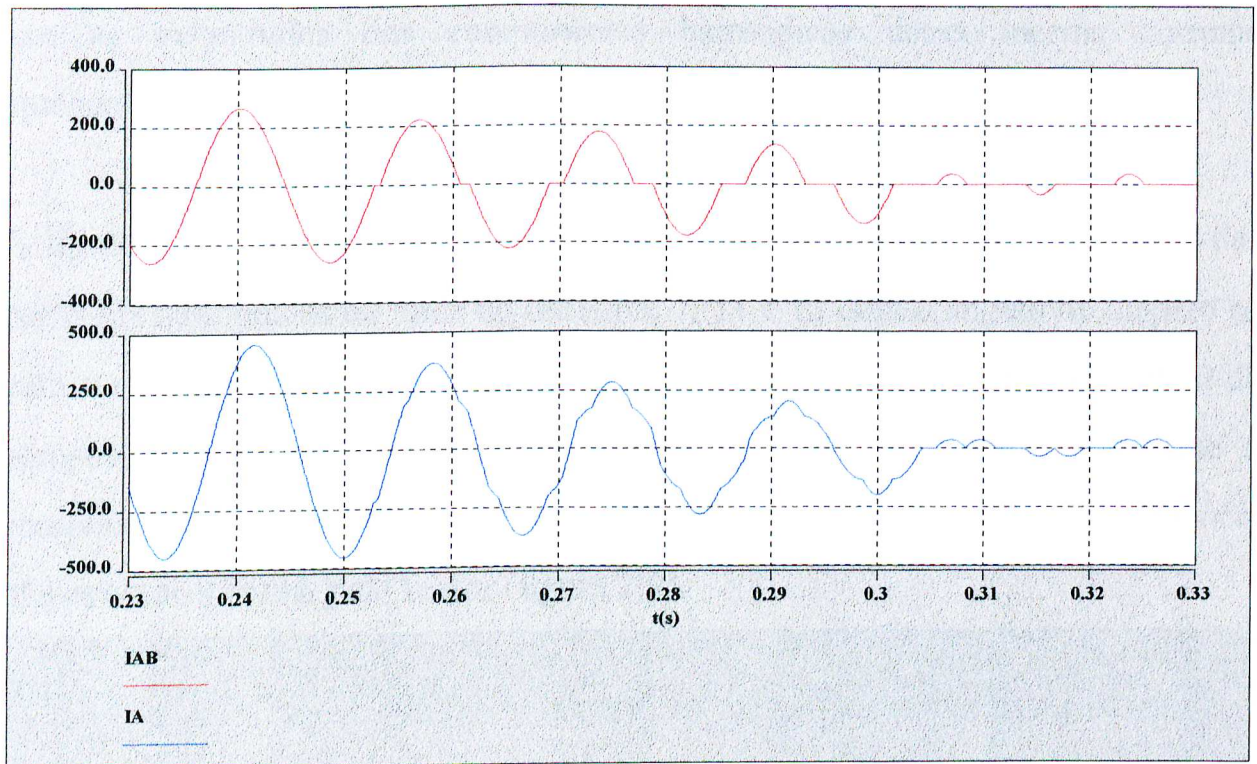


Figura 2.11 - Corrente de linha ( $I_A$ ) e nas fases AB e AC do RCT mostrado na figura 2.10.

Nesta figura, o RCT inicialmente foi disparado com  $\alpha = 90^\circ$ , sendo logo em seguida alterado para  $100^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $150^\circ$ . Estas mudanças no ângulo de disparo foram efetuadas com a finalidade de mostrar o aspecto da forma de onda da corrente tanto na fase como na linha do RCT. Verifica-se na figura 2.11 que a ausência das componentes harmônicas de ordem 3 e suas múltiplas na corrente de linha, tornam a sua forma de onda com um aspecto mais “senoidal” quando comparada com a corrente de fase. Da visualização da corrente de linha (em cor azul) mostrada na figura 2.11, percebe-se nitidamente uma grande alteração na sua forma de onda quando o ângulo de disparo é modificado. Isto ocorre porque tanto a amplitude da componente fundamental como as das harmônicas são alteradas em função do valor do ângulo de disparo (eq. 2.8).

Conforme poderá ser notado na figura 2.12, a magnitude da componente fundamental da corrente de linha decresce com o aumento do ângulo  $\alpha$ , enquanto



que as magnitudes das componentes harmônicas dessa mesma corrente apresentam um comportamento bastante particular em relação a  $\alpha$ .

A figura 2.12 mostra a variação da amplitude da corrente fundamental e das correntes harmônicas de linha de ordem 5, 7, 11 e 13 com o ângulo de disparo  $\alpha$ , para o caso equilibrado [12]. Cada corrente é mostrada como um percentual da componente fundamental de condução plena ( $\alpha = 90^\circ$ ). Observa-se que a componente fundamental apresenta o mesmo comportamento da susceptância oferecida ao sistema pelo reator (figura 2.9).

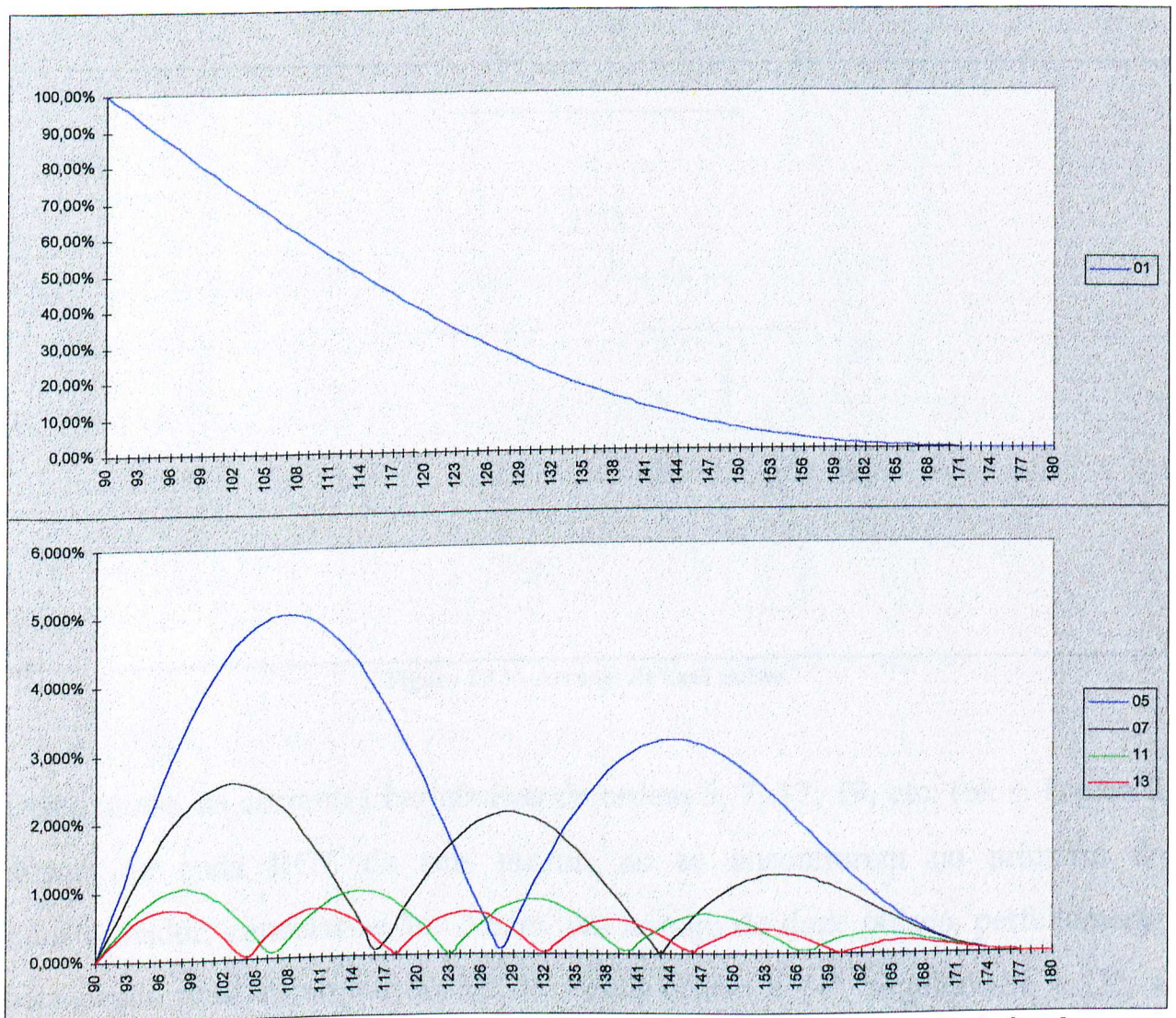


Figura 2.12 - Correntes de linha para um RCT conectado em triângulo, em função do ângulo  $\alpha$ .

Conforme ilustrado na figura 2.12, as harmônicas de ordem 5 e 7 são as de amplitude mais significativas. Mediante este fato, os compensadores com este tipo de unidade variável (arranjo de seis pulsos) usualmente deverão contar com filtros sintonizados para a 5ª e 7ª harmônicas. Uma outra alternativa para atenuar estas harmônicas está mostrada na figura 2.13. É o arranjo conhecido por doze pulsos e que consiste de duas unidades de seis pulsos conectadas em paralelo, mediante o uso de um transformador de três enrolamentos, tendo um enrolamento de baixa tensão em triângulo e o outro em estrela isolada, com o enrolamento de alta tensão conectado em estrela aterrada [8].

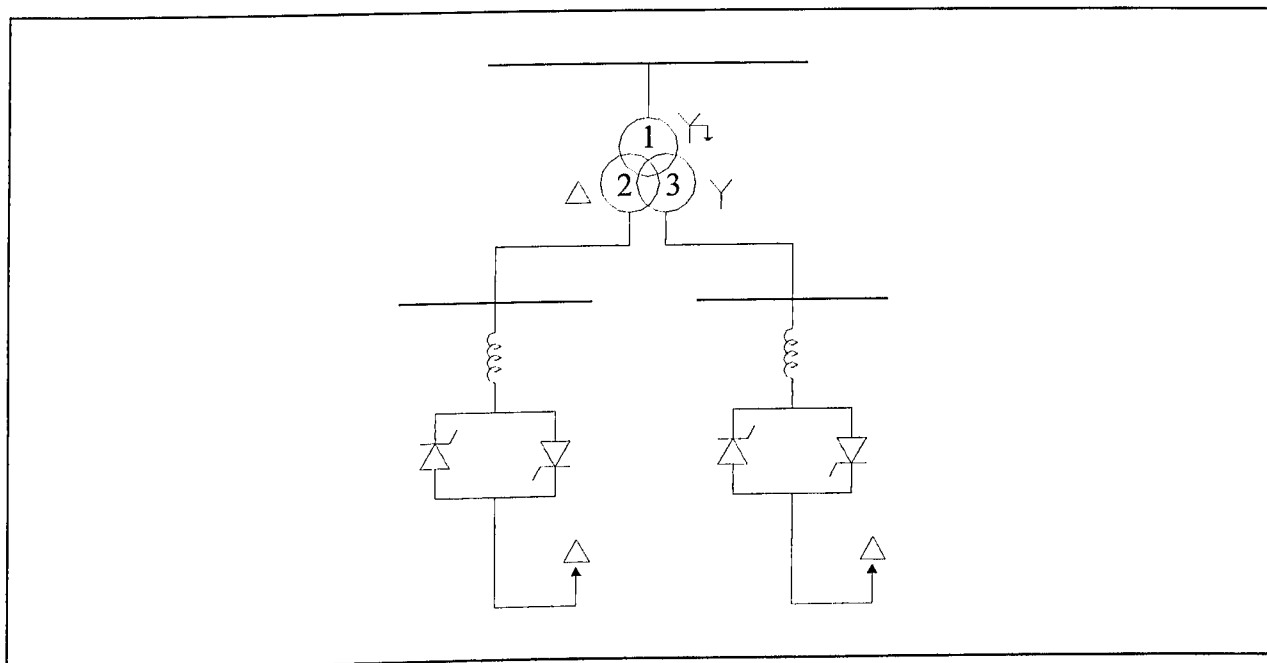


Figura 2.13 - Arranjo de doze pulsos.

Deste modo, as correntes harmônicas de ordem 5, 7, 17, 19, etc. ( $6k \pm 1$ , para  $k$  ímpar) de cada RCT de seis pulsos, ao se encontrarem no primário do transformador, cancelar-se-ão. Assim, um arranjo de doze pulsos, perfeitamente balanceado, terá como harmônica de menor ordem a 11ª, seguindo-se a 13ª, a 23ª, 25ª, etc. eliminando a necessidade de filtros na maioria das aplicações.

Do que foi apresentado até o momento neste capítulo, ficou constatada a importância do controle do ângulo de disparo para os tiristores de um RCT. Na prática, este ângulo é calculado e distribuído aos tiristores por um sistema de controle adequado. Todo RCT é dotado de um sistema de controle que varia de acordo com a aplicação e a filosofia do fabricante. Mediante este fato, o item a seguir destina-se a apresentar um sistema de controle típico de um compensador estático do tipo reator controlado a tiristores (RCT) [1]. Trata-se de um controle em “malha fechada”, que adota o sistema clássico de realimentação para controlar o perfil de tensão de um barramento. Com base neste sistema de controle serão apresentadas as curvas características de tensão versus corrente de um RCT.

### **2.3 - CARACTERÍSTICA E DESEMPENHO DE UM RCT**

Na maioria das aplicações o RCT atua como um regulador de tensão. Isto é, o parâmetro a ser controlado é a tensão de uma determinada barra de um sistema elétrico. Outras grandezas também podem ser controladas, tais como [1]:

- Fluxo de potência reativa em uma linha ou no próprio RCT;
  - Taxa de variação do fluxo de potência;
  - Desvio do ângulo de tensão.
-

O princípio de controle é um erro de tensão que é usado para variar a susceptância do RCT até que o erro de tensão assuma um valor aceitável.

A figura 2.14 mostra um diagrama de blocos de um sistema de controle de tensão para RCT [1] que possui dois sinais de entrada: a tensão  $U$  e a corrente  $I$ . O sistema de medição recebe os sinais de tensão e corrente da barra controlada através de enrolamentos secundários de transformadores de potencial e corrente. A partir daí estas tensões são filtradas e em seguida retificadas. A saída do retificador contém um filtro CC que elimina os harmônicos característicos produzidos durante a retificação. Desta forma, a saída do sistema de medição apresentará um valor  $V$  (contínuo) sem “ripples” e este sinal será proporcional à tensão a ser controlada,  $U$ .

A tensão  $V$  é injetada em um somador, juntamente com a tensão de referência,  $V_{ref}$ . Da comparação destes dois sinais obtém-se o erro de tensão,  $\Delta V$ , que é submetido a um controlador, cuja saída é o ângulo de disparo  $\alpha$  para os tiristores do circuito de potência do RCT. O valor do ângulo  $\alpha$  aumentará ou diminuirá até que  $\Delta V$  seja zero, ou seja  $V = V_{ref}$ .

---

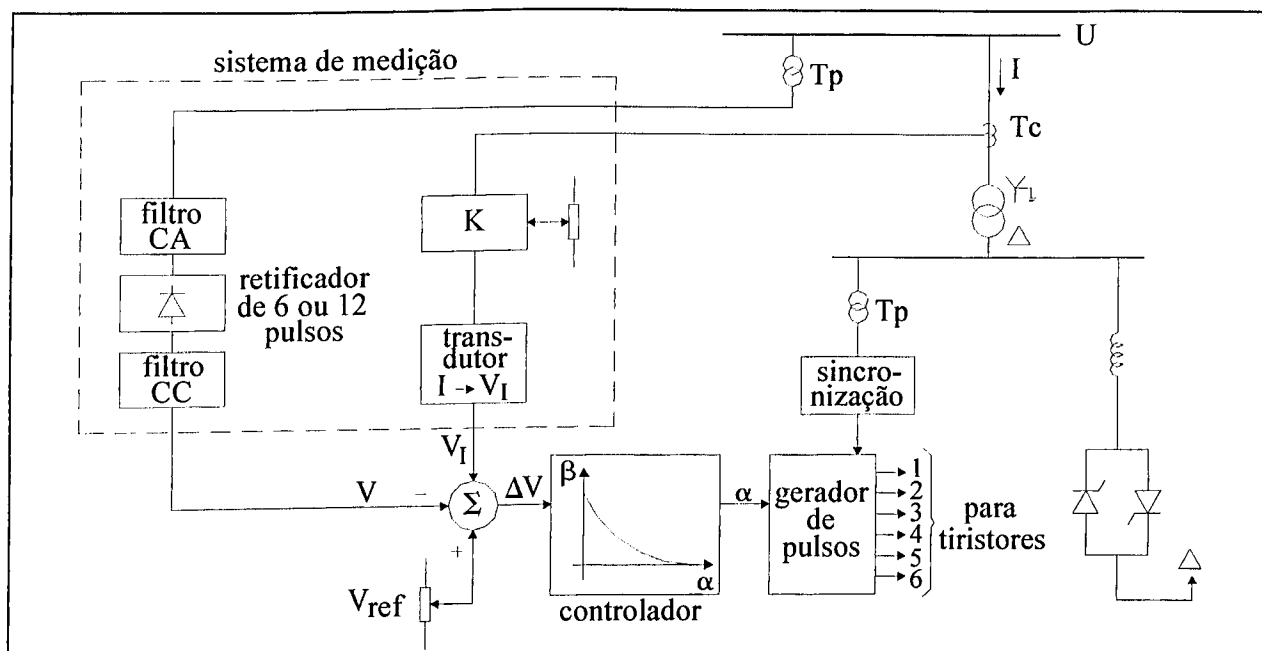


Figura 2.14 - Diagrama de blocos de um sistema de controle para RCT.

Prosseguindo-se na figura 2.14, verifica-se que o ângulo  $\alpha$  (saída do controlador) corresponde ao valor desejado para a susceptância do RCT. A relação entre estas duas grandezas é altamente não linear, como já ilustrado na figura 2.9. Uma vez definido o valor de referência para o ângulo  $\alpha$ , este é injetado no bloco de geração de pulsos, cuja função é a de gerar os pulsos adequados para os tiristores.

Embora os pulsos sejam gerados e distribuídos pelo gerador de pulsos, os instantes para o envio do trem de pulsos são determinados pelo sistema de sincronização.

O sistema de sincronização (identificado na figura 2.14) recebe como entradas as tensões trifásicas da barra do RCT através de enrolamentos secundários de transformadores de potencial. A partir daí, as tensões são submetidas a um circuito oscilador denominado “phase locked loop”. A função deste oscilador é a

de gerar uma tensão em sincronia com a tensão da barra do RCT, porém altamente insensível aos seus distúrbios. Desta forma, os cruzamentos por zero da tensão de cada fase do RCT são facilmente identificados através do sinal de saída do oscilador da fase correspondente.

O instante do disparo de cada tiristor (por exemplo do tiristor 1, identificado na figura 2.10) é definido após ter decorrido um intervalo de tempo  $\Delta T$  a partir de um valor nulo da tensão (no caso da figura 2.10, a tensão entre as fases A e B, mais especificamente na transição do seu semiciclo negativo para positivo). A relação entre o intervalo de tempo  $\Delta T$  e o ângulo  $\alpha$  é a seguinte:

$$\Delta T = \frac{\alpha}{360} \times \frac{1}{f} \quad (2.15)$$

Onde:

$f$  é a frequência do sistema, em Hz;

$\alpha$  é o ângulo de atraso no disparo, em graus;

$\Delta T$  é o intervalo de tempo, em segundos.

Outra questão importante que deve ser mencionada com relação ao diagrama de blocos da figura 2.14, refere-se à utilização do sinal de corrente,  $I$ . Este sinal pode ser usado por vários objetivos. No caso ora ilustrado, que é o de controle da tensão  $U$ , a realimentação da corrente não é necessariamente requerida. Entretanto, na maioria das aplicações, quando é desejável ter um pouco de inclinação na característica  $U/I$  (para que o limite máximo do RCT não seja atingido facilmente), usa-se um sinal adicional,  $V_I$ , proporcional à corrente  $I$  o qual é adicionado a  $V$ .

---



A tensão  $V_I$  tem sinais opostos para a corrente adiantada e atrasada. Se a corrente for capacitiva  $V_I$  será negativo. Como o RCT ilustrado na figura 2.14 só absorve reativos, a corrente  $I$ , neste caso, será sempre indutiva e portanto  $V_I$  terá sinal positivo. A variação da inclinação da curva  $U/I$  é obtida através do ajuste do ganho  $K$  da realimentação de corrente. O valor do parâmetro  $K$  normalmente situa-se entre 0 e 10 % [13] e representa o estatismo do regulador.

Diante do exposto, se a realimentação da corrente for considerada, o sinal de saída do somador (figura 2.14) passa a ser obtido de acordo com a equação (2.16).

$$\Delta V = V_{\text{ref}} - V + V_I \quad (2.16)$$

Sendo  $V$  proporcional à tensão da barra a ser controlada ( $U$ ) e  $V_I$  proporcional à corrente  $I$ , onde  $V_I = K.I$ . A equação pode ser reescrita novamente da seguinte forma:

$$\Delta V = V_{\text{ref}} - U + K \times I \quad (2.17)$$

Conforme já citado, o regulador somente deixa de alterar o valor do ângulo  $\alpha$  quando o erro de tensão  $\Delta V$  é zero. Nestas condições, em regime permanente, o valor eficaz da tensão da barra controlada pelo RCT será:

$$U = V_{\text{ref}} + K \times I \quad (2.18)$$

---



onde:

$U$  e  $I$  são, respectivamente, a tensão e a corrente eficaz medidas da barra controlada, em [p.u.];

$V_{ref}$  é o valor desejado para a tensão da barra controlada, em [p.u.];

$K$  é o parâmetro que define a inclinação da curva  $U/I$ , em [%].

A equação (2.18) descreve analiticamente a curva característica  $U/I$  de um RCT, cuja representação gráfica está ilustrada na figura 2.15.

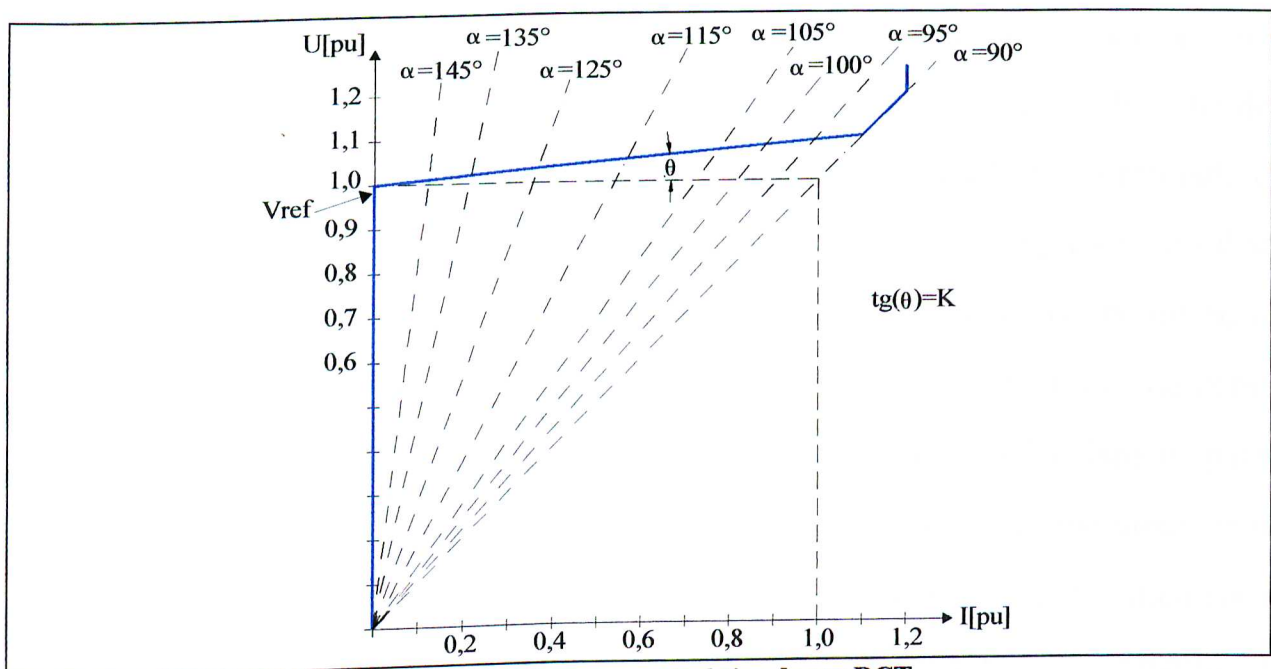


Figura 2.15 - Curva característica de um RCT.

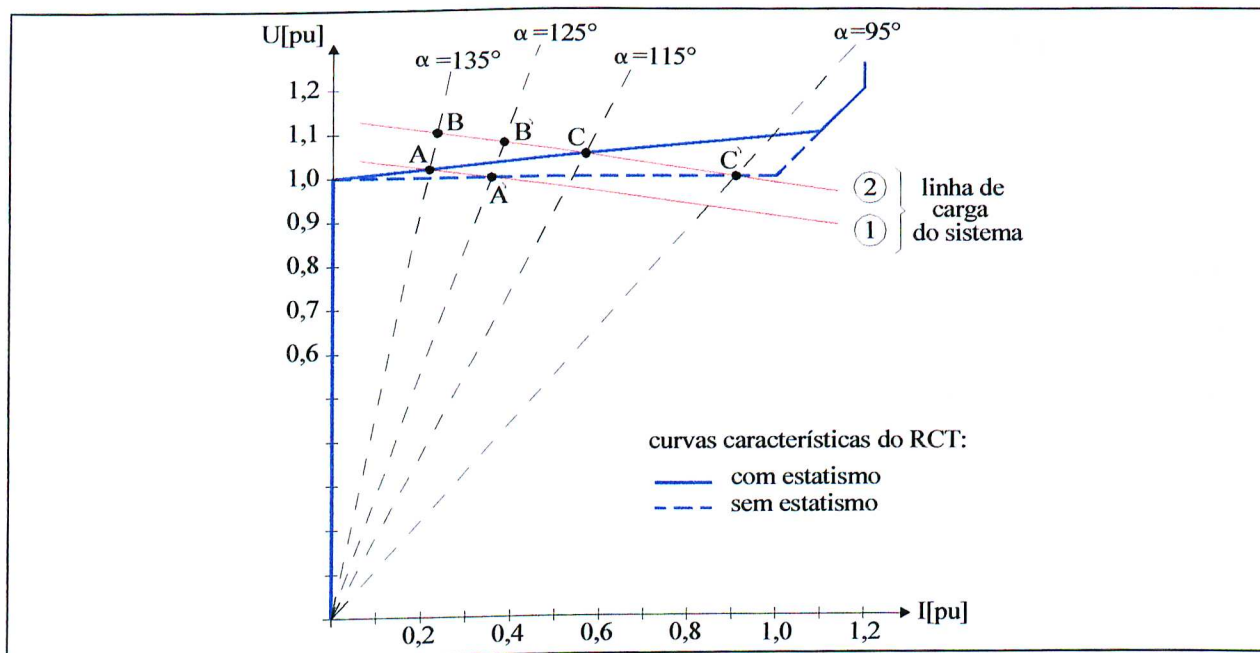
Na figura 2.15 está representada a curva característica com uma certa inclinação. Conforme citado anteriormente, o ajuste desta inclinação é conseguido através do parâmetro  $K$ . Se  $K = 0$ , diz-se que a curva característica possui estatismo nulo. Neste particular, a curva passa a ser uma reta paralela ao eixo da corrente,  $I$ , e o seu valor será igual a  $V_{ref}$  até a corrente,  $I$ , alcançar o valor 1 p.u.. A partir daí

atinge-se a potência máxima de absorção do reator. Nestas condições o RCT atua como um reator fixo, que não mais controla a tensão. A relação  $V = f(I)$  volta a ser linear, de acordo com a lei de OHM ( $V = X.I$ ).

A título de exemplificação, a figura 2.16 mostra a atuação do sistema de controle introduzido na figura 2.14, com e sem estatismo na curva característica do RCT.

A interseção da linha de carga do sistema com a curva característica do RCT define o chamado ponto de operação. Desta forma, para a curva característica com estatismo, o RCT estava operando em regime permanente no ponto A, com ângulo de disparo  $\alpha = 135^\circ$ . Neste instante, por uma razão qualquer, ocorre uma súbita variação na tensão  $U$  da barra controlada, causando a mudança da linha de carga do sistema de 1 para 2. Conseqüentemente, a tensão da barra controlada é elevada para  $U_B$  (ponto B) pois a variação de tensão foi muito rápida e não deu tempo do sistema de controle alterar o ângulo  $\alpha$ . Porém, a partir do ponto B, o sistema de controle começa a diminuir o ângulo de disparo  $\alpha$  na tentativa de zerar o erro de tensão, o qual é alcançado no ponto C (com  $\alpha = 115^\circ$ ). Isto é, para voltar a operar em regime permanente, o sistema de controle teve que diminuir o ângulo  $\alpha$  de  $20^\circ$ . Estendendo o mesmo raciocínio para a curva característica com estatismo nulo, verifica-se que para percorrer o “caminho” (A'B'C'), o ângulo de disparo variou de  $125^\circ$  à  $95^\circ$ , ou seja, sofreu uma variação de  $30^\circ$ . Sem estatismo, a tensão voltou a ter o mesmo valor que possuía antes da perturbação (1,0 p.u.).

---



Com estatismo na curva característica do RCT, a tensão no ponto C se estabilizou com um valor superior ao que possuía no ponto A. Isto ocorreu porque tanto em A como em C o sistema se encontra em regime permanente, o que significa erro de tensão igual a zero. Nestas condições, sendo  $I_C > I_A$ , conclui-se através da equação (2.18) que  $U_C > U_A$ . Por outro lado, a corrente no ponto C é menor do que a do ponto C', isto é, com estatismo nulo, as perdas serão maiores. Além disso, o limite máximo do RCT ficou mais próximo de ser atingido. Naturalmente, se o controle da tensão,  $U$ , não exigir uma grande precisão, a curva com estatismo é a mais indicada para a operação do RCT, sendo possível ajustar a tolerância da variação da tensão através do parâmetro  $K$ .

O próximo item tem por objetivos identificar as vantagens que se obtém quando o RCT é associado com capacitores em paralelo.

## **2.4 - REATOR CONTROLADO A TIRISTORES COM CAPACITORES EM PARALELO**

Este arranjo é útil quando se deseja flexibilidade para, além de absorver, gerar reativos. Os capacitores podem ser dos tipos fixo ou chaveado (mecanicamente ou por tiristores). Algumas instalações utilizam capacitores dos três modos citados.

### **2.4.1 - ARRANJO COM CAPACITORES FIXOS**

Este tipo de compensador está ilustrado na figura 2.17. Os capacitores fixos podem ter reatores em série de tal forma que filtros sintonizados são obtidos para determinadas frequências harmônicas geradas pelo próprio RCT. A potência total dos bancos de capacitores é calculada para suprir a máxima solicitação de reativos que se pode prever. Já o RCT tem, normalmente, uma potência nominal maior que a dos bancos de capacitores, o que permite uma eventual compensação indutiva [6].

---

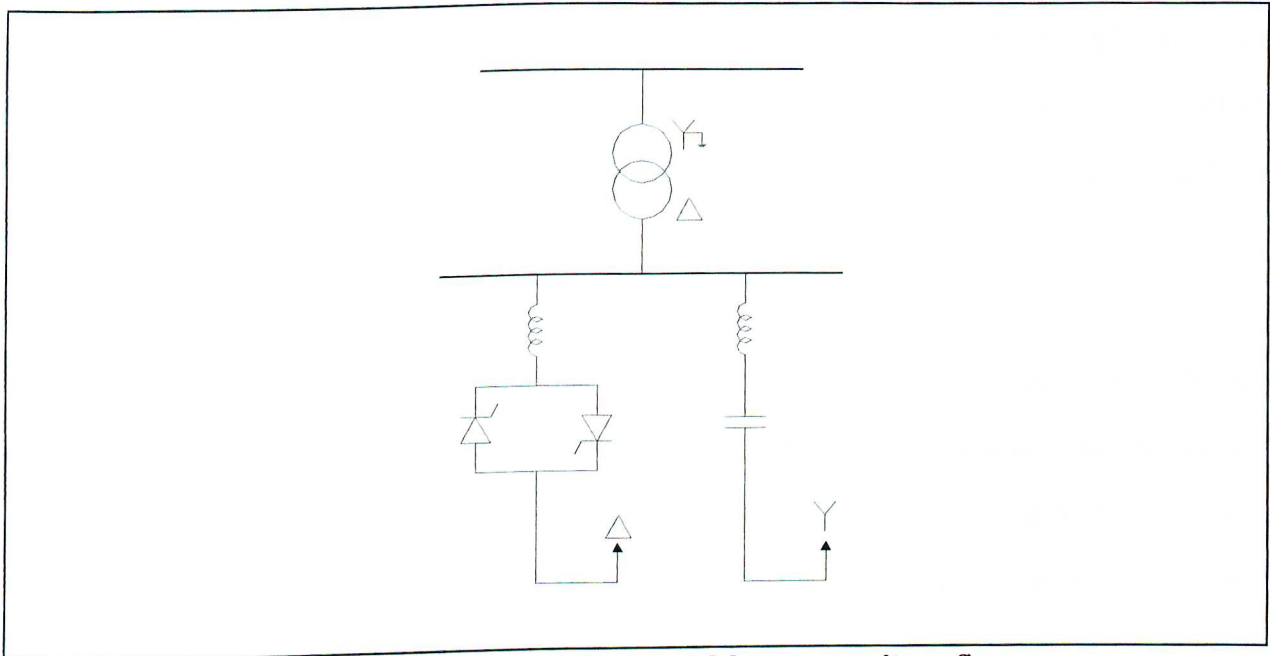


Figura 2.17 - RCT conectado em paralelo com capacitores fixos.

A figura 2.18 ilustra o efeito da introdução de capacitores fixos junto a um RCT.

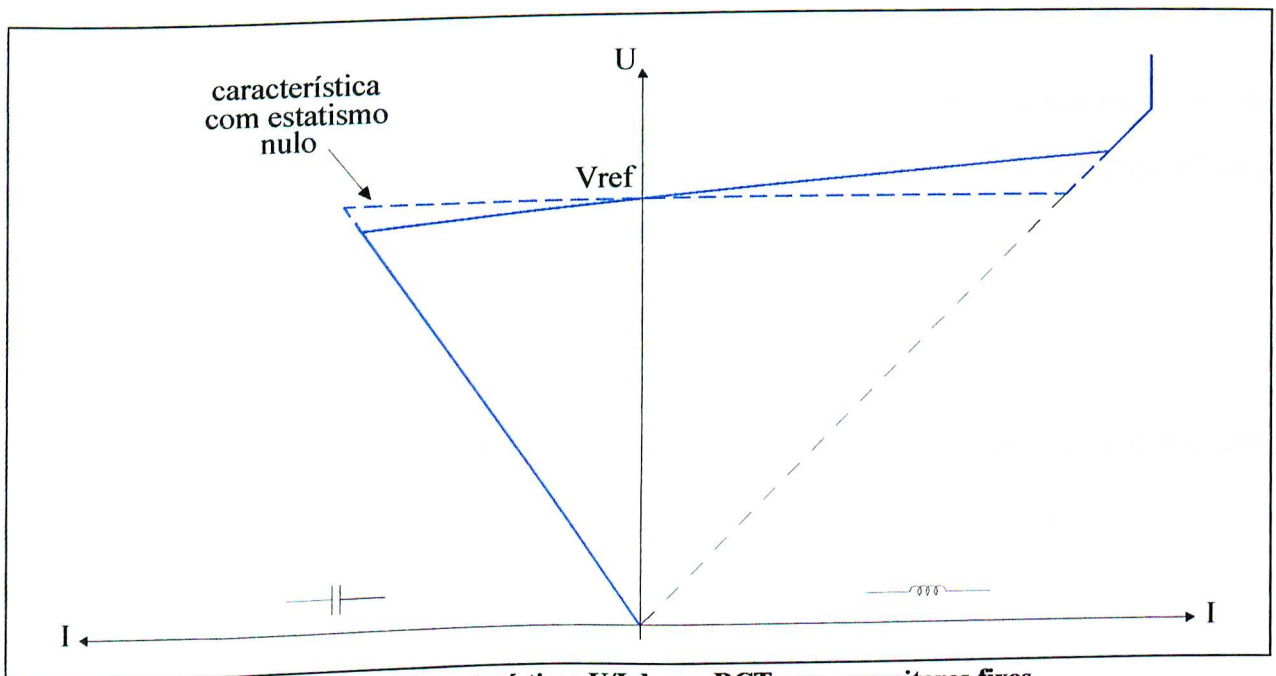


Figura 2.18 - Características U/I de um RCT com capacitores fixos.

Para uma operação em que o valor da potência reativa seja nulo ( $I = 0$  na figura 2.18), o RCT será controlado pelos tiristores a um nível em que ele absorva todo

o reativo gerado pelo capacitor. Havendo necessidade de maior geração de reativo, o ângulo  $\alpha$ , de disparo do RCT, é aumentado. Desta forma, o capacitor injetará maior potência reativa no sistema pois o reator absorverá menor reativo agora.

Este tipo de compensador perde em eficiência quando a corrente resultante do arranjo é nula ou indutiva. Neste caso, todo o reativo produzido pelo banco de capacitores é absorvido pelo RCT e isto não produz nenhuma vantagem para o sistema como um todo. Este problema, no entanto, é atenuado quando parte dos capacitores possui chaveamento.

#### **2.4.2 - ARRANJO COM CAPACITORES FIXOS E CHAVEADOS**

Este tipo de arranjo é o mais flexível pois permite várias combinações de equipamentos compensadores de reativo. Os capacitores podem ser subdivididos em bancos menores, para maior flexibilidade.

A figura 2.19 mostra um diagrama esquemático no qual o RCT está conectado em paralelo com capacitores fixos e chaveados (mecanicamente e por tiristores).

---

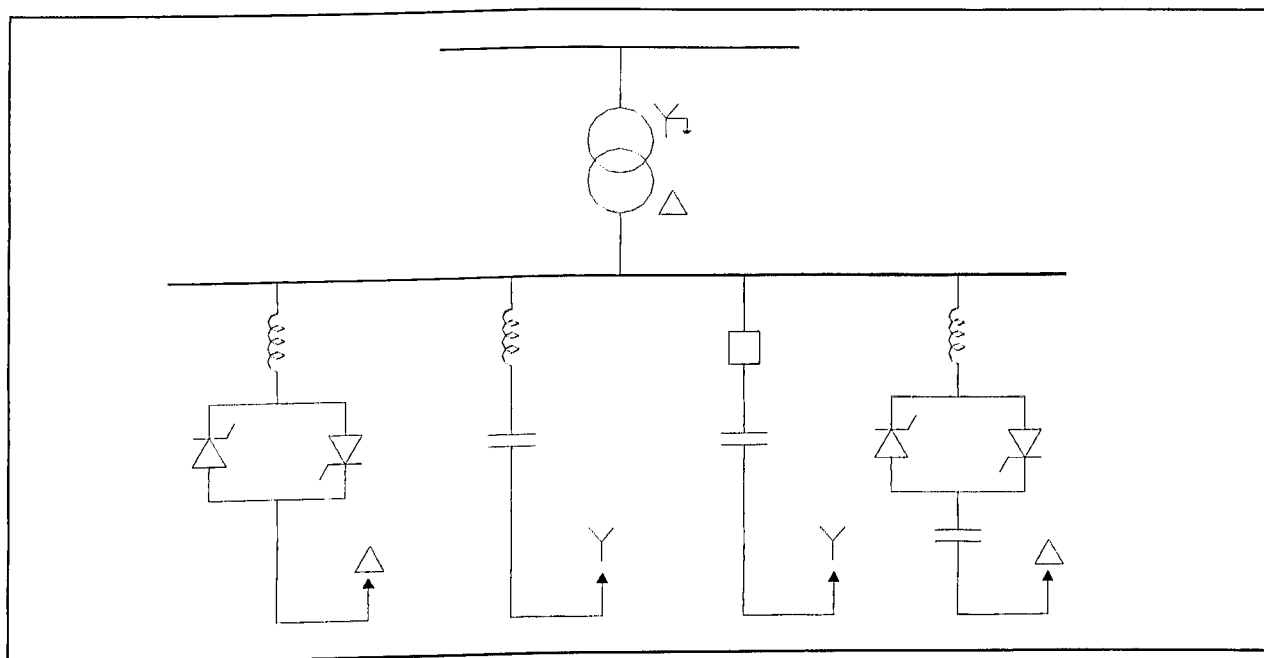


Figura 2.19 - RCT associado em paralelo com capacitores fixos e chaveados.

O chaveamento de capacitores por meio de tiristores foi desenvolvido visando diminuir dois problemas existentes nos esquemas com capacitores fixos: perdas e desempenho durante distúrbios. Os distúrbios, em sistemas de potência, são ditos “grandes” quando a demanda reativa excede a faixa de controle linear de um compensador. Estes distúrbios são caracterizados por rápidas variações de tensão. Nos compensadores com RCT e capacitores fixos o arranjo será sempre visto como um circuito paralelo LC o qual, durante grandes distúrbios, estabelecerá oscilações com a impedância do sistema CA. Estas oscilações podem provocar transitórios de tensão com grandes magnitudes, especialmente se este distúrbio é seguido de rejeição de carga, e pode também interferir no controle do compensador.

Já os compensadores com RCT com capacitores chaveados a tiristores (CCT), tendo a propriedade de poderem ter seus capacitores chaveados rapidamente sem provocarem significantes distúrbios no sistema, podem evitar aquelas



indesejáveis oscilações. Outra vantagem do chaveamento por meio de tiristores está vinculada às perdas. Em um RCT com capacitores fixos, as perdas aumentam com a corrente. Mais precisamente, estas crescem com a corrente do compensador variando de “capacitiva” para “indutiva”. Na condição de neutralidade (zero MVar) as perdas já são significativas devido à circulação de corrente entre o capacitor fixo e o RCT. Já no arranjo com CCT, na mesma condição de neutralidade, bastará que todos os reatores e capacitores sejam desconectados do sistema.

Os bancos de capacitores chaveados mecanicamente (por exemplo, através de disjuntores) possibilitam a compensação de potência reativa de forma discreta através das diversas seções de bancos capacitivos operadas por meio de disjuntores. Este tipo de compensação é utilizada em cargas cuja variação de potência reativa é relativamente lenta devido à inércia do elemento eletromecânico. Além disso, o chaveamento mecânico de capacitores pode criar elevados transitórios de corrente devido ao fato do fechamento do contato ocorrer com uma taxa de variação de tensão diferente de zero [14].

Segundo a referência [14], o chaveamento de capacitores por meio de tiristores apresenta diversas vantagens em relação ao chaveamento eletromecânico. A alta velocidade de chaveamento dos tiristores, comparada à dos disjuntores, assegura uma rápida compensação de reativos. Além disso, o transitório de corrente praticamente inexistente uma vez que os capacitores são chaveados quando sua tensão é igual à de alimentação e quando a corrente atinge o cruzamento natural do zero, isto é, os capacitores são conectados à rede quando a tensão da mesma atinge os valores máximo ou mínimo. Naturalmente, para evitar elevada corrente

---



nos tiristores, os capacitores devem estar carregados com o valor máximo ou mínimo da tensão da rede antes que a conexão seja efetuada. A desconexão é automaticamente efetuada se não forem aplicados pulsos de disparo ao tiristor no cruzamento do zero da corrente e o capacitor permanece carregado no valor máximo ou mínimo da tensão da rede. O máximo atraso teórico para conectar o capacitor é de um ciclo (supondo que esteja carregado com tensão máxima quando o próximo valor de derivada nula da tensão é o de tensão mínima e vice-versa) enquanto que o tempo máximo para desconectá-lo é de meio ciclo (uma vez efetuado o disparo, o capacitor só pára de conduzir meio ciclo após o tempo de disparo quando a corrente se extingue normalmente). Este método ainda permite a compensação de desequilíbrios na carga. Contudo, alguns inconvenientes são característicos deste sistema de compensação: para limitar a corrente e o gradiente da corrente nos tiristores é necessário carregar os capacitores e só permitir seu acoplamento à rede quando sua tensão de carga for igual à tensão máxima ou mínima da rede. Devido a este fato, a corrente no capacitor não pode ser regulada de forma contínua como a do RCT. Para regular a potência reativa da instalação são então necessários diversos bancos de capacitores controlados por tiristores. Naturalmente, a medida que cresce o número de bancos capacitivos a precisão da compensação aumenta mas os custos de chaveamento tornam-se elevados.

A figura 2.20 ilustra o chaveamento de um CCT em três diferentes situações, onde a tensão residual do capacitor,  $V_{CO}$ , é : (a) igual; (b) menor e (c) maior que o valor de pico da tensão instantânea do sistema,  $v$ . Quando um pulso de disparo coloca um tiristor em condução, o capacitor é conectado ao sistema. No início do

---

meio-ciclo seguinte da corrente, o outro tiristor (colocado em anti-paralelo com o primeiro) é acionado e a corrente prossegue através do capacitor.

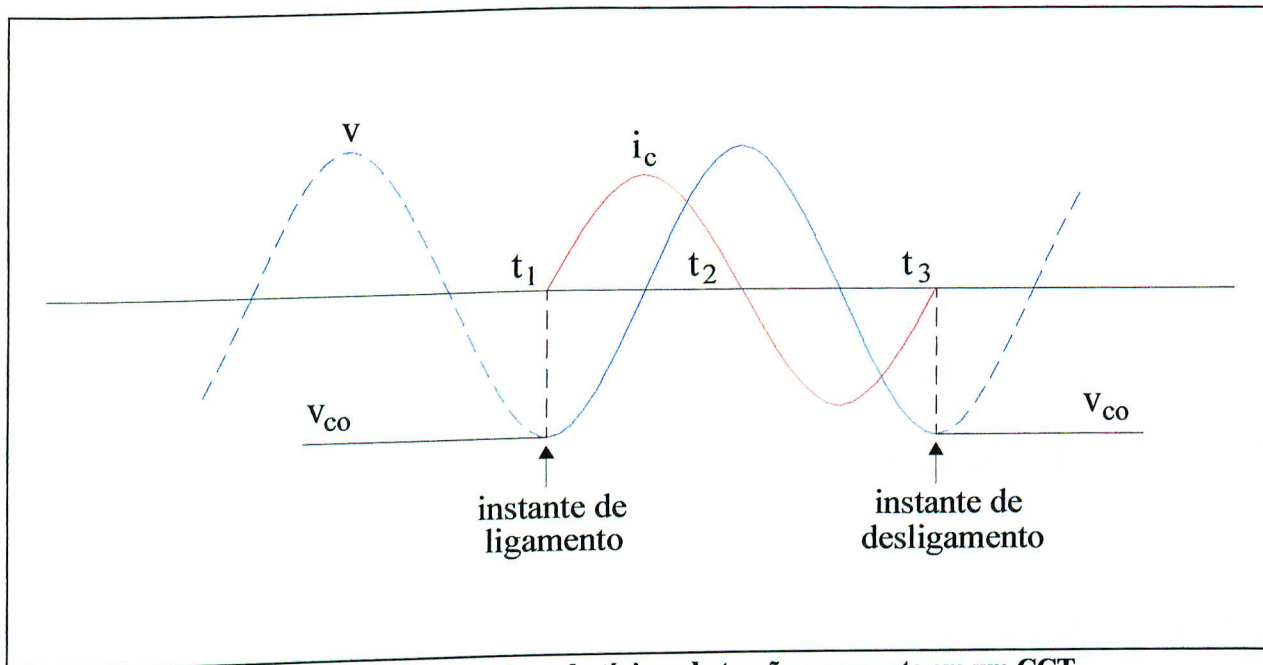


Figura 2.20 (a) - Formas de onda típicas de tensão e corrente em um CCT.

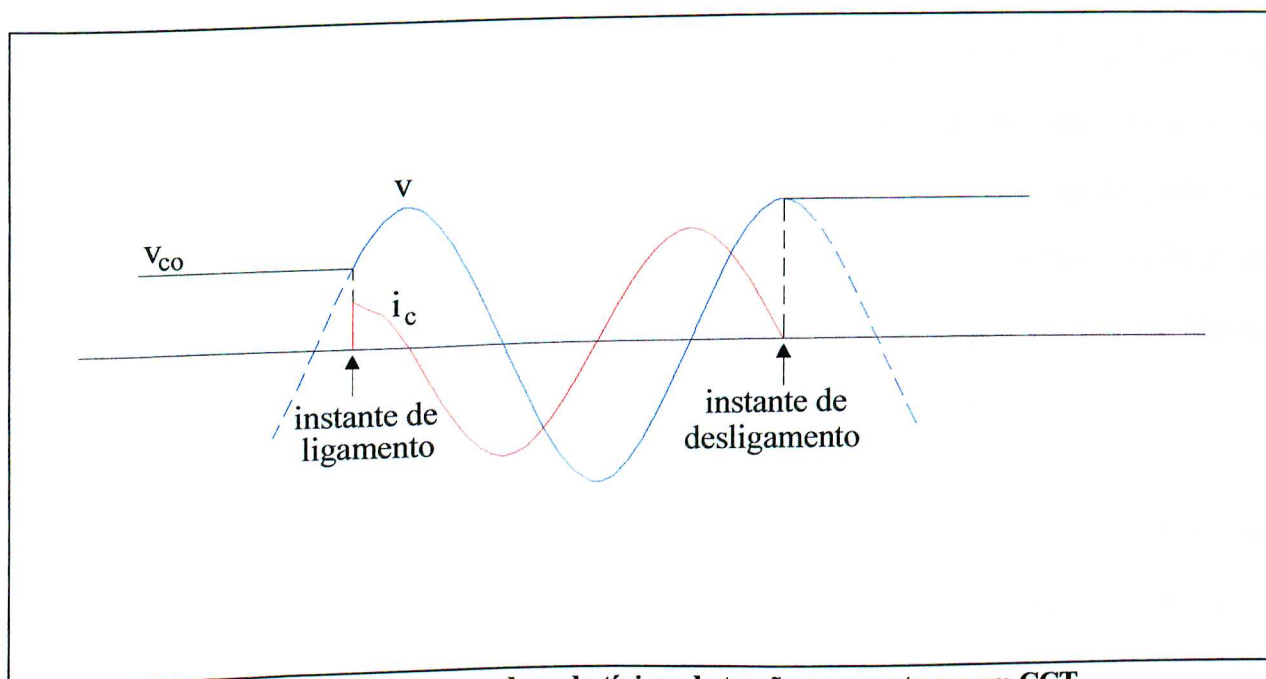


Figura 2.20 (b) - Formas de onda típicas de tensão e corrente em um CCT.

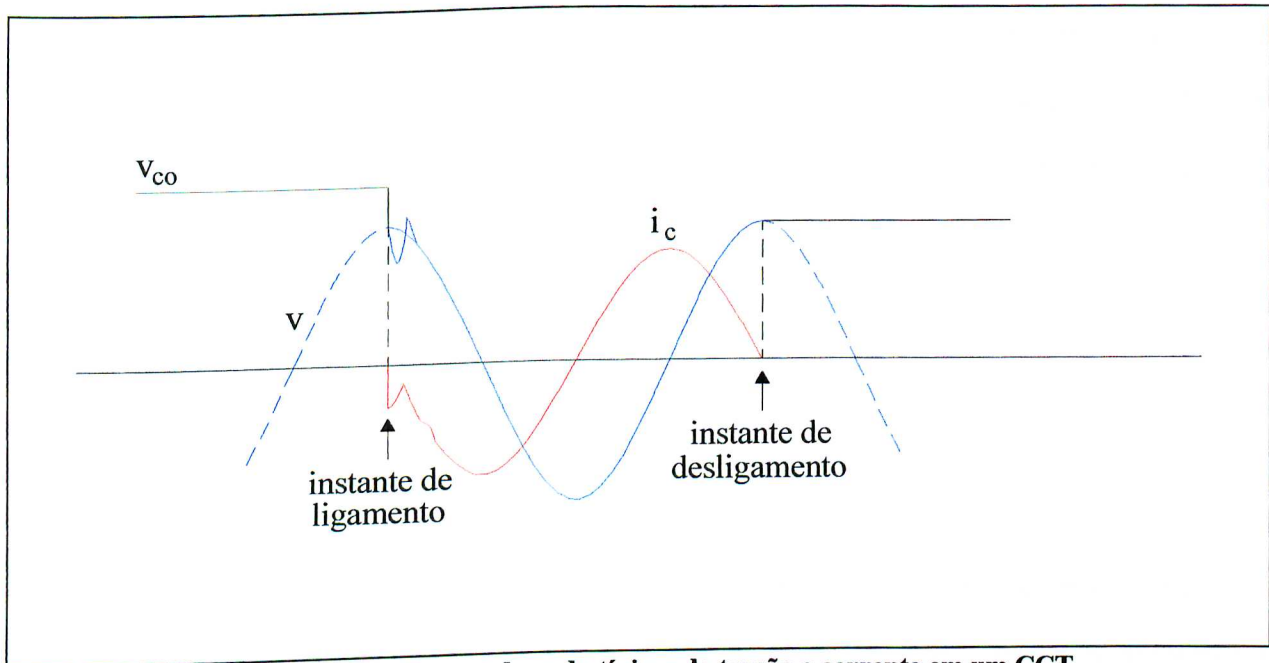


Figura 2.20 (c) - Formas de onda típicas de tensão e corrente em um CCT.

A figura 2.20(a) corresponde à situação ideal para a operação do CCT. No instante  $t_1$  a tensão do sistema,  $v$ , é igual à tensão residual do capacitor,  $v_{co}$ . Neste instante  $t_1$  é disparado o tiristor que conduz no semiciclo positivo da corrente  $i_c$  até o tempo  $t_2$ . Em  $t_2$  o outro tiristor recebe o sinal de condução. Usualmente o acionamento é dado por um trem de pulsos. Se, entre os instantes  $t_2$  e  $t_3$  o controle detectar que o banco precisa “sair” do sistema, então o trem de pulsos é cessado. A válvula tiristorizada, porém, conduzirá até que a corrente  $i_c$  caia para um valor abaixo da sua corrente mínima de condução. Isto ocorre em  $t_3$ . Neste instante a válvula é desligada, com o capacitor permanecendo carregado.

Quando a válvula tiristorizada é recolocada em serviço, a tensão residual do capacitor,  $v_{co}$ , poderá ser maior ou menor do que aquela do sistema,  $v$ . Se isto ocorrer, surgirão correntes transitórias até que as duas tensões se igualem, conforme ilustram as figuras 2.20(b) e (c). Para reduzir a taxa de variação da

corrente de “inrush” no capacitor são colocados reatores em série com os capacitores do CCT (figura 2.19). Outra razão para o surgimento das correntes de “inrush” é a possibilidade da ocorrência de ressonâncias entre o capacitor e o sistema CA.

## 2.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo procurou, de uma forma sucinta, apresentar as características fundamentais dos compensadores estáticos de reativos do tipo reator controlado a tiristores. O princípio de funcionamento deste equipamento foi inicialmente baseado em sua estrutura monofásica, onde foram desenvolvidas as principais equações que regem a sua operação no tocante à absorção de energia reativa. Em seguida foram ilustrados os principais arranjos trifásicos de RCT's empregados nos sistemas elétricos. Estes arranjos visaram principalmente a redução dos níveis harmônicos produzidos pelos RCT's e a possibilidade, em algumas configurações, de também gerar reativos para o sistema.

Outro aspecto importante abordado neste capítulo, foi a introdução de um sistema de controle para RCT, onde foi mostrado o seu princípio de funcionamento, desde a aquisição dos sinais medidos até o instante de disparo dos tiristores. O enfoque destinado a este sistema de controle foi o de proporcionar uma noção mais objetiva do que vem a ser um compensador estático de reativos do tipo RCT como um todo, além de facilitar o entendimento do assunto a ser discutido no próximo capítulo.

---

## ***CAPÍTULO III***

### ***MODELAGEM DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO DO TIPO RCT PARA SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS***

#### **3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

De um modo geral, a utilização de compensadores estáticos (C.E.) num sistema de potência é necessariamente antecedida por estudos detalhados para que o equipamento seja dimensionado e ajustado corretamente. Neste sentido, existem alguns *softwares* dedicados a estudos específicos, tais como: transitórios eletromagnéticos, harmônicos, fluxo de carga, etc. Diante da crescente necessidade de tais análises, é extremamente interessante que uma única ferramenta computacional seja capaz de realizar os mais diferentes estudos associados à engenharia elétrica. Neste particular, destaca-se o Simulador “Saber” que propicia, através de uma linguagem própria, denominada “MAST”, a modelagem no domínio do tempo de qualquer componente elétrico, mecânico, etc. Dentre as suas principais características, destacam-se: capacidade de fazer um elo entre rotinas elaboradas em linguagem C e Fortran, versatilidade gráfica

---

que permite ao usuário a manipulação dos resultados de saída, grande facilidade de implementação de novas rotinas (sendo estas usualmente designadas por “Templates”).

Este capítulo tem por meta apresentar um modelo digital do reator controlado a tiristores (atualmente o mais destacado compensador estático) desenvolvido no Simulador “Saber”, com flexibilidade suficiente para representar, sem maiores dificuldades, novos recursos ou alterações daqueles existentes, permitindo, deste modo, analisar diferentes filosofias de controle e proteção.

### **3.2 - CONFIGURAÇÃO DO RCT A SER INCORPORADO NO SIMULADOR “SABER”**

Embora se reconheça a existência de vários compensadores estáticos constituídos a partir de diferentes topologias e controles (externos ou intrínsecos), esta dissertação tratará do reator controlado a tiristores (RCT) associado ao capacitor chaveado por tiristores (CCT), por ser esta uma combinação de controle mais genérica e completa. Tal arranjo está ilustrado na figura 3.1.

Para efeito de análise, a modelagem baseia-se no C.E. representado pela figura 3.1 e encontra-se dividida em quatro grupos distintos, a saber:

- *Unidade de Potência;*
  - *Unidade de Medição;*
  - *Unidade de Controle;*
  - *Unidade de Distribuição dos Pulsos de Disparo.*
-

Estas unidades que serão detalhadas no próximo item, estão interrelacionadas através de seus sinais de entrada e saída, conforme se observa no esquema dado pela figura 3.2.

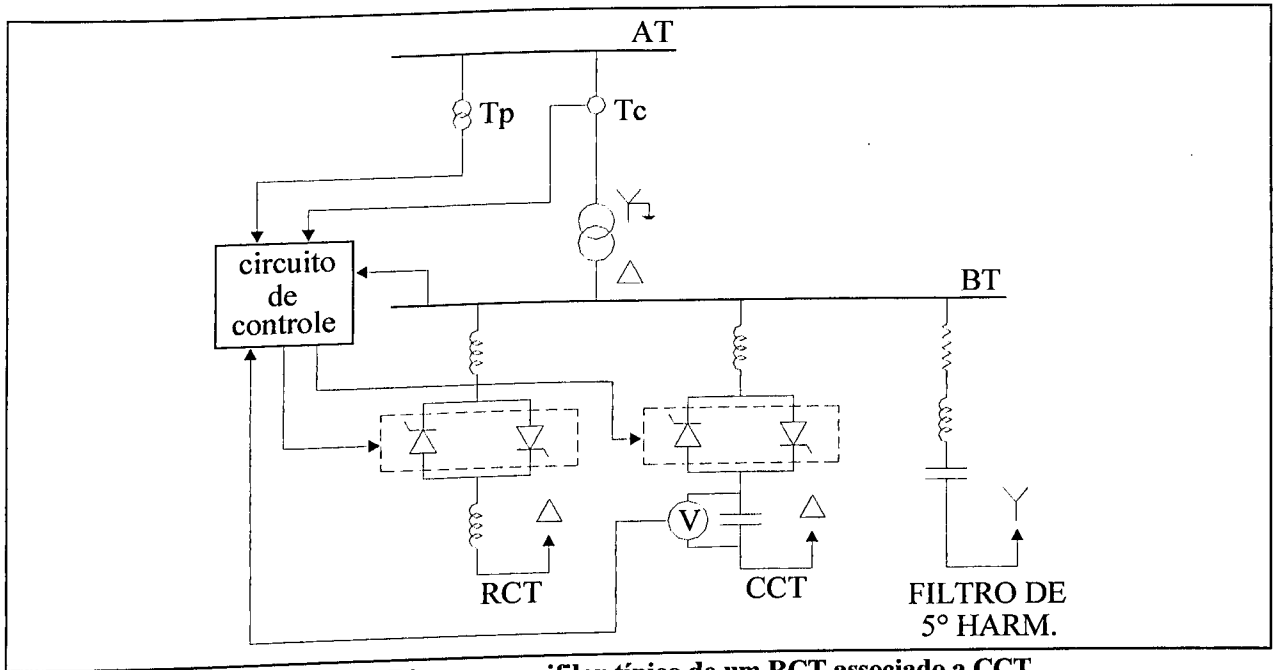


Figura 3.1 - Diagrama unifilar típico de um RCT associado a CCT.

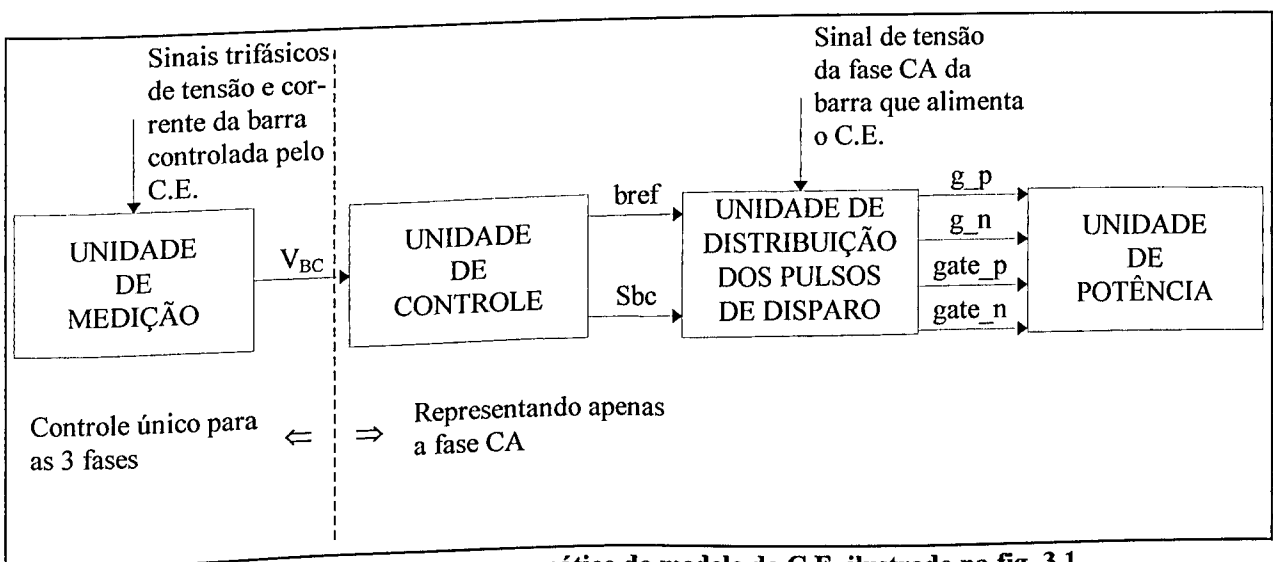


Figura 3.2 - Diagrama esquemático do modelo do C.E. ilustrado na fig. 3.1.

O modelo matemático desenvolvido para o compensador é trifásico, com as fases independentemente representadas, sendo o mesmo tratamento dispensado para as três fases. Com exceção da *Unidade de Medição*, a modelagem será desenvolvida tomando-se a fase CA como referência. Esta fase corresponde a um dos lados do triângulo formado pela conexão do RCT.

Diante de tais observações e tomando-se como base a figura 3.2, pode-se dizer que cada unidade tem a seguinte função:

*Unidade de Medição* - Formar, a partir das tensões e correntes da barra controlada, um único sinal proporcional ao seu valor eficaz de tensão. Este sinal, designado por  $V_{BC}$ , será injetado na *Unidade de Controle*, num nível de tensão compatível com o seu funcionamento.

*Unidade de Controle* - Faz a comparação entre o sinal  $V_{BC}$  e um certo valor de referência de tensão. A diferença entre estes dois sinais dá origem ao erro de tensão que, submetido a amplificadores do tipo proporcional integral (PI), fornecem à *Unidade de Distribuição dos Pulsos de Disparo*, um valor proporcional à susceptância (*bref*) desejada para o C.E.. Esta unidade também fornece a informação da ocorrência ou não de uma subtensão na barra controlada, através do sinal *Sbc*.

*Unidade de Distribuição dos Pulsos de Disparo* - Após o processamento dos sinais *bref* e *Sbc*, esta unidade envia, em sincronia com a tensão da rede, os pulsos de disparo que, aplicados nos tiristores do circuito de potência, fazem com que o reator do RCT permaneça conduzindo mais ou menos tempo em cada semiciclo, e ocorra, se necessário, a conexão ou a retirada do CCT.

---



A *Unidade de Potência* é composta pelo transformador de potência, pelas válvulas a tiristores e por elementos de circuito (resistores, indutores e capacitores).

### **3.3 - MODELAGEM**

O modelo matemático do C.E. a ser implementado segue, com algumas adaptações necessárias ao Simulador “Saber”, aquele desenvolvido na referência [5]. De acordo com [5], a implementação foi baseada no modelo físico fornecido pelo fabricante do equipamento. Desta forma, poder-se-á fazer uma análise detalhada do desempenho da filosofia de controle deste C.E. real, através de simulações computacionais. Este assunto será abordado no capítulo IV.

#### **3.3.1 - Modelagem da Unidade de Potência**

A estratégia adotada para a modelagem da *Unidade de Potência* do C.E. fundamenta-se na estrutura física do RCT e do CCT, que serão representados por subrotinas (“templates”) obtidas a partir dos seus circuitos equivalentes.

A unidade de potência compreende as válvulas a tiristores e os elementos a parâmetros concentrados (indutores, capacitores e resistores). Os tiristores e os referidos elementos R, L e C já estão internamente disponíveis no programa e a questão da modelagem do sistema completo consiste simplesmente na formação da topologia adequada. A figura 3.3 ilustra o circuito de potência do CCT,

---

enquanto que o RCT e o filtro de 5<sup>o</sup> harmônico estão representados pelas figuras 3.4 e 3.5, respectivamente. Quanto ao transformador de potência, utilizou-se o modelo já existente ([15]), que possui os enrolamentos do primário ligados em estrela-aterrada, e os do secundário em triângulo. Deve-se destacar que, tanto o transformador quanto o filtro já se encontravam incorporados junto ao Simulador “Saber” da Universidade Federal de Uberlândia, porque estes componentes foram desenvolvidos em outros trabalhos que precederam a este.

A figura 3.3 ilustra o circuito de potência do CCT, destacando também o circuito “Snubber” inserido entre os tiristores em anti-paralelo. A precaução a ser tomada, com a utilização do circuito “Snubber”, é relativa à taxa de variação de tensão  $dv/dt$  entre ânodo e cátodo, que pode provocar o disparo do tiristor mesmo sem a presença de pulsos no gatilho [14]. O circuito “Snubber” é constituído por um resistor em série com um capacitor. A finalidade do capacitor é reduzir a velocidade de crescimento da tensão sobre os terminais do tiristor quando este deixa de conduzir, enquanto o resistor limita a corrente de descarga do capacitor no tiristor, quando ocorre o seu disparo.

---

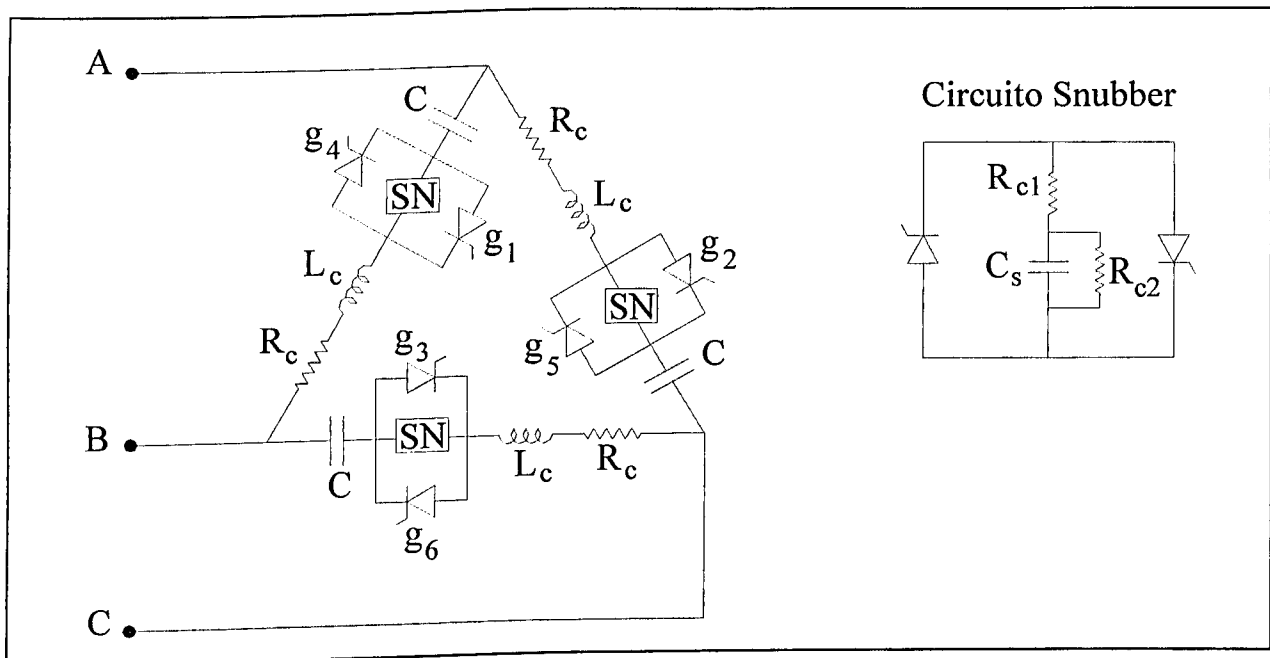


Figura 3.3 - Circuito de Potência do CCT

Onde:

$R_c$  - Resistência ôhmica de cada fase do CCT;

$L_c$  - Indutância de cada fase do CCT;

$C$  - Capacitância de cada fase do CCT;

$R_{c1}$  - Resistência ôhmica do circuito Snubber;

$R_{c2}$  - Resistência ôhmica do circuito Snubber;

$C_s$  - Capacitância do circuito Snubber;

A figura 3.4 corresponde ao circuito de potência do RCT.

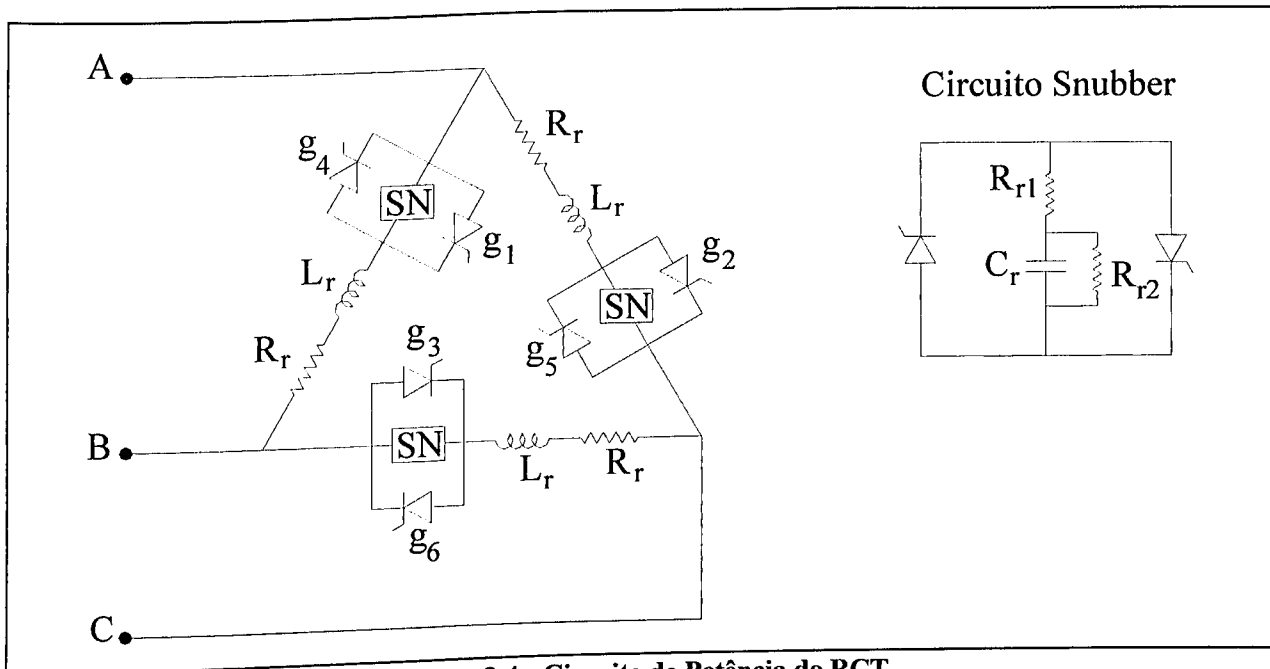


Figura 3.4 - Circuito de Potência do RCT

Onde:

- $R_r$  - Resistência ôhmica de cada fase do RCT;
- $L_r$  - Indutância de cada fase do RCT;
- $R_{r1}$  - Resistência ôhmica do circuito Snubber;
- $R_{r2}$  - Resistência ôhmica do circuito Snubber;
- $C_r$  - Capacitância do circuito Snubber;

A figura 3.5 apresenta o circuito de potência do filtro sintonizado para o 5<sup>o</sup> harmônico.

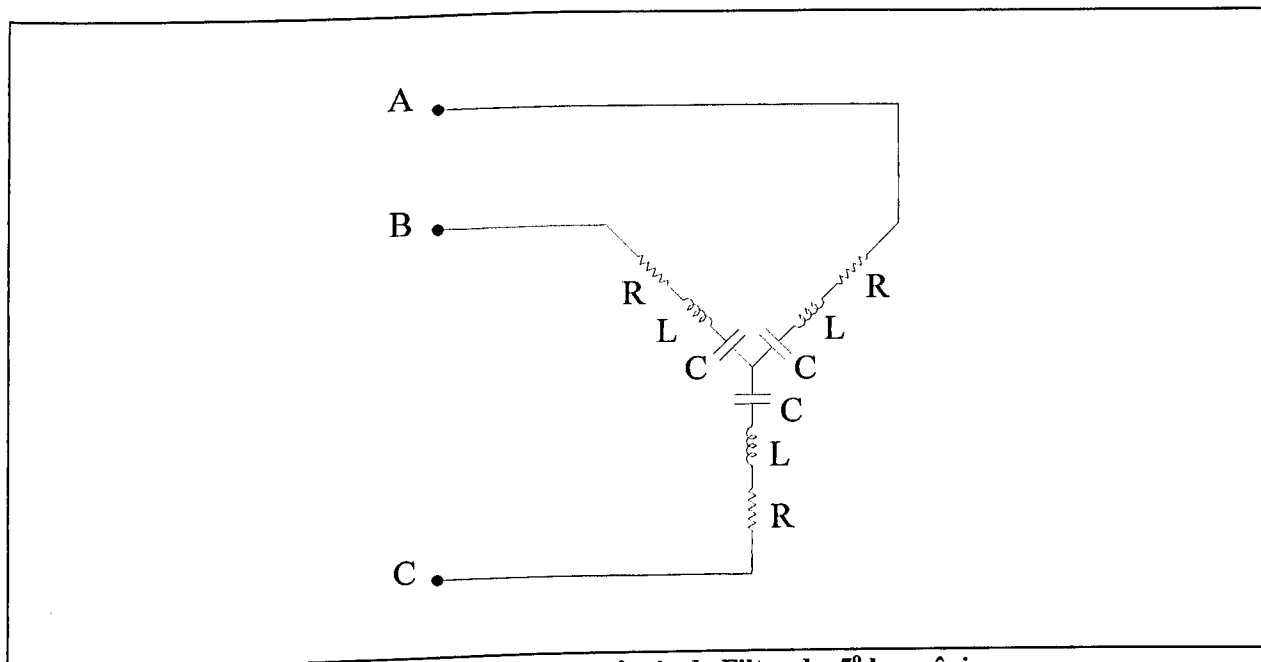


Figura 3.5 - Circuito de Potência do Filtro de 5º harmônico

Onde:

- R - Resistência ôhmica de cada fase do filtro;
- L - Indutância de cada fase do filtro;
- C - Capacitância de cada fase do filtro;

A figura 3.6 representa o diagrama unifilar de um sistema elétrico hipotético, o qual será simulado com a finalidade de apenas fornecer as representações gráficas das principais variáveis contempladas no modelo do C.E.

O referido sistema é composto de uma concessionária suprindo um C.E. em paralelo com uma carga. A transmissão da energia elétrica até a carga é realizada através de três linhas, idênticas, com 100 Km de comprimento cada. O C.E. é constituído por uma unidade de reatores controlados a tiristores (RCT) de 60

MVAr e uma unidade de capacitores chaveados por tiristores (CCT) de 60 MVAr, além de um filtro sintonizado para o 5º Harmônico de 10 MVAr. Estas unidades estão conectadas ao barramento de 230 kV, através de um transformador de 70 MVA.

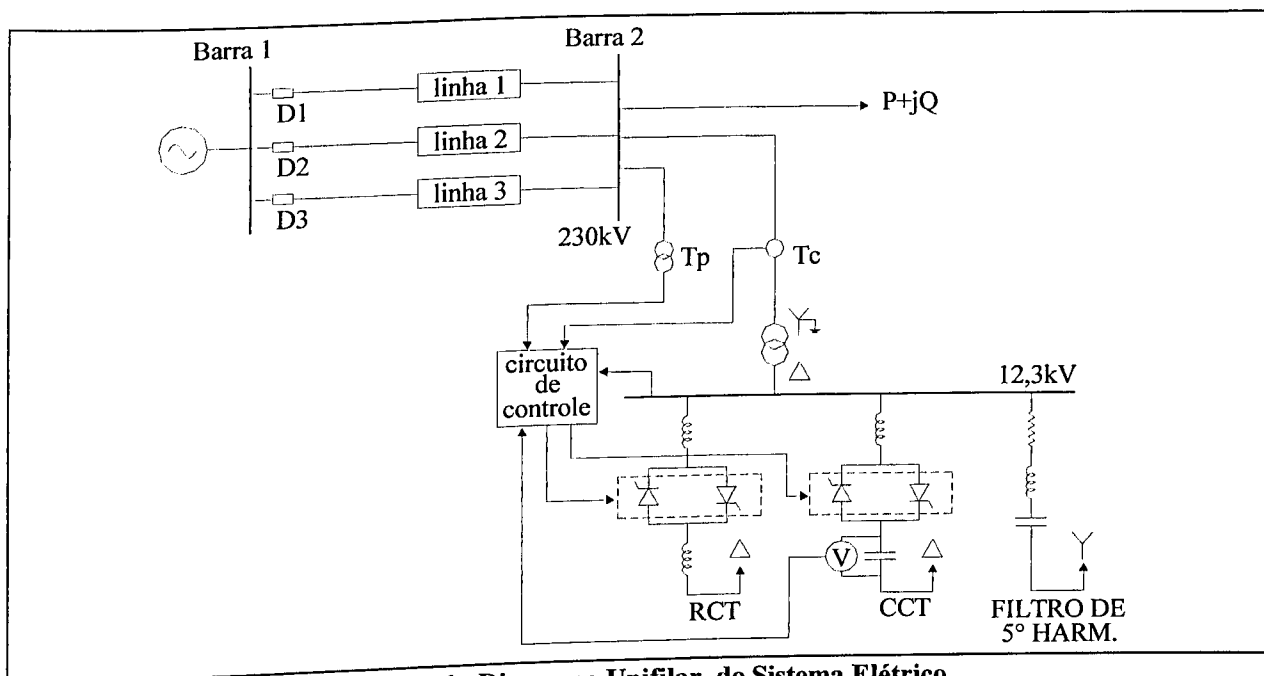


Figura 3.6 - Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico.

Nas tabelas de 3.1 até 3.5 encontram-se os dados dos componentes que constituem o sistema mostrado na figura 3.6, com exceção do C.E., cujas informações serão fornecidas ao longo do desenvolvimento da sua modelagem.

**Tabela 3.1 - Concessionária**

Tensão nominal	f	Potência de curto-circuito
252 kV	60 Hz	300 MVA

**Tabela 3.2 - Carga**

Potência nominal	fp	Tensão nominal
40 MVA	0,5	230 kV

**Tabela 3.3 - Linhas 1, 2 e 3**

Resistência	Indutância	Capacitância
0,442 [ $\Omega$ /Km]	0,00445 [H/Km]	$6,2 \times 10^{-12}$ [F/Km]

**Tabela 3.4 - Filtro de 5º harmônico**

Resistência	Indutância	Capacitância
0,002 $\Omega$	0,001753 H	0,0001658 F

**Tabela 3.5 - Transformador de Potência**

Tensão primária	Tensão secundária	Potência nominal	Resistência percentual	Reatância percentual
230 kV	12,3 kV	70 MVA	1 %	10 %

A figura 3.7 (a) corresponde à estrutura utilizada para representar este sistema no Simulador “Saber”.

Observa-se na figura 3.7 (a) que, os componentes são inseridos através de “símbolos”(blocos), que são interconectados entre si. Desta forma, todo o equacionamento é facilmente introduzido pois, cada bloco traz consigo o modelo matemático do elemento que representa.



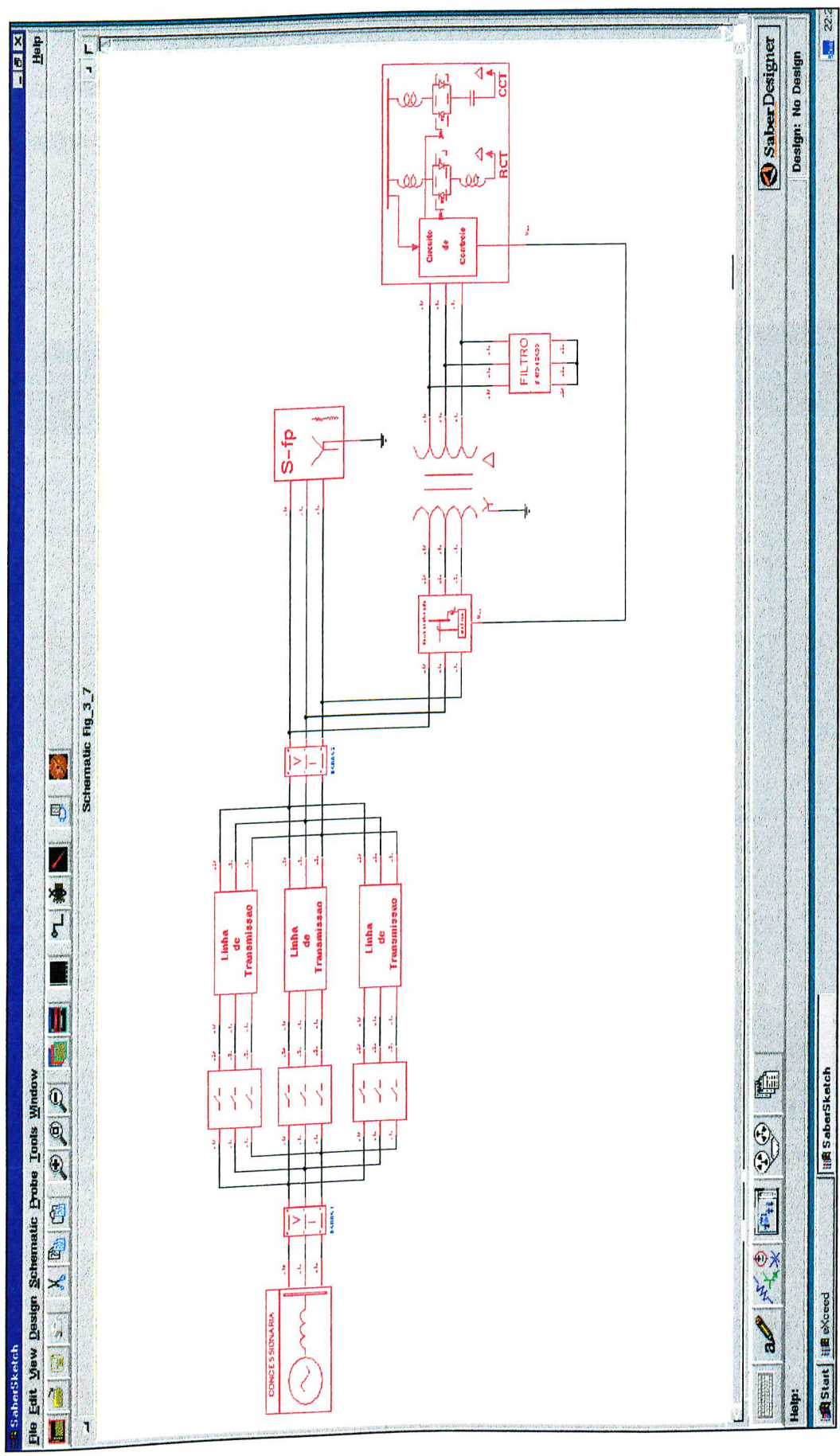


Figura 3.7 (a) - Representação do Sistema Elétrico no Simulador “Saber”.

As figuras 3.7 (b), (c) e (d) ilustram ampliações de determinadas partes do sistema elétrico já introduzido pela figura 3.7 (a) para representar este sistema no Simulador “Saber”.

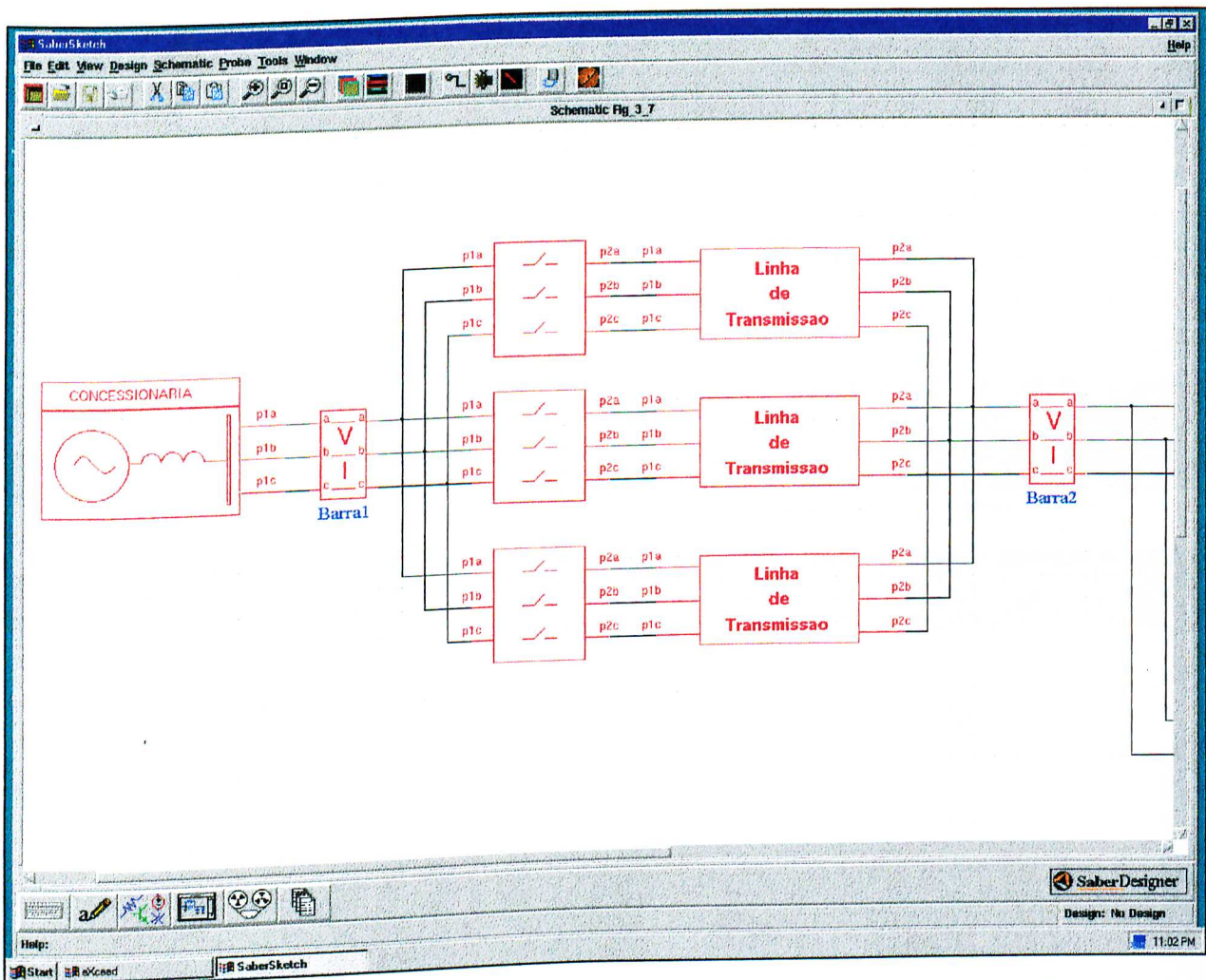


Figura 3.7 (b) - Representação de parte do Sistema Elétrico mostrado na figura 3.7 (a).



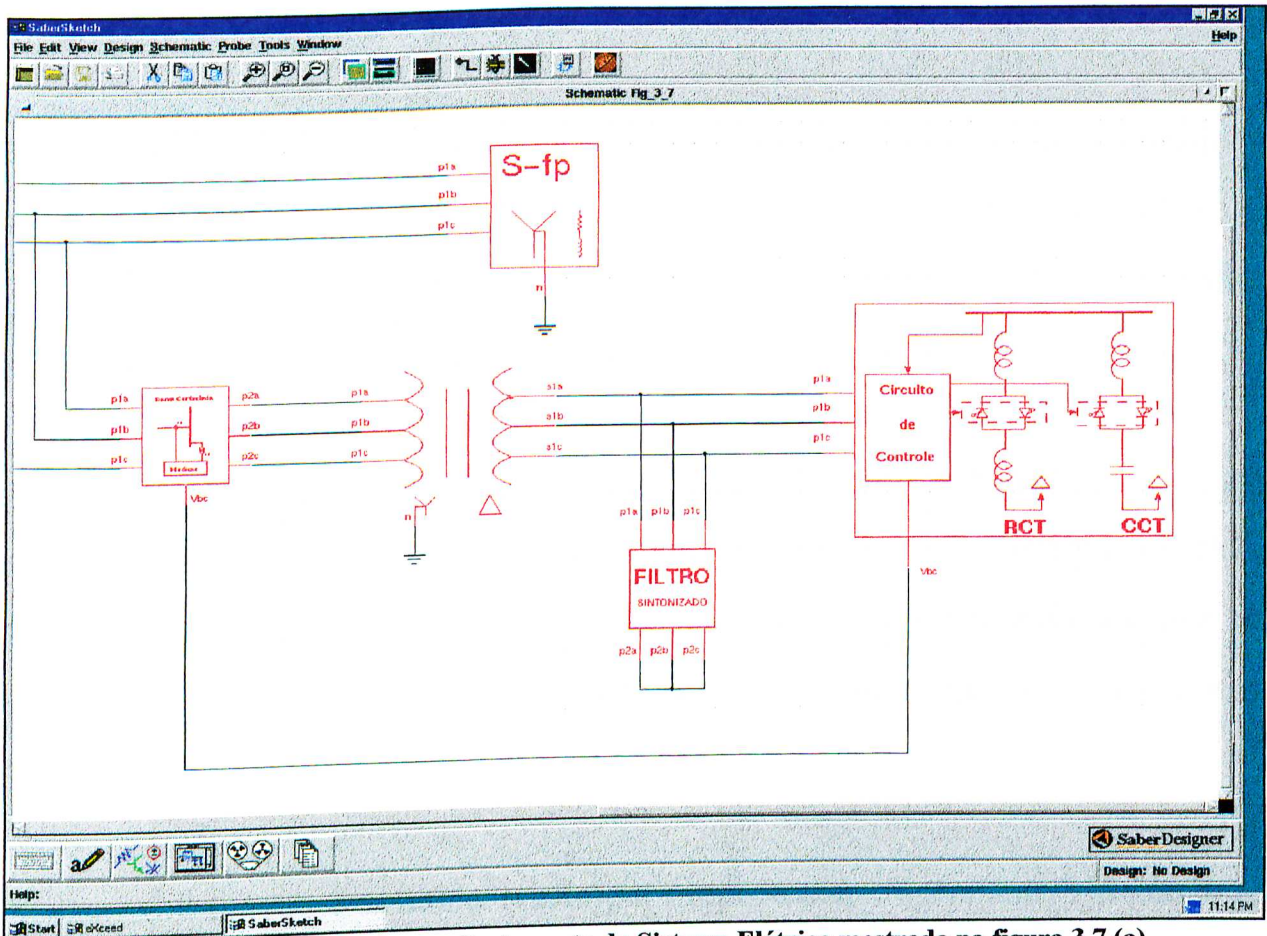


Figura 3.7 (c) - Representação de parte do Sistema Elétrico mostrado na figura 3.7 (a).

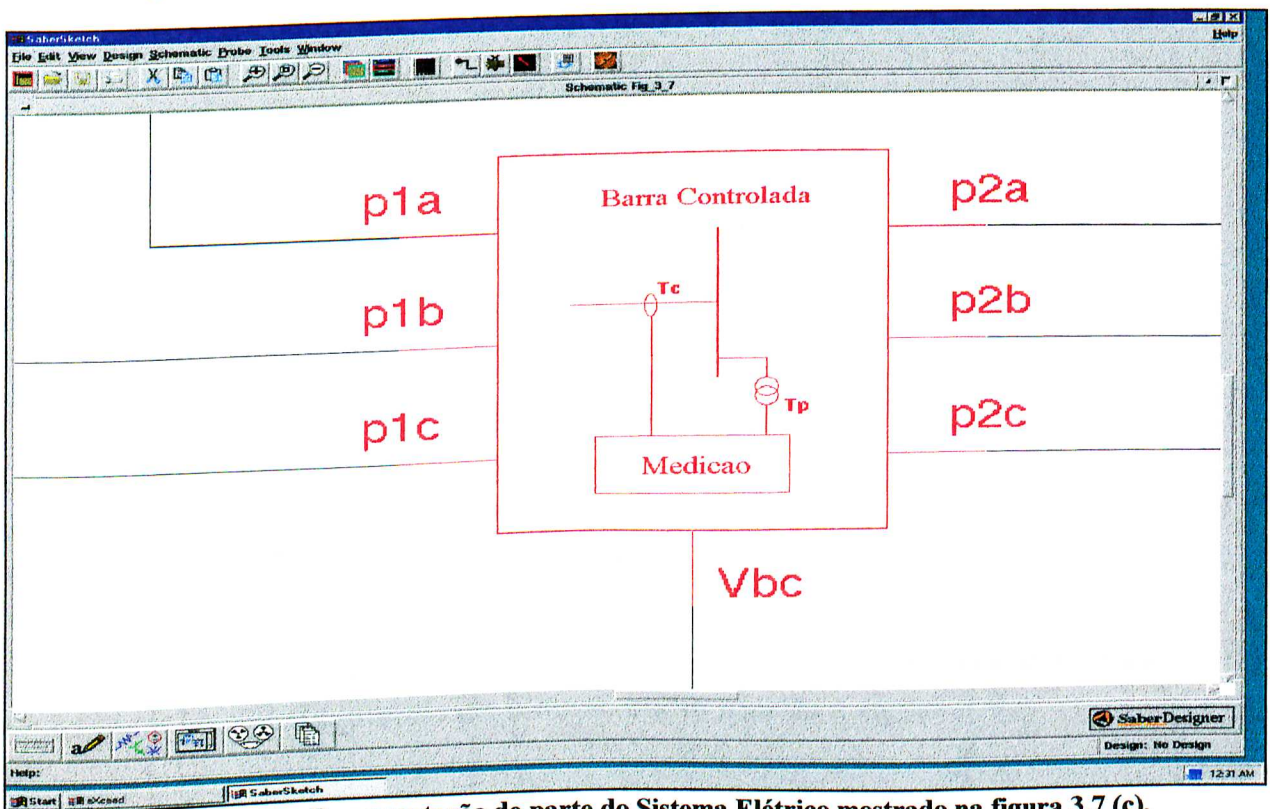


Figura 3.7 (d) - Representação de parte do Sistema Elétrico mostrado na figura 3.7 (c).

### 3.3.2 - Modelagem da Unidade de Medição

A modelagem da *Unidade de Medição* baseia-se em um circuito dedicado à aquisição e ao processamento dos sinais de tensão da barra controlada pelo C.E. As informações necessárias para o desenvolvimento desta unidade foram obtidas através da referência [16].

Tendo em vista que um C.E. pode controlar a tensão da barra na qual está conectado ou qualquer outra que pertença ao mesmo sistema elétrico, implementou-se, para a *Unidade de Medição*, um modelo matemático capaz de fornecer um sinal proporcional à tensão de qualquer barra que se deseje que o C.E controle.

A figura 3.8 mostra o símbolo criado para representar o “template” *Unidade de Medição* no Simulador “Saber”.

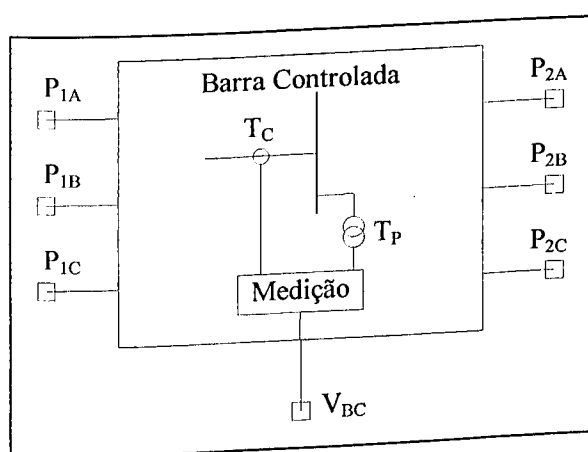


Figura 3.8 - Símbolo para o “template” *Unidade\_Medicao*.

O “template” *Unidade\_Medicao* modela um sistema de medição através da representação por diagramas de blocos, como mostra a figura 3.9.

Os dados de entrada para este “template” e os valores utilizados na simulação do sistema estão indicados na tabela 3.6:

**Tabela 3.6 - Dados de entrada para o “Template” Unidade\_medição.**

Dados de entrada	Descrição	unidade	Dados da Simulação
$V_{NOM}$	Tensão nominal eficaz fase-fase entre os pinos ( $P_{1A}$ , $P_{1B}$ e $P_{1C}$ ).	[V]	230000
$I_{NOM}$	Valor eficaz da corrente nominal que flui entre os pinos ( $P_{1A}$ , $P_{1B}$ e $P_{1C}$ ) e ( $P_{2A}$ , $P_{2B}$ e $P_{2C}$ ).	[A]	176
EST	Estatismo. O seu valor deverá estar compreendido entre 0 e 0,1.	[ ]	0,1
ton	Instante de tempo em que a unidade de medição começa a enviar informações à unidade de controle.	[s]	0,17

Esses dados de entrada são necessários para a obtenção das constantes presentes na figura 3.9, conforme destacado pelas seguintes equações:

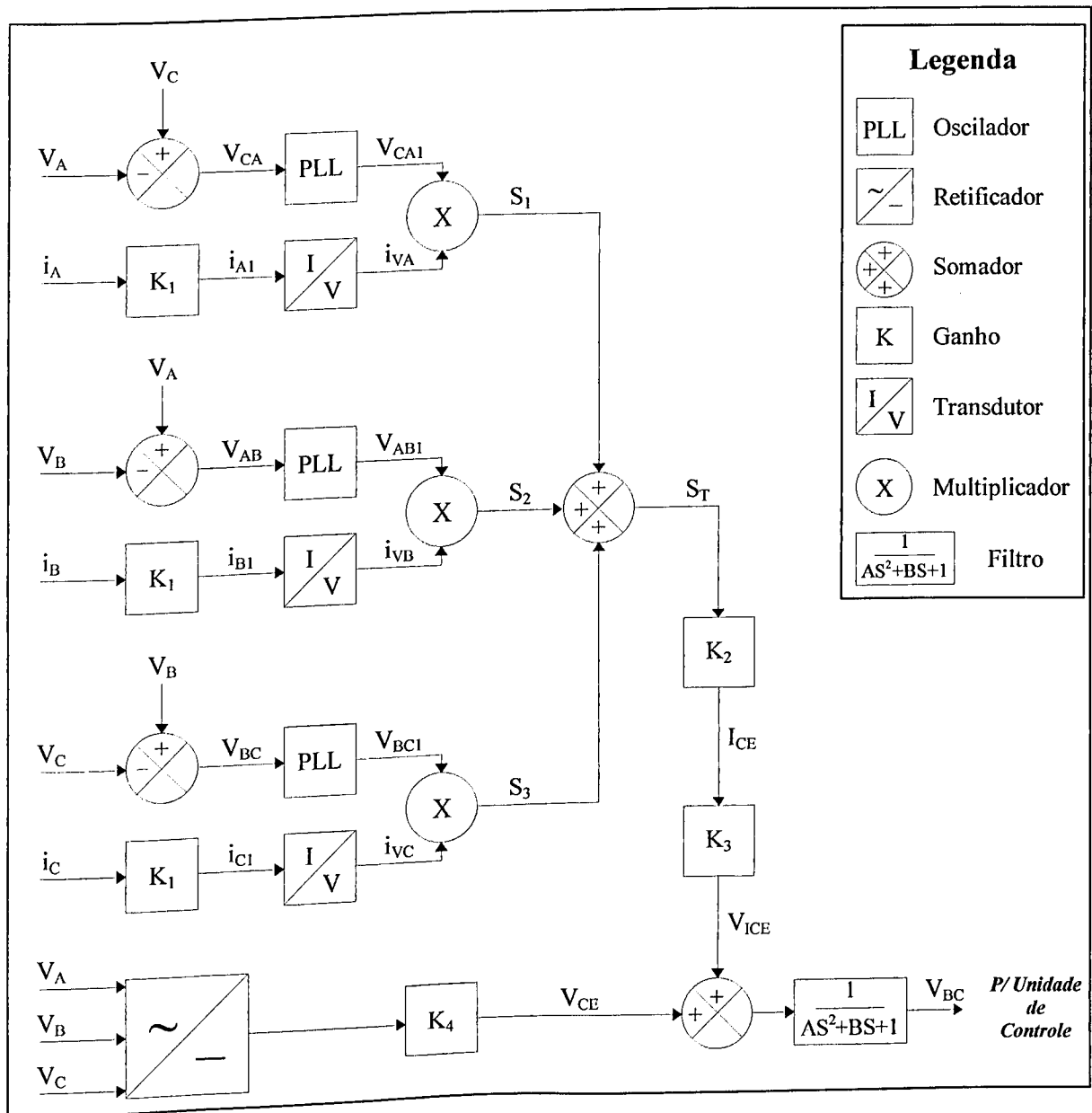
$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2} \times I_{NOM}} \quad (3.1)$$

$$K_2 = 0,821 \quad (3.2)$$

$$K_3 = EST \quad (3.3)$$

$$K_4 = \frac{10 \times \pi}{3 \times \sqrt{2} \times V_{NOM}} \quad (3.4)$$

É essencial entender, contudo que, ao “utilizar” o símbolo apresentado na figura 3.8 no Simulador “Saber”, rotinas dedicadas atribuirão ao pino  $V_{BC}$  o valor eficaz da tensão entre os pinos  $P_{1A}$ ,  $P_{1B}$  e  $P_{1C}$ . Estas rotinas fundamentam-se, basicamente, no diagrama de blocos ilustrado pela figura 3.9.



**Figura 3.9 - Diagrama de blocos da Unidade de Medição.**

As variáveis  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ , identificadas na figura 3.9, correspondem aos sinais de tensão das fases AN, BN e CN, respectivamente. Estas tensões são obtidas

diretamente dos pinos de conexão  $P_{1A}$ ,  $P_{1B}$  e  $P_{1C}$  mostrados anteriormente na figura 3.8. De maneira semelhante, os sinais de corrente que passam pelos pinos ( $P_{1A} \rightarrow P_{2A}$ ), ( $P_{1B} \rightarrow P_{2B}$ ) e ( $P_{1C} \rightarrow P_{2C}$ ), identificados na figura 3.8, correspondem às variáveis  $i_A$ ,  $i_B$ , e  $i_C$ , respectivamente. Estas seis variáveis de entrada são utilizadas, pelo diagrama de blocos da figura 3.9, na determinação de dois sinais ( $V_{CE}$  e  $I_{CE}$ ), um proporcional ao valor eficaz da tensão da barra controlada ( $V_{CE}$ ) e o outro à corrente reativa intercambiada entre o sistema e o C.E. ( $I_{CE}$ ).

Conforme mostrado na figura 3.9, a formação do sinal  $I_{CE}$  inicia-se através da diferença entre as variáveis  $V_C$  e  $V_A$ , dando origem ao sinal  $V_{CA}$ . Este sinal é submetido ao bloco PLL (“Phase Locked Loop”) cuja função é a de gerar, em sua saída ( $V_{CA1}$ ), uma tensão de amplitude constante e atrasada de  $90^\circ$  em relação a  $V_{CA}$ . A obtenção do sinal  $V_{CA1}$  é destacada na figura 3.10, representativa do “PLL” da fase CA do diagrama de blocos da *Unidade de Medição* (figura 3.9).

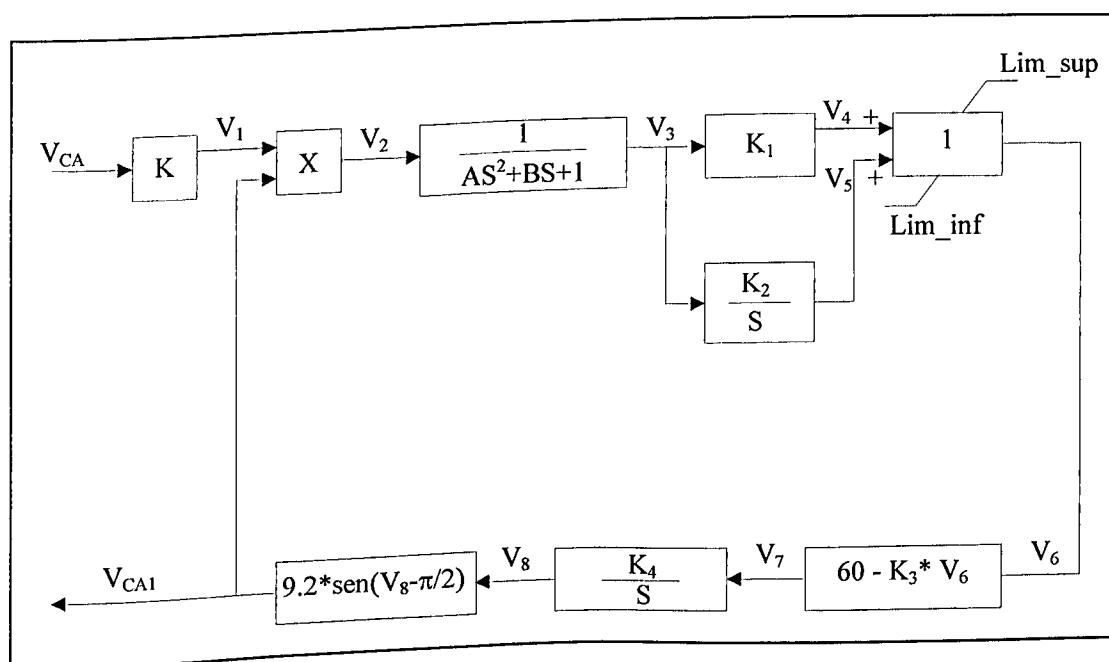


Figura 3.10 - Diagrama de blocos do Modelo do PLL



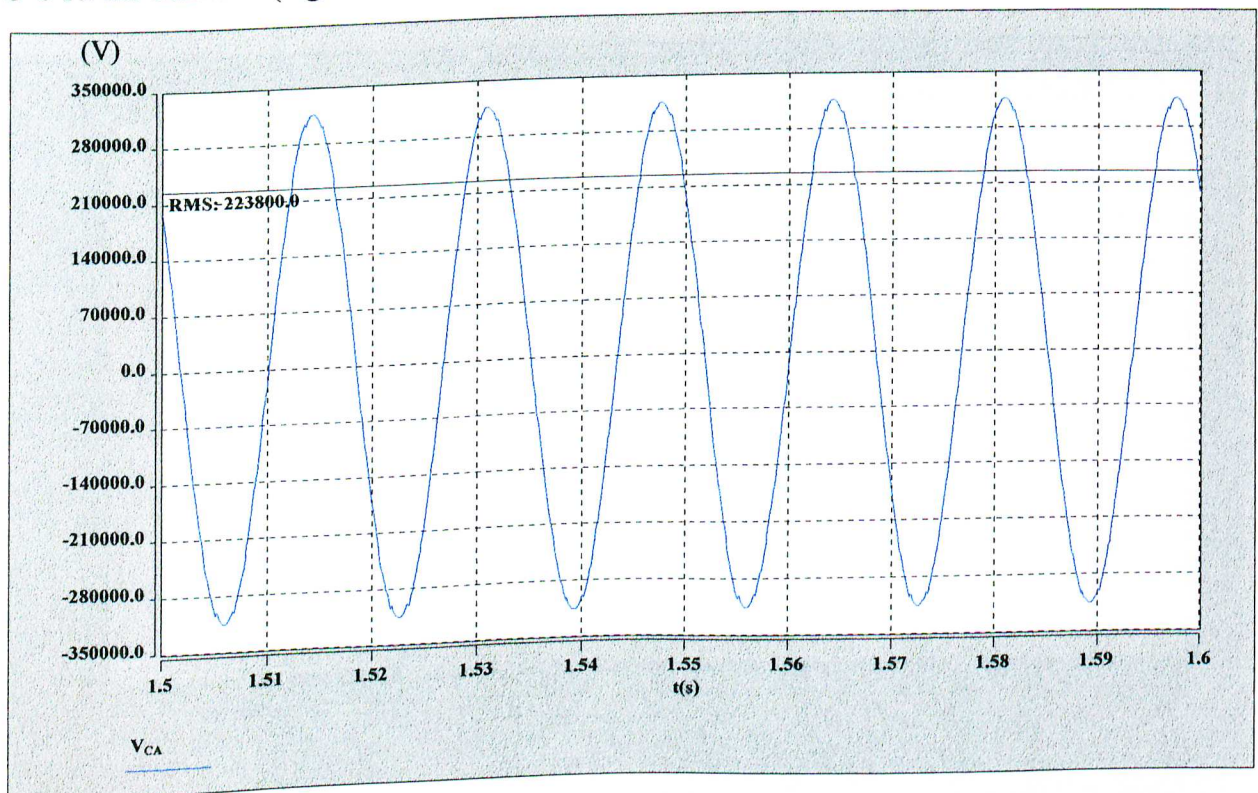
Da figura 3.10 identifica-se algumas constantes, cujos valores estão indicados na tabela 3.7. Estes valores foram encontrados após diversas tentativas de ajustes, obtendo-se um excelente desempenho para os propósitos do circuito mostrado na figura 3.10.

**Tabela 3.7 - Valores das Constantes da figura 3.10.**

Constante	K	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	Lim_sup	Lim_inf	A	B
Valor	$\frac{9,2}{\sqrt{2} \times V_{NOM}}$	11,8	1	0,01	6,2832	13	-13	2u	1,5m

*Obs:* V<sub>NOM</sub> é fornecido pela tabela 3.6.

A figura 3.11 mostra a forma de onda do sinal de entrada do bloco PLL (sinal V<sub>CA</sub>). No caso do sistema simulado, este sinal corresponde à tensão entre as fases C e A da barra 2 (figura 3.6).



**Figura 3.11 - Forma de onda do sinal V<sub>CA</sub>.**



A tensão da figura 3.11 apresenta-se, em regime permanente, com um valor rms de 223,8 kV. Este sinal deve ser transformado em um nível de tensão compatível com os parâmetros da tabela 3.7. Esta transformação é realizada através da multiplicação do sinal  $V_{CA}$  pelo ganho  $K$  (Tab. 3.7), obtendo-se, assim, o sinal  $V_1$ , o qual está presente no canto superior esquerdo da figura 3.10.

Na figura 3.10 o sinal  $V_1$  e a saída do PLL,  $V_{CA1}$ , são submetidos a um bloco multiplicador (bloco X), cuja função é a de criar entre estes dois sinais uma defasagem de  $90^\circ$ . Neste sentido, a saída do multiplicador,  $V_2$ , atua no oscilador, variando a frequência ( $V_7$ ) da tensão gerada ( $V_{CA1}$ ), possibilitando atrasar ou adiantar esta tensão (ajustando-a na nova situação), mantendo-a continuamente defasada de  $90^\circ$  em relação a tensão da rede ( $V_{CA}$ ). A figura 3.12 corresponde às formas de onda dos sinais  $V_1$  e  $V_{CA1}$  durante os primeiros 160 milisegundos de simulação.

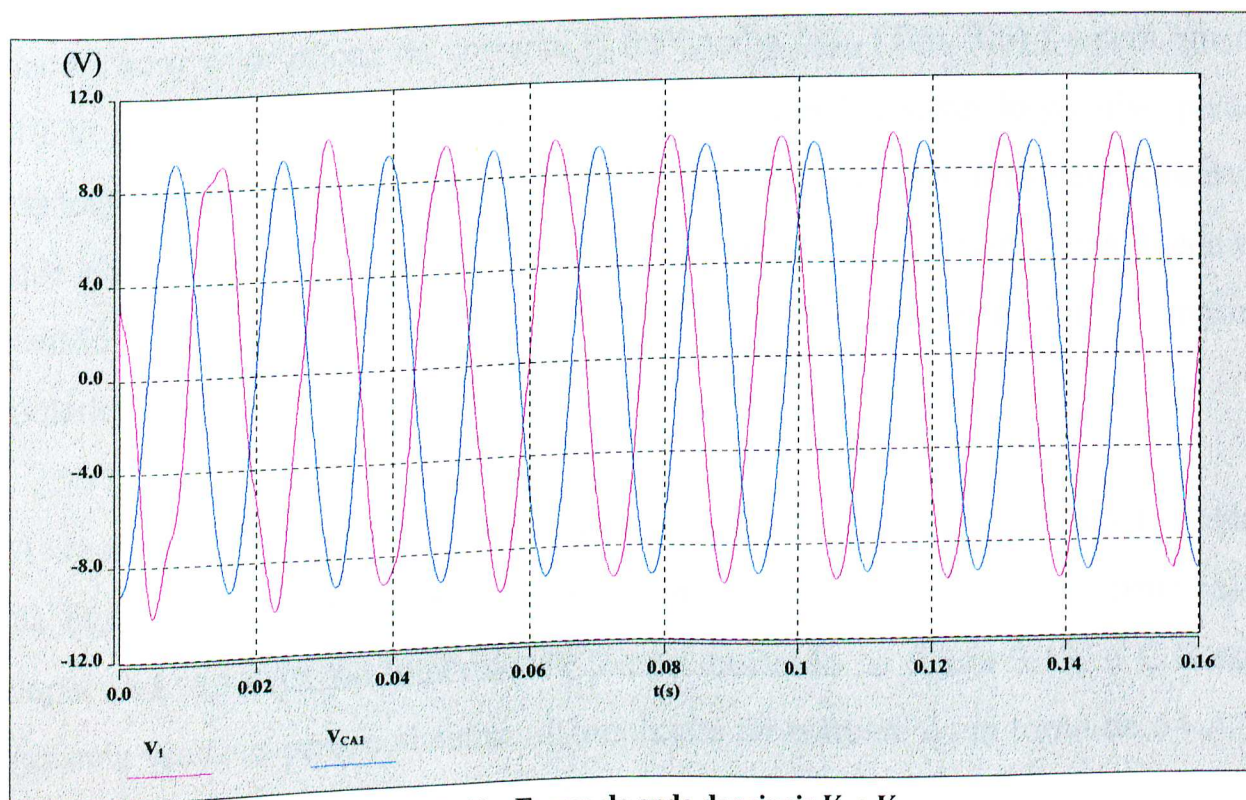


Figura 3.12 - Forma de onda dos sinais  $V_1$  e  $V_{CA1}$ .

Observa-se na figura 3.12 que, nos instantes iniciais, a tensão  $V_{CAI}$  (em cor azul) está adiantada em relação a  $V_I$  (cor vermelha). Porém, a partir de 100 milissegundos, o oscilador consegue manter a tensão  $V_{CAI}$  atrasada em  $90^\circ$  de  $V_I$ . Por esta razão é que se utiliza para o dado de entrada  $ton$  (Tab. 3.6) o valor 170 milissegundos.

Retornando ao diagrama de blocos da figura 3.9, verifica-se que a corrente  $i_A$ , após ser multiplicada pelo ganho  $K_I$  (eq. 3.1), é convertida em um sinal equivalente de tensão ( $i_{VA}$ ) e, em seguida, multiplicado por  $V_{CAI}$ . Esta operação produz um sinal de tensão contínuo ( $S_I$ ) com um “ripple” de duas vezes a frequência do sistema.

Procede-se a seguir a soma de  $S_I$  com os sinais equivalentes das duas outras fases ( $S_2$  e  $S_3$ ). O sinal resultante ( $S_T$ ) é proporcional à parcela reativa da corrente  $i_A$  [8]. A multiplicação de  $S_T$  pelo ganho  $K_2$  (eq. 3.2), resulta no sinal  $I_{CE}$ . Deste modo, se o valor eficaz da corrente  $i_A$  for igual a  $I_{NOM}$  (Tab. 3.6)  $I_{CE}$  será igual a 10 V. O sinal  $I_{CE}$  reflete a situação média das três fases, sendo positivo para a operação capacitiva, e negativo para operação indutiva. Cabe finalmente observar que o sinal  $V_{ICE}$ , multiplicação de  $I_{CE}$  por  $K_3$  (eq. 3.3), representa uma queda de tensão quando o estatismo (Tab. 3.6) é diferente de zero, com a mesma polaridade de  $I_{CE}$ .

As representações gráficas da corrente  $i_A$  e da tensão da fase  $V_{AN}$  estão ilustradas na figura 3.13. Observa-se nesta figura que a corrente  $i_A$  (em cor vermelha) é capacitiva, ou seja, no intervalo de tempo mostrado na figura 3.13, o C.E está gerando reativos para o sistema. A amplitude da corrente é em torno de 64 A, o que equivale a um valor rms de 45,5 A.

---



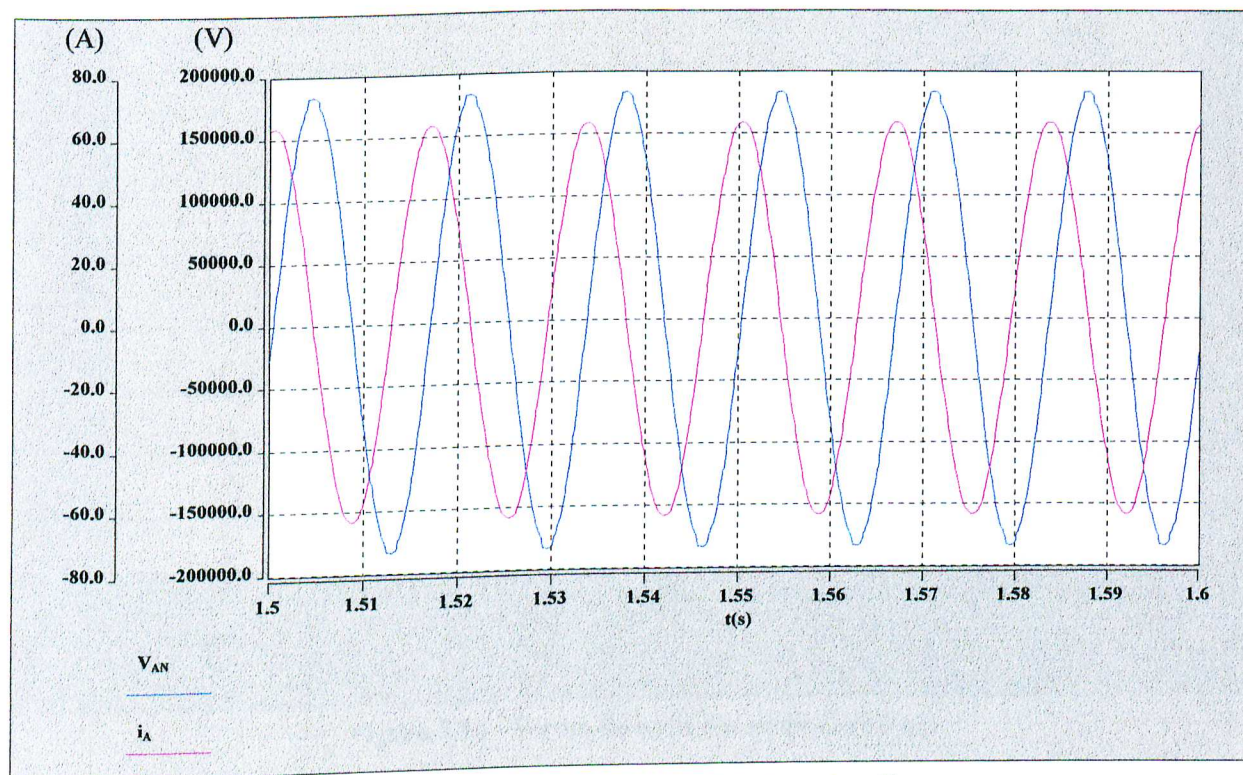


Figura 3.13 - Forma de onda dos sinais  $i_A$  e  $V_{AN}$ .

A figura 3.14 mostra as formas de onda dos sinais  $I_{CE}$  e  $V_{ICE}$ . Analisando-se esta figura, pode-se mais uma vez afirmar que a corrente  $i_A$  possui característica capacitiva. Isto acontece porque a forma de onda do sinal  $I_{CE}$  (em cor verde) indica que o seu valor é positivo (C.E. operando na região capacitiva) e vale aproximadamente 2,584 V. O sinal  $V_{ICE}$  (em cor azul) corresponde a 0,2584 V, resultado da multiplicação de 2,584 por 0,1 (valor dado ao estatismo).

Como já mencionado, se  $i_A$  apresentar-se com o valor eficaz igual a  $I_{NOM}$ , então  $I_{CE}$  assume o valor de 10 V. Esta relação permite afirmar que, o valor de 2,584 V corresponde a uma corrente de 45,5 A (pois  $I_{NOM} = 176$ , ver tabela 3.6), conforme constatado na figura 3.13.

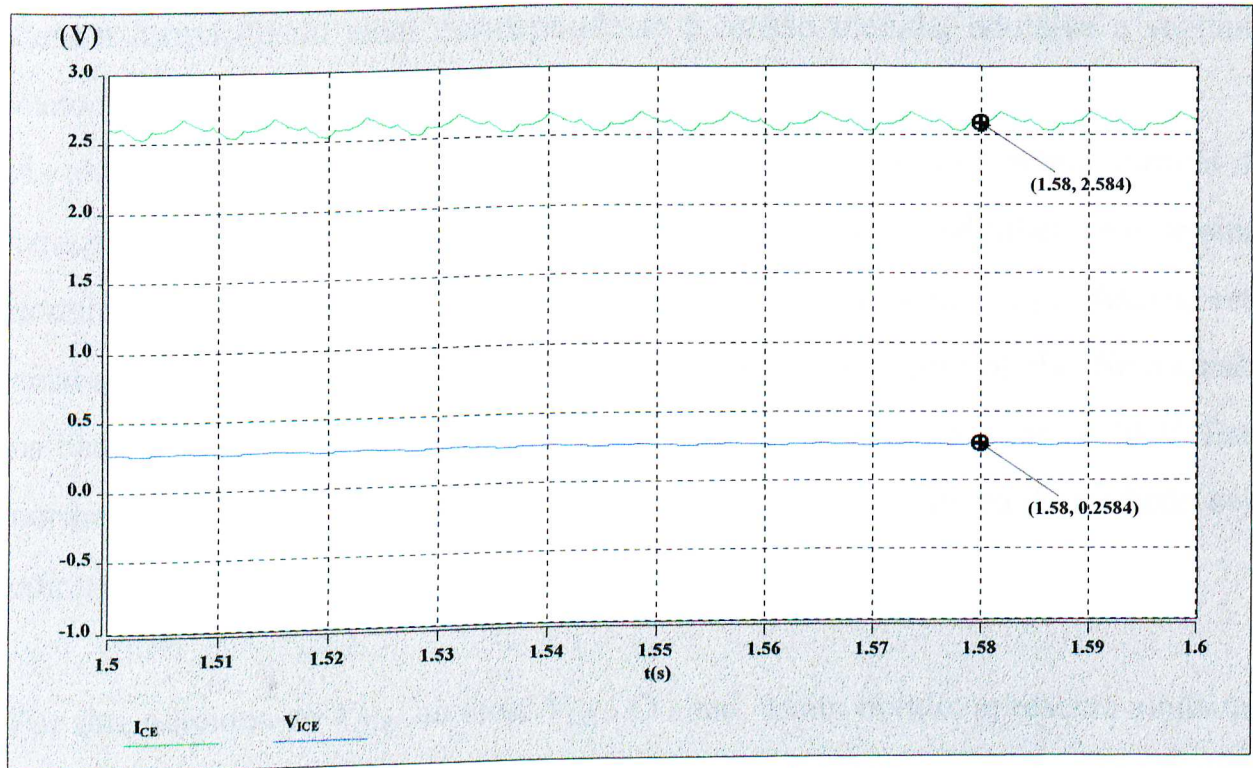


Figura 3.14 - Forma de onda dos sinais  $I_{CE}$  e  $V_{ICE}$ .

É importante salientar que os procedimentos até aqui enfocados restringiram-se à formação do sinal  $V_{ICE}$ . A função deste sinal é impor à tensão medida na barra controlada um certo valor de variação. Este assunto será melhor compreendido após a descrição do sinal que corresponde à tensão medida. Desta maneira, é útil, neste momento, rerepresentar parcialmente o diagrama de blocos da figura 3.9. Isso está ilustrado na figura 3.15.

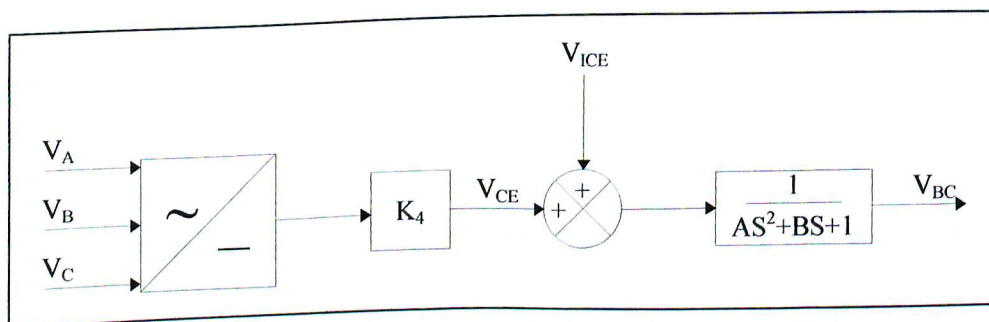


Figura 3.15 - Diagrama de blocos para formação do sinal de Tensão.

Para a formação do sinal correspondente à tensão medida, adota-se a seguinte metodologia:

As tensões  $V_A$ ,  $V_B$ , e  $V_C$  são transformadas em um único sinal contínuo através de uma ponte retificadora a diodos de 6 pulsos. Em seguida, multiplica-se esse sinal contínuo por um ganho  $K_4$  (eq. 3.4) obtendo-se assim o sinal  $V_{CE}$ . Assim, este sinal será proporcional ao valor eficaz da tensão na barra controlada. Se a tensão na barra controlada for igual a  $V_{NOM}$  (Tab.3.6),  $V_{CE}$  assume o valor de 10 V. Esta normalização nos sinais  $V_{CE}$  e  $I_{CE}$  permite que a saída do sistema de medição seja compatível com a *Unidade de Controle*.

Por fim, adiciona-se  $V_{ICE}$  ao sinal  $V_{CE}$ . O sinal, assim obtido, apresenta ainda um “ripple”. Para diminuir o efeito desta perturbação, acopla-se ao somador um filtro passa baixa com os mesmos parâmetros sugeridos pela tabela 3.8. Desta forma, o sinal  $V_{BC}$  se apresenta com uma melhoria antes de ser entregue à *Unidade de Controle*.

Reconhecendo-se os problemas causados pelos transitórios no momento da energização do modelo, o sinal  $V_{BC}$  é forçado a assumir o valor 10 V até o instante de tempo  $ton$  (Tab. 3.6), independentemente do valor calculado pela *Unidade de Medição*. Este recurso inibe a ação do C.E durante os instantes iniciais de sua energização.

A figura 3.16 apresenta as formas de onda dos sinais  $V_{CE}$ ,  $V_{ICE}$  e  $V_{BC}$ . O sinal  $V_{CE}$ , na figura 3.16 (em cor azul) possui valor médio de 9,7395, que é abaixo de 10 V. Isto é, a tensão medida na barra é inferior a  $V_{NOM}$  (Tab. 3.6), (nesta simulação, em particular, vale 230 kV). Mas, devido ao valor médio de  $V_{ICE}$  (em cor

---



vermelha) ser 0,25937, o sinal  $V_{BC}$  (em cor verde) repassa à *Unidade de Controle* um nível de tensão de 10 V. Desta forma, não existirá erro entre a tensão desejada (referência) e o sinal  $V_{BC}$ . Portanto, a atuação do controle permanece estabilizada. Nestas condições, a tensão da barra controlada, com um certo estatismo, será menor que a tensão de referência (como é classicamente conhecido se o C.E. estiver operando na região capacitiva), como mostrado anteriormente pela figura 3.11 onde a tensão se estabilizou em 223,8 kV, ou seja, com 6,2 kV abaixo do valor  $V_{NOM}$  (230 kV). Naturalmente, quando o C.E. operar na região indutiva, a tensão da barra controlada se estabilizará em um valor superior ao da referência.

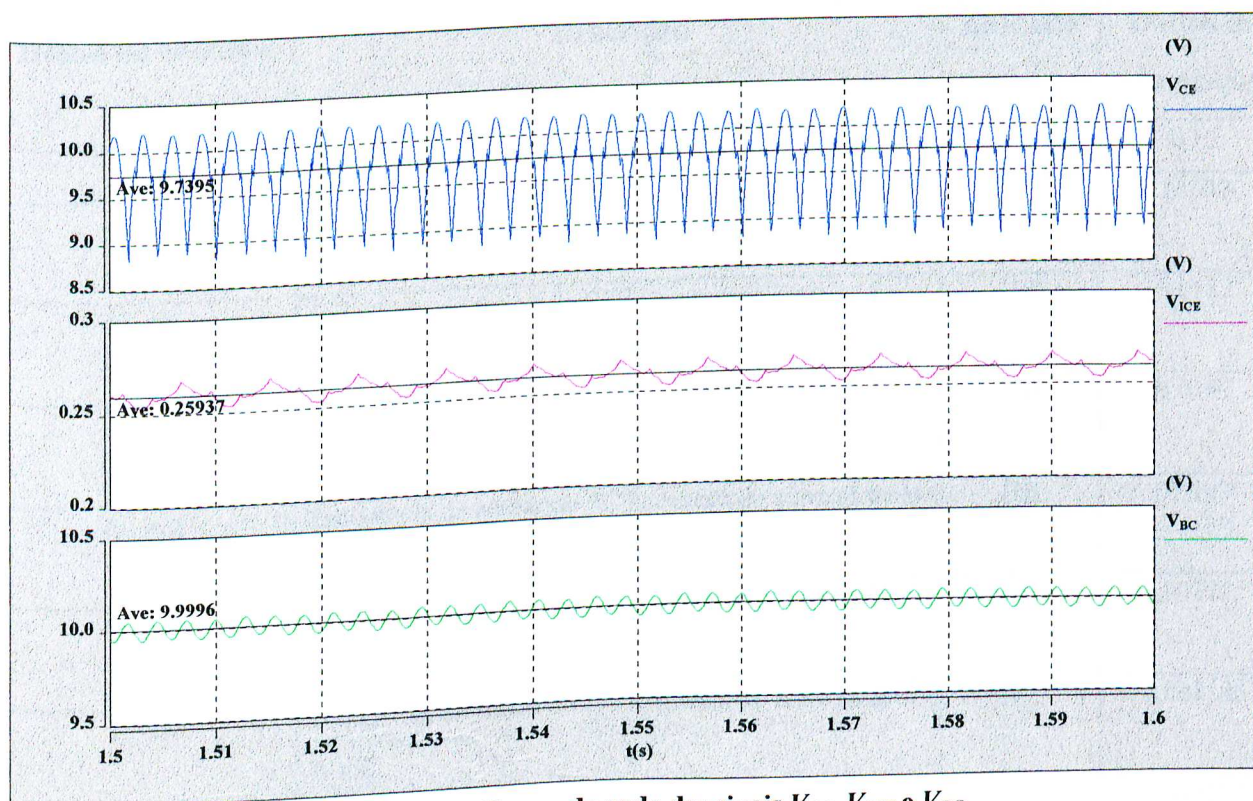


Figura 3.16 - Forma de onda dos sinais  $V_{CE}$ ,  $V_{ICE}$  e  $V_{BC}$ .

O item a seguir destina-se à apresentação do sistema de controle do compensador estático.



### 3.3.3 - Modelagem do Sistema de Controle do Compensador Estático

Os parâmetros utilizados internamente pelos “Templates” que representam o modelo do compensador estático, são fundamentados nos dados de entrada fornecidos pelo usuário. A descrição destes dados e os valores utilizados na simulação, do caso exemplo, estão indicados na tabela 3.8. Os valores fornecidos na tabela 3.8, bem como as informações necessárias para o desenvolvimento da modelagem do sistema de controle do compensador estático foram obtidas através da referência [5].

**Tabela 3.8 - Dados de entrada para o “Template” CE.**

Dados de entrada	Descrição	unidade	Dados da simulação
ton	Instante de tempo onde o C.E. inicia a sua operação.	[s]	0,15
Vrede	Tensão nominal eficaz fase-fase da barra que alimenta o C.E.	[V]	12300
la_rct	Indutância do reator do RCT, conectado entre as fases A e B.	[H]	0,0187
lb_rct	Indutância do reator do RCT, conectado entre as fases B e C.	[H]	0,0187
lc_rct	Indutância do reator do RCT, conectado entre as fases C e A.	[H]	0,0187
la_cct	Indutância do reator do CCT, conectado entre as fases A e B.	[H]	0,001155
lb_cct	Indutância do reator do CCT, conectado entre as fases B e C.	[H]	0,001155
lc_cct	Indutância do reator do CCT, conectado entre as fases C e A.	[H]	0,001155
ca_cct	Capacitância do capacitor do CCT, conectado entre as fases A e B.	[F]	0,0003005
cb_cct	Capacitância do capacitor do CCT, conectado entre as fases B e C.	[F]	0,0003005

Continuação da tabela 3.8.

Dados de entrada	Descrição	unidade	Dados da simulação
<b>cc_cct</b>	Capacitância do capacitor do CCT, conectado entre as fases C e A.	[F]	0,0003005
<b>rc</b>	Resistência do CCT, por fase.	[Ohms]	0,0015
<b>rc<sub>1</sub></b>	Resistência do "Snubber" do CCT, por fase.	[Ohms]	255
<b>rc<sub>2</sub></b>	Resistência do "Snubber" do CCT, por fase.	[Ohms]	34000000
<b>cs</b>	Capacitância do "Snubber" do CCT, por fase.	[F]	0,0000002
<b>rr</b>	Resistência do RCT, por fase.	[Ohms]	0,023
<b>rr<sub>1</sub></b>	Resistência do "Snubber" do RCT, por fase.	[Ohms]	450
<b>rr<sub>2</sub></b>	Resistência do "Snubber" do RCT, por fase.	[Ohms]	30000000
<b>cr</b>	Capacitância do "Snubber" do RCT, por fase.	[F]	0,000000157
<b>V<sub>REF</sub></b>	Tensão eficaz fase-fase desejada na barra controlada pelo C.E. Tensão de referência.	[V]	230000
<b>V<sub>MAX</sub></b>	Deverá ter o mesmo valor de $V_{REF}$ , a não ser na aplicação de um degrau na referência. Por exemplo, na aplicação de um degrau de 20% em um sistema de 230k [V], caracterizando uma subtensão, $V_{max} = 230k$ e $V_{REF} = 276k$	[V]	230000
<b>K<sub>P</sub></b>	Ganho proporcional do controlador PI utilizado na unidade de controle. Valores típicos entre 0 e 5	[ ]	0,5
<b>K<sub>I</sub></b>	Ganho do integrador do controlador PI utilizado na unidade de controle. Valores típicos entre 0 e 500	[ ]	30
<b>Vcap_init</b>	Tensão inicial no capacitor do CCT	[V]	17394,83
<b>bce_manual</b>	Susceptância que o C.E. apresenta no modo manual de operação. Qualquer valor entre -10 e b_cct. Se o valor for negativo significa que o C.E está operando na região indutiva, sendo sua capacidade máxima de absorção de reativos em $bce\_manual = -10$ . Se for positivo, significa operação na região capacitiva e a capacidade máxima de geração de reativos é alcançada em $bce\_manual = b\_cct$ . $b\_cct = 10 * (\text{reatância do RCT} / \text{reatância do CCT})$ .	[ ]	-1,4

Continuação da tabela 3.8.

Dados de entrada	Descrição	unidade	Dados da simulação
<b>Lsubinf</b>	Limite inferior da tensão para ativar a lógica de subtensão. Por exemplo, se $L_{subinf} = 60$ , significa que a referida lógica será ativada quando a tensão da barra controlada for inferior a 60 % de $V_{ref}$ .	[%]	70
<b>Lsubsup</b>	Limite superior da tensão para desabilitar a lógica de subtensão. Por exemplo, se $L_{subsup} = 80$ , significa que a referida lógica será desabilitada quando a tensão da barra controlada for superior a 80 % de $V_{ref}$ .	[%]	85
<b>Lsobsup</b>	Limite superior da tensão para ativar a lógica de sobretensão. Por exemplo, se $L_{sobsup} = 130$ , significa que a referida lógica será ativada quando a tensão da barra controlada for superior a 130 % de $V_{ref}$ .	[%]	115
<b>Lsobinf</b>	Limite inferior da tensão para desabilitar a lógica de sobretensão. Por exemplo, se $L_{sobinf} = 120$ , significa que a referida lógica será desabilitada quando a tensão da barra controlada for inferior a 120 % de $V_{ref}$ .	[%]	110
<b>pick_up_sub</b>	Atraso desejado na atuação da lógica de subtensão. Se $pick\_up\_sub = 10m$ , significa que, o temporizador deverá esperar 10 milisegundos após a ultrapassagem da tensão pelo valor definido por $L_{subinf}$ para ativar a lógica de subtensão. Caso a tensão da barra controlada volte a ser superior a $L_{subinf}$ antes de decorrido os 10 milisegundos o temporizador será novamente zerado.	[s]	0,01
<b>drop_out_sub</b>	Atraso desejado na desativação da lógica de subtensão. Se $drop\_out\_sub = 10m$ , significa que, o temporizador deverá esperar 10 milisegundos após a ultrapassagem da tensão pelo valor definido por $L_{subsup}$ para desativar a lógica de subtensão. Caso a tensão da barra controlada volte a ser inferior a $L_{subsup}$ antes de decorrido os 10 milisegundos o temporizador será novamente zerado.	[s]	0,005

Continuação da tabela 3.8.

Dados de entrada	Descrição	unidade	Dados da simulação
<b>pick_up_sob</b>	Atraso desejado na atuação da lógica de sobretensão. Se <i>pick_up_sob</i> = 10m, significa que, o temporizador deverá esperar 10 milisegundos após a ultrapassagem da tensão pelo valor definido por <i>Lsobsup</i> para ativar a lógica de sobretensão. Caso a tensão da barra controlada volte a ser inferior a <i>Lsobsup</i> antes de decorrido os 10 milisegundos o temporizador será novamente zerado.	[s]	0,015
<b>drop_out_sob</b>	Atraso desejado na desativação da lógica de sobretensão. Se <i>drop_out_sob</i> = 10m, significa que, o temporizador deverá esperar 10 milisegundos após a ultrapassagem da tensão pelo valor definido por <i>Lsobinf</i> para desativar a lógica de sobretensão. Caso a tensão da barra controlada volte a ser superior a <i>Lsobinf</i> antes de decorrido os 10 milisegundos o temporizador será novamente zerado.	[s]	0,01
<b>bce_init</b>	Susceptância que o RCT deve assumir quando o C.E. entra em operação. Qualquer valor compreendido entre -10 e 0. A capacidade máxima de absorção de reativos é alcançada em <i>bce_init</i> = -10.	[ ]	-1,67
<b>bce_subtensão</b>	Susceptância que o RCT deve assumir quando a lógica de subtensão é ativada. Qualquer valor compreendido entre -10 e 0. A capacidade máxima de absorção de reativos é alcançada em <i>bce_subtensão</i> = -10.	[ ]	-1,67
<b>b_on</b>	Se a susceptância do RCT, definida pelo controle do C.E., for igual a <i>b_on</i> , o CCT deverá ser conectado no sistema. Qualquer valor entre 0 e 10. Desde que seja superior à <i>bce_init</i> .	[ ]	0,1
<b>b_off</b>	Idem para a retirada do CCT.	[ ]	10

### 3.3.3.1 - Modelagem da Unidade de Controle

A função básica desta unidade é, através do sinal fornecido pela *Unidade de Medição*, definir um sinal de susceptância de referência para a atuação do C.E., mantendo a tensão da barra controlada no nível desejado. Esta unidade é composta por 3 funções específicas, que são:

- Lógica de Sobretensão;
- Lógica de Subtensão;
- Regulador de Tensão.

A figura 3.17 corresponde ao diagrama de blocos representativo da *Unidade de Controle* do compensador estático. Foi através deste diagrama de blocos que se implementou as rotinas que representam o modelo matemático da *Unidade de Controle*.

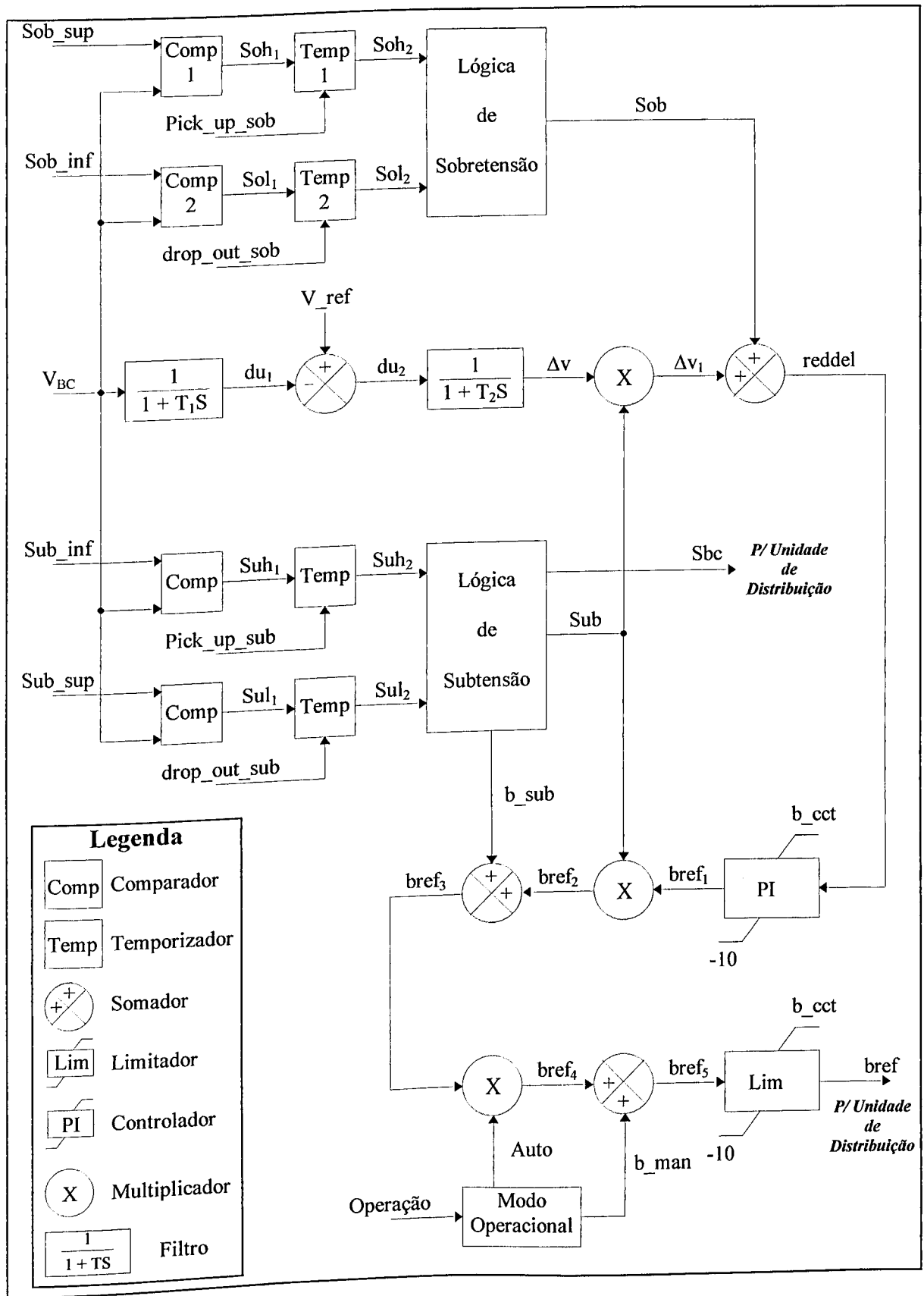


Figura 3.17 - Diagrama de blocos da Unidade de Controle.

### a) Estratégia de Sobretensão

A figura 3.18 mostra a parte do diagrama de blocos da *Unidade de Controle* (figura 3.17) relativa à Estratégia de Sobretensão.

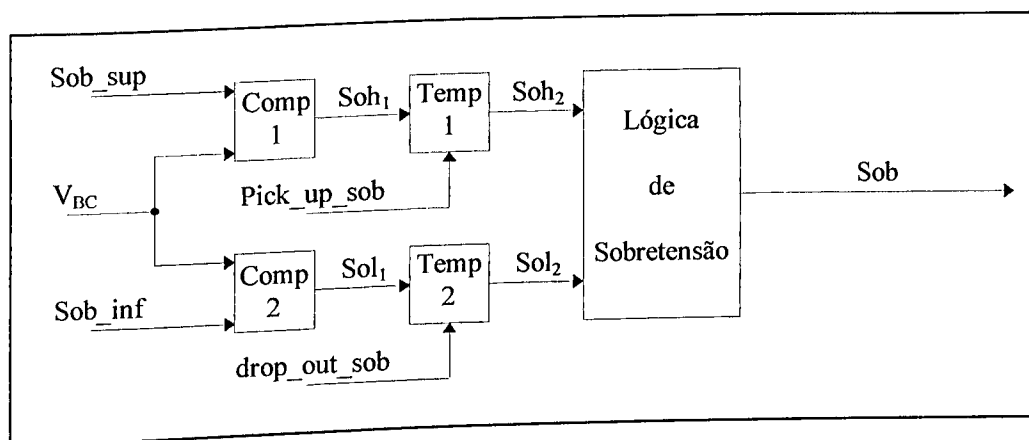


Figura 3.18 - Diagrama de blocos da Estratégia de Sobretensão da figura 3.17.

As variáveis  $Sob\_sup$  e  $Sob\_inf$ , presentes na figura 3.18, são obtidas através dos dados de entrada da tabela 3.9, conforme destacado pelas equações 3.5 e 3.6.

$$Sob\_inf = \frac{Lsobinf}{100} \times \frac{V_{REF}}{V_{MAX}} \times 10 \quad (3.5)$$

$$Sob\_sup = \frac{Lsobsup}{100} \times \frac{V_{REF}}{V_{MAX}} \times 10 \quad (3.6)$$

Como pode ser observado na figura 3.18, a lógica adotada para a estratégia de sobretensão consiste na comparação do sinal  $V_{BC}$ , proveniente da *Unidade de*

Medição, com os parâmetros  $sob\_inf$  e  $sob\_sup$ . Desta forma, a saída do comparador “comp<sub>1</sub>”,  $sol_1$ , será:

- 1, se  $V_{BC} > sob\_sup$  ;
- 0, se  $V_{BC} < sob\_sup$ .

Quanto ao comparador “comp<sub>2</sub>”, a sua saída,  $sol_1$ , será:

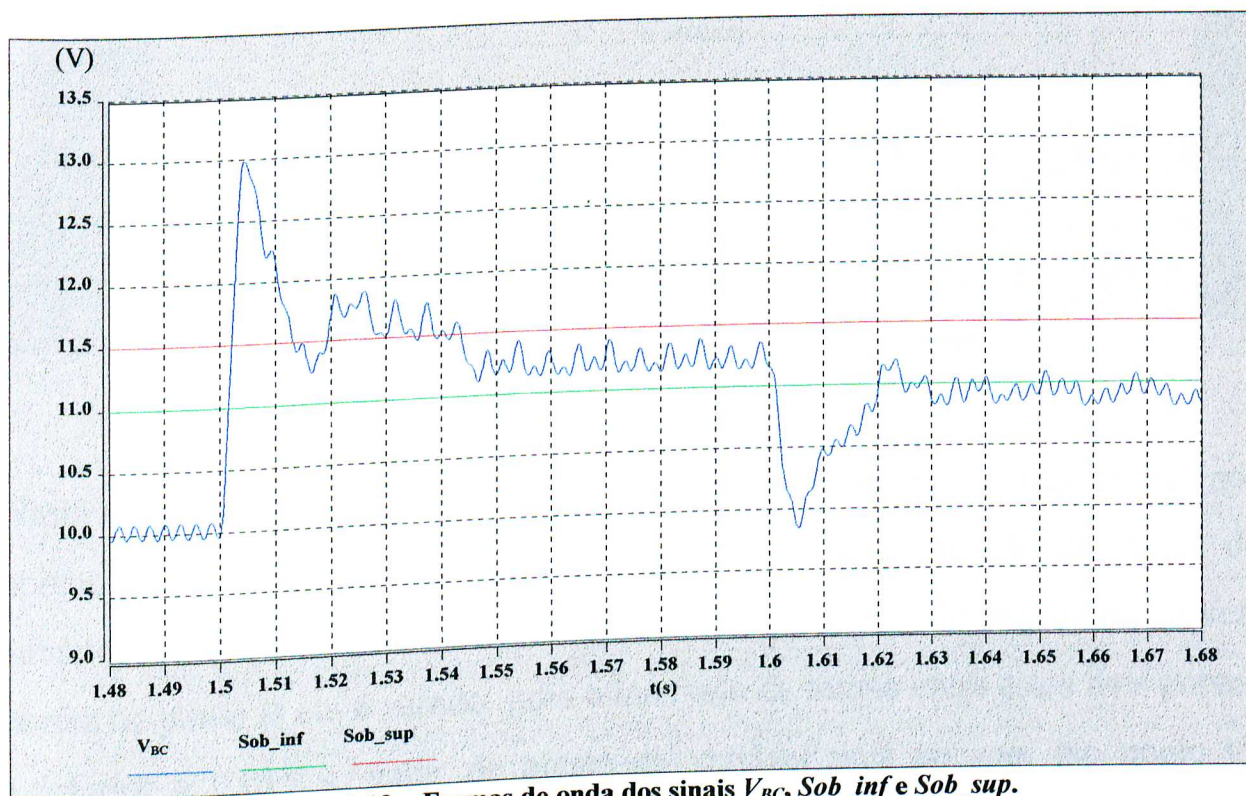
- 0, se  $V_{BC} > sob\_inf$  ;
- 1, se  $V_{BC} < sob\_inf$ .

O temporizador “Temp<sub>1</sub>” é acionado no instante em que a sua entrada,  $sol_1$ , atingir o valor 1 e, ao superar o intervalo de tempo definido pela variável  $pick\_up\_sob$ , a sua saída,  $sol_2$ , passa de 0 para 1. Se  $sol_1$  voltar a ser 0, o temporizador é instantaneamente zerado. O mesmo procedimento se aplica ao temporizador “Temp<sub>2</sub>”, onde o intervalo de tempo é agora definido pela variável  $drop\_out\_sob$ . Se ocorrer uma sobretensão, o sinal  $sol_2$  assumirá o valor 1 e  $sol_1$  assumirá o valor 0. Nestas condições, o bloco “Lógica de Sobretensão” atribuirá, à sua saída,  $sob$ , o valor  $-10000$ . Este elevado número introduzirá, intencionalmente, um erro muito grande no regulador PI (fig. 3.17), obrigando, desta forma, o C.E. operar no modo totalmente indutivo, para evitar a danificação dos equipamentos. Por outro lado, se não houver uma sobretensão ou ainda se a tensão da barra controlada,  $V_{BC}$ , retornar a um nível abaixo do valor  $sob\_inf$ , ao fim do intervalo de tempo  $drop\_out\_sob$ , o sinal  $sol_2$  assumirá o valor 1 e  $sol_1$  será 0. Nestas condições, o sinal  $sob$  assumirá o valor 0.

---



A título de ilustração, as figuras 3.19, 3.20 e 3.21 evidenciam, através de suas formas de onda, os comentários pertinentes a atuação e a desativação da estratégia de sobretensão. Destaca-se, entretanto, que as formas de onda destas figuras não correspondem à simulação do sistema elétrico mostrado anteriormente na figura 3.6.



**Figura 3.19 – Formas de onda dos sinais  $V_{BC}$ ,  $Sob\_inf$  e  $Sob\_sup$ .**

Na figura 3.19 está ilustrado o comportamento do sinal  $V_{BC}$  (em cor azul) durante a ocorrência de uma sobretensão. Até o instante de tempo 1,5 s, o valor 10 V indica que a tensão da barra controlada está em 1 p.u.. A partir deste instante, a tensão se eleva bruscamente, e chega a ultrapassar o limite superior  $Sob\_sup$  (em cor vermelha). A figura 3.20 mostra uma ampliação deste momento.



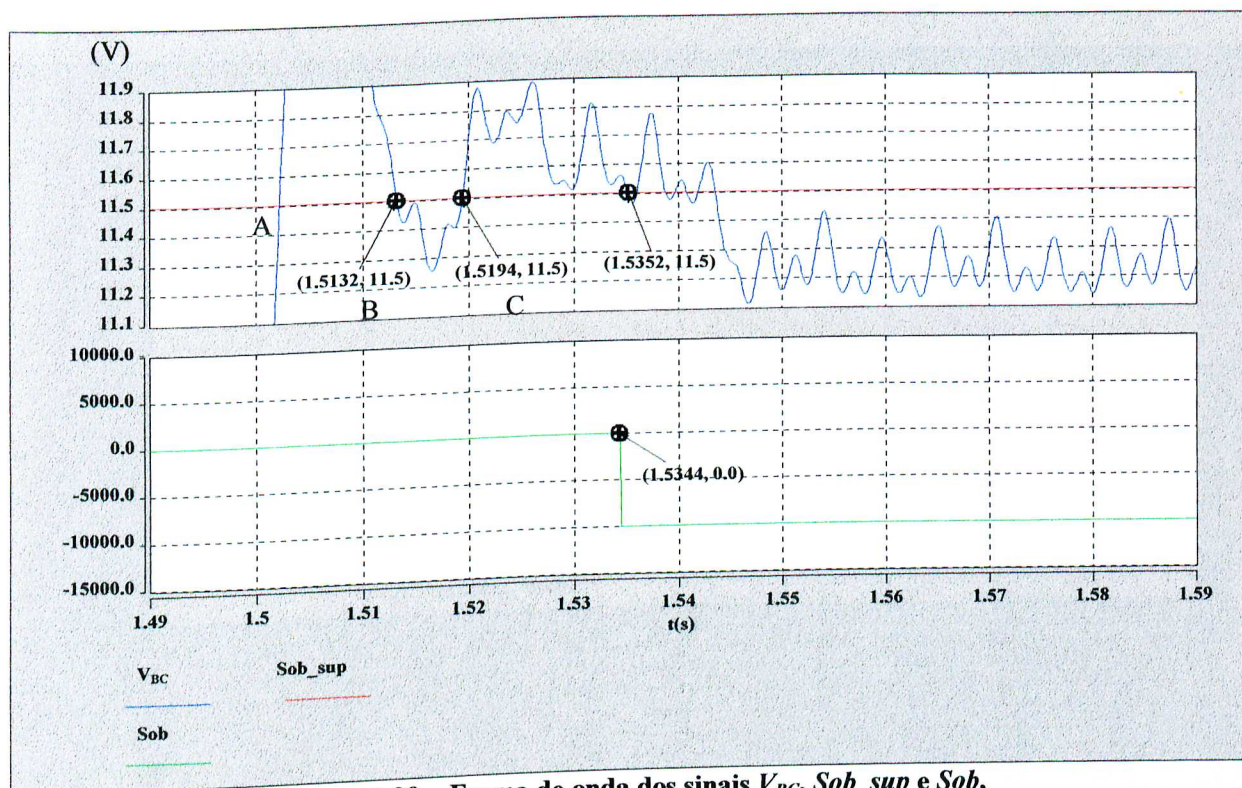


Figura 3.20 – Forma de onda dos sinais  $V_{BC}$ ,  $Sob\_sup$  e  $Sob$ .

Nesta figura, nota-se claramente que a tensão ultrapassa, por três vezes (nos pontos A, B e C), o limite superior  $Sob\_sup$  antes da atuação da lógica de sobretensão. No ponto A, o temporizador “Temp<sub>1</sub>” é ativado pela primeira vez, porém no ponto B ele é zerado, pois o intervalo de tempo entre estes dois pontos é inferior a 0,015 s, valor de ajuste da variável  $pick\_up\_sob$ . No ponto C, “Temp<sub>1</sub>” é novamente ativado e, durante os próximos 0,015 s, a tensão permanece sempre acima do valor  $Sob\_sup$ , obrigando, desta forma, ao sinal  $Sob$  (em cor verde) assumir, a partir do instante 1,5344 s, o valor -10000. Nestas condições, o C.E. absorverá o máximo possível de reativos (RCT com ângulo de disparo igual a 90°), mantendo, até o instante 1,6 s, a tensão da barra controlada um pouco acima de 1 p.u., conforme indicado na figura 3.19. Observa-se ainda na figura 3.19 que a tensão sofre um afundamento a partir de 1,6 s. Para ilustrar este ponto, é necessário recorrer à ampliação mostrada na figura 3.21.



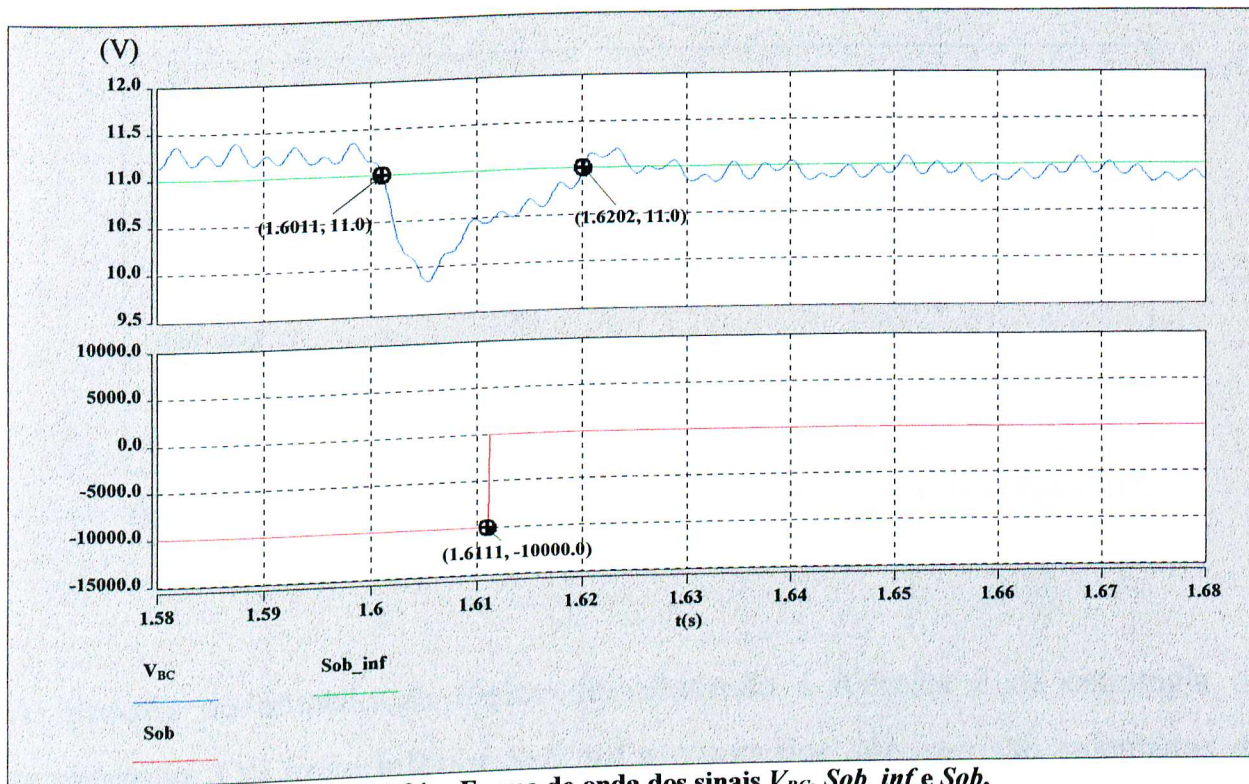


Figura 3.21 – Forma de onda dos sinais  $V_{BC}$ ,  $Sob\_inf$  e  $Sob$ .

O temporizador “Temp<sub>2</sub>” é acionado no instante 1,6011 s (identificado na figura 3.21). Após 0,01 s (valor adotado para a variável  $drop\_out\_sob$ ), como a tensão  $V_{BC}$  não ultrapassou novamente o limite inferior  $Sob\_inf$ , então o sinal  $Sob$  ( em cor vermelha) é levado novamente a zero, caracterizando a desativação da lógica de sobretensão. A partir deste momento, a operação do C.E. passa a ser ditada exclusivamente pelo regulador PI (figura 3.15).

### b) Estratégia de Subtensão

A figura 3.22 refere-se ao diagrama de blocos adotado para a estratégia de subtensão.

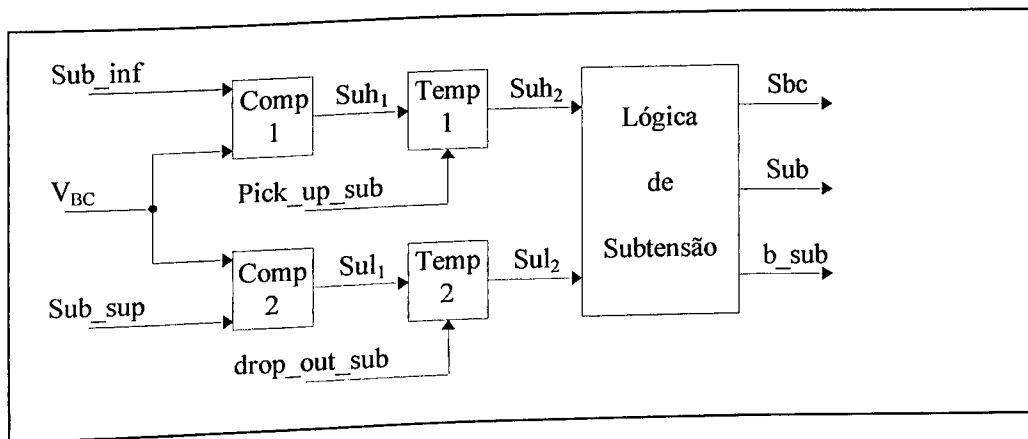


Figura 3.22 - Diagrama de blocos da Estratégia de Subtensão ilustrada na figura 3.17.

A filosofia de atuação da lógica de subtensão é idêntica à da estratégia de sobretensão. O Limite inferior  $Sub\_inf$  e o superior  $Sub\_sup$  são calculados de acordo com as equações a seguir:

$$Sub\_inf = \frac{Lsubinf}{100} \times \frac{V_{REF}}{V_{MAX}} \times 10 \tag{3.7}$$

$$Sub\_sup = \frac{Lsubsup}{100} \times \frac{V_{REF}}{V_{MAX}} \times 10 \tag{3.8}$$

A figura 3.22, analogamente à estratégia de sobretensão, apresenta atrasos na atuação e na desativação da sua lógica de funcionamento. Estes atrasos, representados pelas variáveis  $pick\_up$  e  $drop\_out$ , são necessários para evitar a atuação intermitente da estratégia no controle, devido aos transitórios presentes na tensão da rede durante uma determinada perturbação.

A subtensão começa a ser caracterizada quando o sinal  $V_{BC}$  apresentar um valor inferior ao parâmetro  $Sub\_inf$  e o processo de desativação da lógica de subtensão se inicia quando  $V_{BC}$  for superior a  $Sub\_sup$ .

Nota-se na figura 3.22 que, o bloco “Lógica de Subtensão” possui três saídas:  $Sbc$  (variável digital),  $Sub$  e  $b\_sub$ . Na presença de uma subtensão, estes sinais assumem os seguintes valores:  $Sbc \rightarrow$  nível lógico “1”;  $Sub = 0$  e  $b\_sub = bce\_subtensão$  (Tab. 3.8). Na ausência de uma subtensão:  $Sbc \rightarrow$  nível lógico “0”;  $Sub = 1$  e  $b\_sub = 0$ .

As figuras 3.23, 3.24 e 3.25 reproduzem, através de suas formas de onda, as características dos sinais que atuam na estratégia de subtensão. Estas figuras são apenas para fins ilustrativos e não correspondem ao sistema simulado da fig. 3.6.

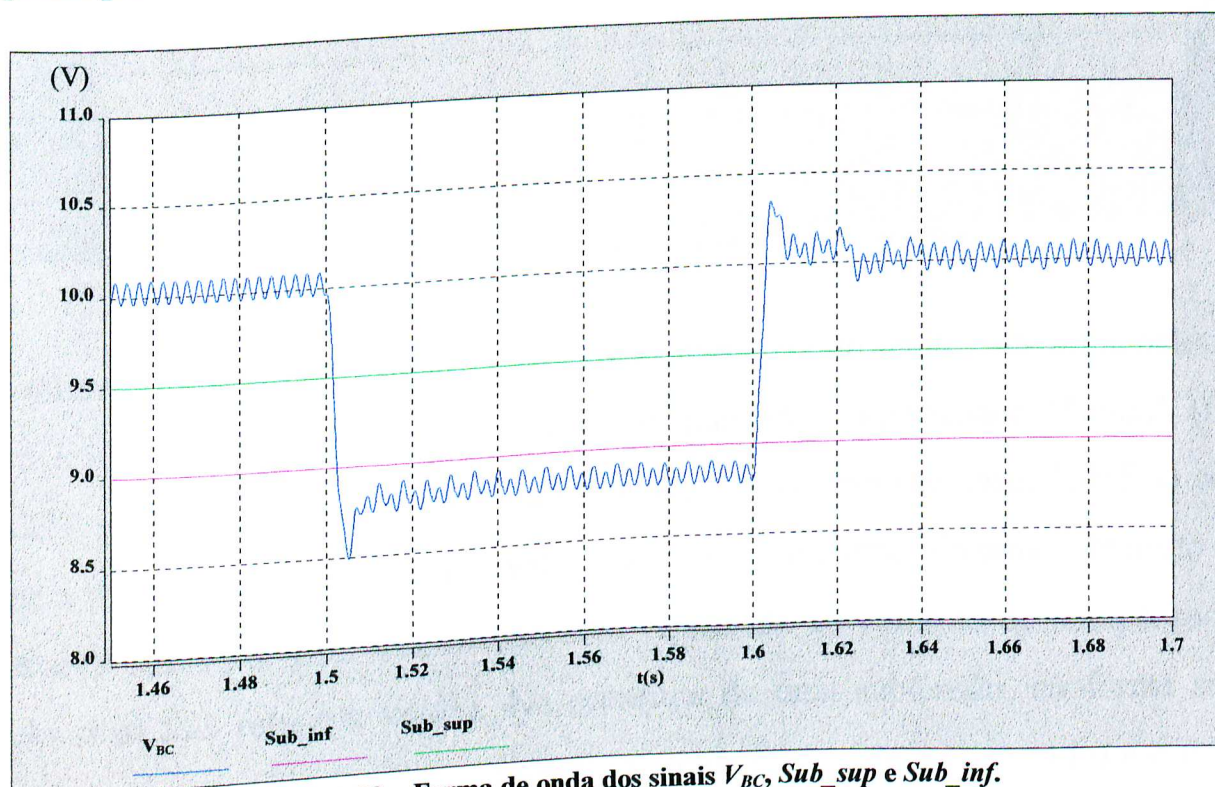
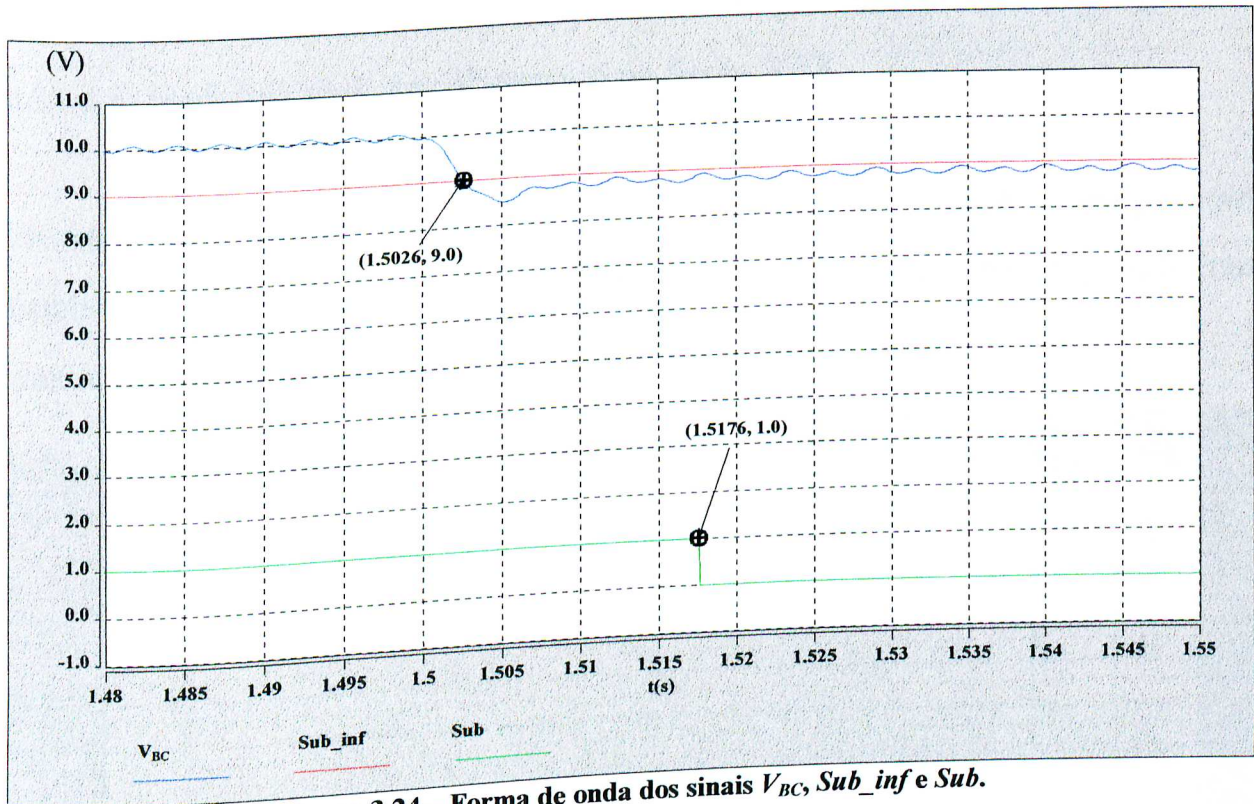


Figura 3.23 – Forma de onda dos sinais  $V_{BC}$ ,  $Sub\_sup$  e  $Sub\_inf$ .



A figura 3.23 mostra a forma de onda do sinal  $V_{BC}$  e os limites de atuação ( $Sub\_inf$ ) e desativação ( $Sub\_sup$ ) da lógica de subtensão. A tensão da barra controlada, representada na figura 3.23 pelo sinal  $V_{BC}$ , sofre um afundamento no instante 1,5 s e em seguida ultrapassa o limite  $Sub\_inf$  (em cor vermelha). A figura 3.24 apresenta uma ampliação nas proximidades desta ultrapassagem.



Conforme indicado pela figura 3.24, a ultrapassagem do limite  $Sub\_inf$  aconteceu em 1,5026 s. Em decorrência, ocorre o disparo do temporizador “Temp<sub>1</sub>” (fig. 3.22), após decorrido o intervalo de tempo  $pick\_up\_sub$  (no caso, 0,015 s) sem que a tensão cruze novamente o valor  $Sub\_inf$ , é caracterizado uma subtensão no instante 1,5176 s. Esta informação será repassada ao controle do compensador pelo sinal  $Sub$  (em cor verde). Na presença de uma subtensão, conforme será analisado a seguir, o CCT é retirado do sistema (caso esteja conectado) e o RCT é forçado a operar com ângulo de disparo fixo, correspondente ao valor



*bce\_subtensão*. Esta estratégia de subtensão tem a finalidade de evitar que, em condições de curto-circuito no sistema, o controle atue tentando elevar a tensão na barra controlada, conectando o CCT e minimizando a quantidade de reativos absorvidos pelo RCT, causando elevados transitórios na rede quando a proteção do sistema elétrico atuar “limpando” a falta [5]. Nesta simulação, em particular, esta condição operacional faz com que a tensão permaneça constante em 8,8 V até 1,6 s, conforme pode ser observado na figura 3.23.

Visualizando novamente a figura 3.23, constata-se que a tensão começa a ser restabelecida a partir de 1,6 s. A figura 3.25 apresenta uma ampliação nas proximidades deste instante.

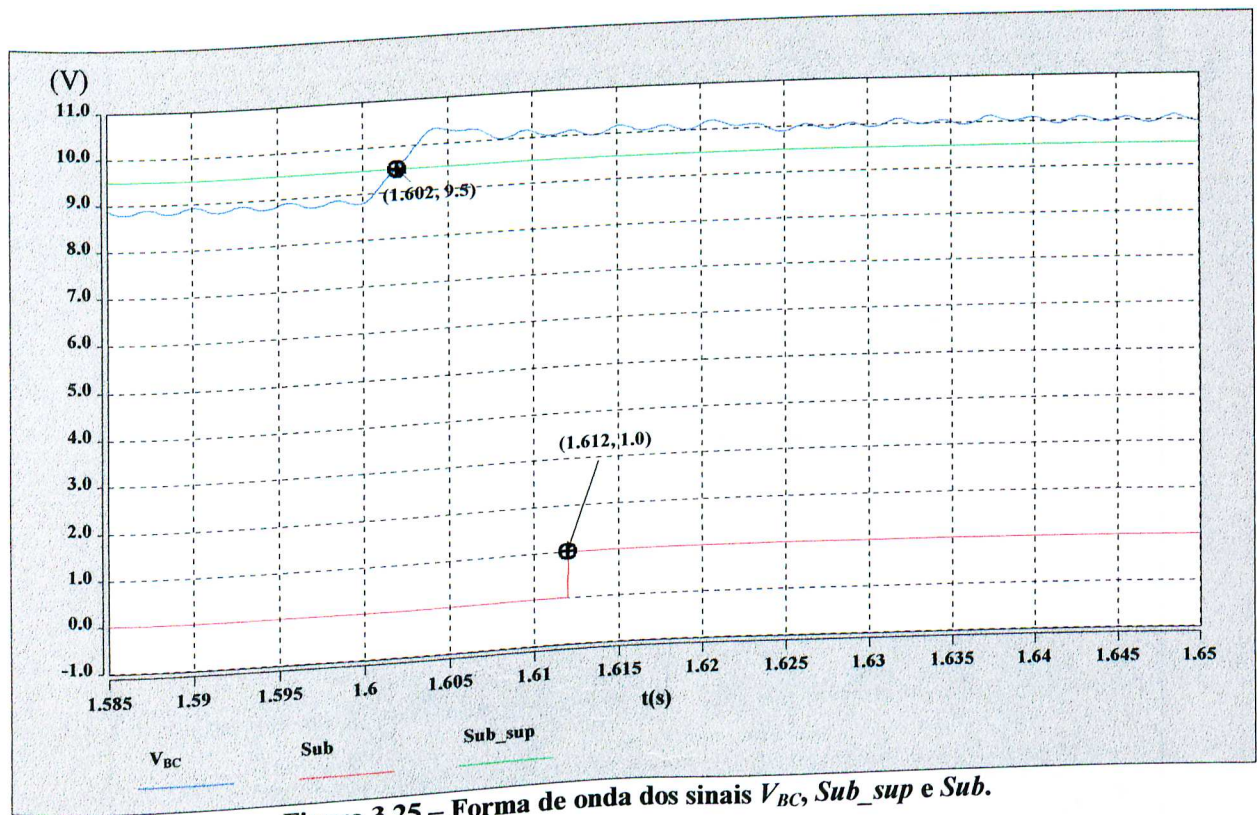


Figura 3.25 – Forma de onda dos sinais  $V_{BC}$ ,  $Sub\_sup$  e  $Sub$ .

Da observação da figura 3.25, nota-se que a tensão intercepta o limite  $Sub\_sup$  (em cor verde) no instante 1,602 s e, a partir daí, permanece sempre acima deste

limite. Desta forma, após o retardo *drop\_out\_sub* (no caso, 0,010 s), o temporizador “Temp<sub>2</sub>” (fig. 3.22) informa que a subtensão já não existe mais. Portanto, no instante 1,612 s o sinal *Sub* retorna ao valor 1 (indicando que a subtensão não existe mais), conforme constatado pela figura 3.25.

### c) Regulador de Tensão

A figura 3.26, mostra o diagrama de blocos representativo do regulador de tensão da *Unidade de Controle* do C.E.

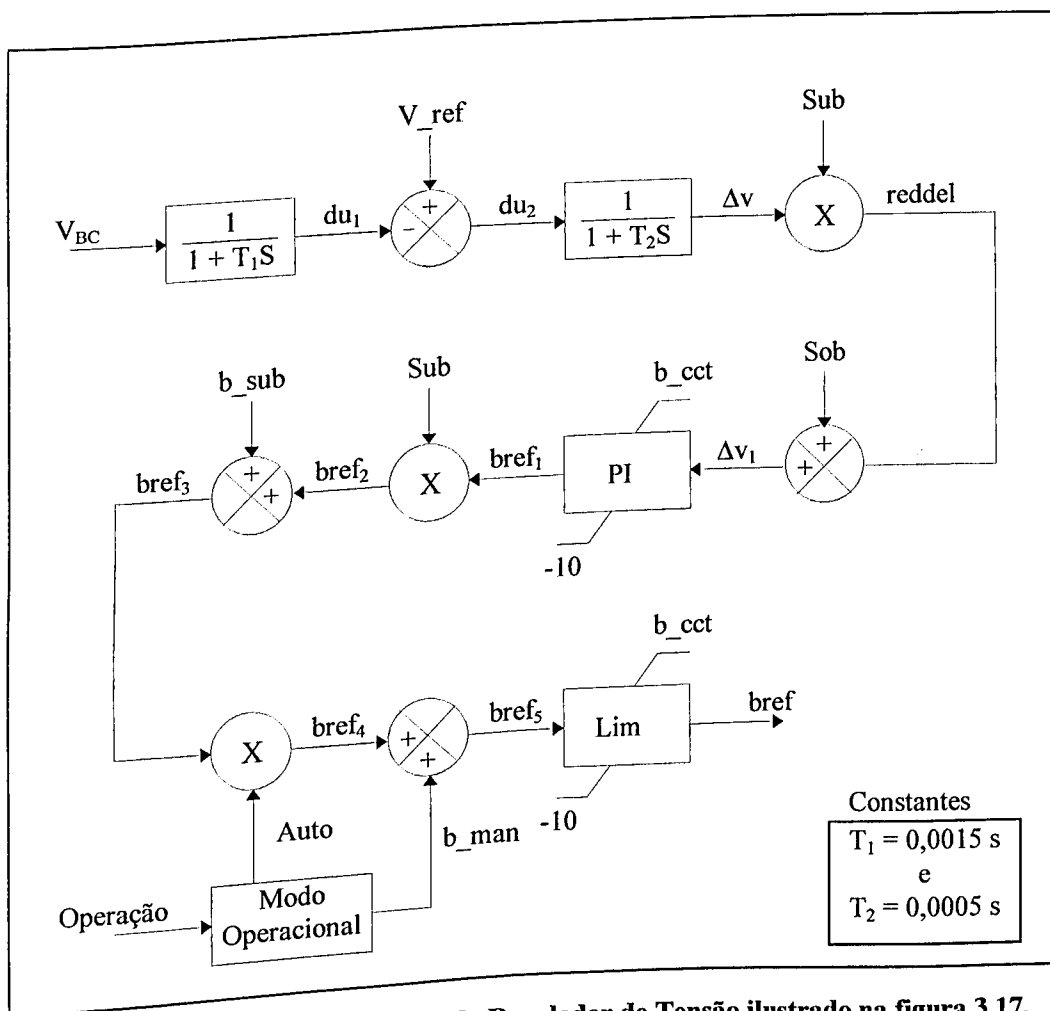


Figura 3.26 - Diagrama de blocos do Regulador de Tensão ilustrado na figura 3.17.



Este diagrama de blocos recebe informações da *Unidade de Medição* e das estratégias de sobretensão e de subtensão. Os sinais provenientes destas unidades são:  $V_{BC}$  (da unidade de medição),  $Sob$  (da estratégia de sobretensão), e  $Sub$  e  $b_{sub}$  (da estratégia de subtensão). O Regulador de Tensão é informado ainda pelo usuário, através da variável *operação* (Tab.3.8), se a sua operação será manual ou automática. Em operação automática, o bloco “Modo Operacional”, ilustrado na figura 3.26, atribui o valor 1 à variável  $Auto$  e 0 para  $b_{man}$ . Para operação manual,  $Auto$  e  $b_{man}$  assumem, respectivamente, os valores 1 e  $bce\_manual$  (Tab.3.8).

Com base na figura 3.26, constata-se que o regulador de tensão inicia sua função filtrando o sinal  $V_{BC}$ , dando origem ao sinal  $du_1$ . O sinal  $du_2$  é obtido comparando-se  $du_1$  com um valor de referência, que é fornecido pela equação a seguir:

$$V_{ref} = \frac{V_{REF}}{V_{MAX}} \times 10 \quad (3.9)$$

Onde:

$V_{REF}$  e  $V_{MAX}$  são dados de entradas (Tab.3.8)

O sinal  $du_2$  passa por um outro filtro, com constante de tempo  $T_2$ , e se transforma no sinal  $\Delta_V$ . Na ausência de sobretensões e subtensões,  $Sub$  e  $Sob$  valem 1 e 0, respectivamente. Nestas condições, o sinal  $\Delta_V$  é atribuído a  $\Delta_{V1}$ . Prosseguindo-se com a análise, nota-se que o sinal  $\Delta_{V1}$  é injetado em um regulador do tipo Proporcional-Integral, com limites dinâmicos. O tratamento dado por este regulador PI à variável  $\Delta_{V1}$  será abordado mais adiante com maiores detalhes. A saída do regulador PI, sinal  $bref_1$ , é multiplicada por  $Sub$ . Esta operação produz o

sinal  $bref_2$  que, ao ser somado com a variável  $b\_sub$ , dá origem ao sinal  $bref_3$ . Se a estratégia de subtensão não for ativada, os sinais  $bref_1$ ,  $bref_2$  e  $bref_3$  são idênticos. Caso contrário,  $bref_2$  é zero e o sinal  $bref_3$  assume o valor dado por  $b\_sub$ . Conforme anteriormente descrito, na operação automática, o sinal  $Auto$  vale "1" e  $b\_man$  "0". Neste caso,  $bref_4$  repassa a  $bref_5$  o mesmo valor recebido de  $bref_3$ . Por outro lado, se uma ordem de operar em manual for efetivada ao bloco "Modo Operacional",  $bref_4$  será zero e o sinal  $bref_5$  assume o valor dado por  $b\_man$ . Finalmente, ao passar o sinal  $bref_5$  pelo bloco limitador, obtém-se, através do sinal  $bref$ , a susceptância de referência do C.E. Se  $bref$  for negativo indica a necessidade do C.E. operar na região indutiva, sendo sua capacidade máxima de absorção de reativos alcançada com o valor  $bref$  igual a  $-10$  (limite inferior do limitador). Quando  $bref$  for positivo, o modo de operação do C.E. deverá ser capacitivo, gerando reativos para o sistema. A capacidade máxima de geração é atingida em  $bref = b\_cct$  (limite superior do limitador).

O elemento de maior importância no regulador de tensão é, sem dúvida alguma, o regulador PI. 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.

Reconhecendo estes aspectos, é útil, neste instante, esclarecer o seu princípio de funcionamento. Em termos de diagrama de blocos, o regulador PI é dado pela figura 3.27.

Os parâmetros identificados na figura 3.27 são, via de regra, relacionados com as informações fornecida pelo usuário. Assim,  $K_P$ ,  $K_I$  e  $bce\_init$  são obtidos

---

diretamente dos dados de entrada (Tab. 3.8), enquanto,  $b\_cct$  é obtido indiretamente, conforme a equação a seguir:

$$b\_cct = 10 \times \frac{377 \times lc\_rct}{\left( \frac{1}{377 \times cc\_cct} - 377 \times lc\_cct \right)} \quad (3.10)$$

Onde:

$lc\_rct$ ,  $cc\_cct$  e  $lc\_cct$  são obtidos também da Tab. 3.8.

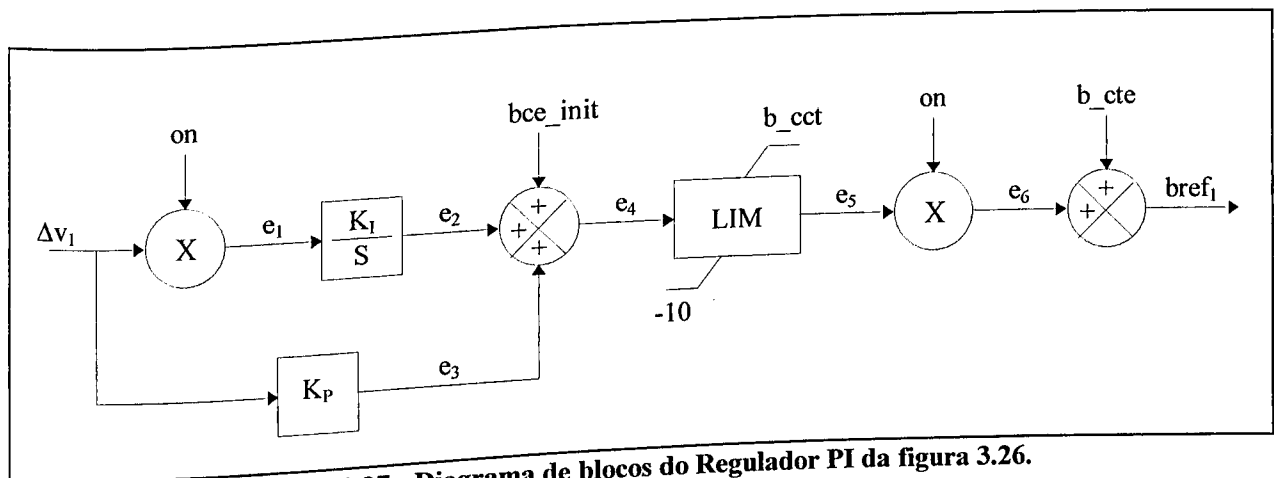


Figura 3.27 - Diagrama de blocos do Regulador PI da figura 3.26.

Ainda na figura 3.27, os sinais  $on$  e  $b\_cte$  dependem exclusivamente do valor da saída do limitador, sinal  $e_5$ . Há de se considerar no entanto, que estes dois sinais são inicializados com os valores 1 e 0, respectivamente. Se, por uma razão qualquer, o sinal  $e_4$  superar o limite  $b\_cct$  ou  $-10$ , a variável  $on$  assume instantaneamente o valor zero e o sinal  $b\_cte$  passará de 0 para o valor do limite superado, ou seja:

- Se  $e_4 \leq -10 \rightarrow b\_cte = -10$ ;
- Se  $e_4 \geq b\_cct \rightarrow b\_cte = b\_cct$

Por outro lado, se a saída do limitador estiver dentro dos seus limites, *on* recebe o valor 1 e *b\_cte* 0.

Ressalta-se, finalmente, que os comentários supracitados, caracterizam este regulador PI como sendo de limite dinâmico. Isso porque, quando um dos limites é superado, a entrada do integrador ( $e_1$ ) é zerada e, nestas condições, a sua saída, sinal  $e_2$ , permanece inalterada em seu último valor evitando o acúmulo de erros no regulador.

A seguir, será evidenciado as formas de onda dos principais sinais presentes no diagrama de blocos do regulador de tensão. Suas representações gráficas estão ilustradas na figuras que se seguem:

A figura 3.28 apresenta a forma de onda dos sinais  $du_1$  e  $V_{ref}$ . Esta figura corresponde ao tempo total da simulação do sistema elétrico representado na figura 3.6. No instante 0,4 s ocorre a abertura do disjuntor da linha 2 e em 1,0 s acontece a abertura do disjuntor da linha 3. Nestas condições, toda a energia elétrica é, agora, transportada através de uma única linha de transmissão (linha1, figura 3.6).

O sinal  $du_1$  (na figura 3.28 em cor azul) é obtido através da filtragem do sinal  $V_{BC}$ . A constante de tempo deste filtro é de 0,0015 s [5]. A comparação entre o sinal  $du_1$  e  $V_{ref}$  (tensão desejada na barra controlada), dá origem ao erro  $du_2$ .

---

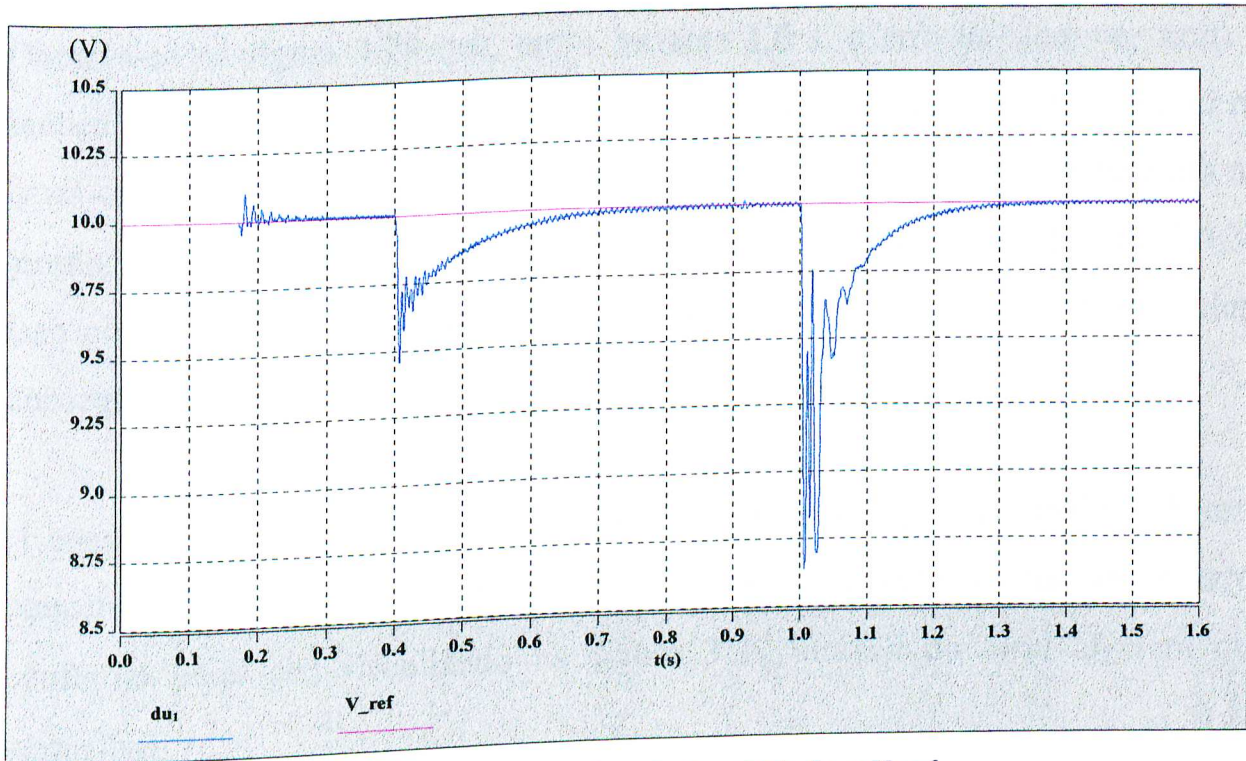


Figura 3.28 – Forma de onda dos sinais  $du_1$  e  $V_{ref}$ .

A figura 3.29 mostra este sinal de erro ( $du_2$ ), com a sua respectiva filtragem ( $\Delta_V$ ), entre os instantes 0,85 e 1,4 s.

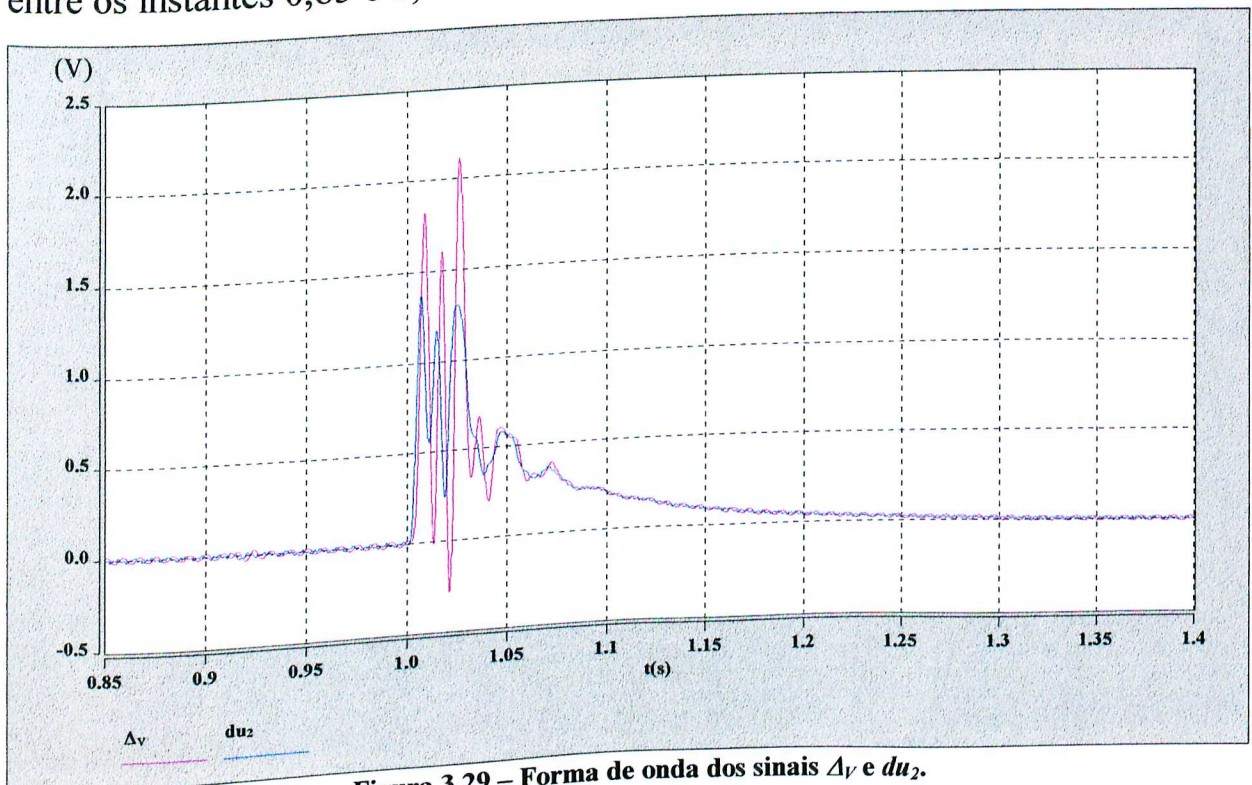


Figura 3.29 – Forma de onda dos sinais  $\Delta_V$  e  $du_2$ .



Observa-se na figura 3.29 que, até o instante 1,0 s, o erro  $du_2$  (em cor azul) é praticamente zero, caracterizando portanto que o C.E. está mantendo a tensão na barra controlada no valor desejado. Porém, em 1,0 s ocorre um afundamento na tensão, provocando o aparecimento de um erro no sinal  $du_2$ , da ordem de 1,4 V. Isso obriga a atuação imediata do regulador de tensão que, em poucos ciclos, consegue novamente levar o erro  $du_2$  a zero.

A constante de tempo utilizada na filtragem do sinal  $du_2$  é de 0,0005 s. E este pequeno valor, sugerido pela referência [5], provocou fortes oscilações no erro, conforme pode ser visualizado na figura 3.29 através do sinal  $\Delta_V$  (em cor vermelha).

A figura 3.30 apresenta a forma de onda dos sinais  $\Delta_{V1}$  e  $reddel$ , no período entre 0 e 1,6 s.

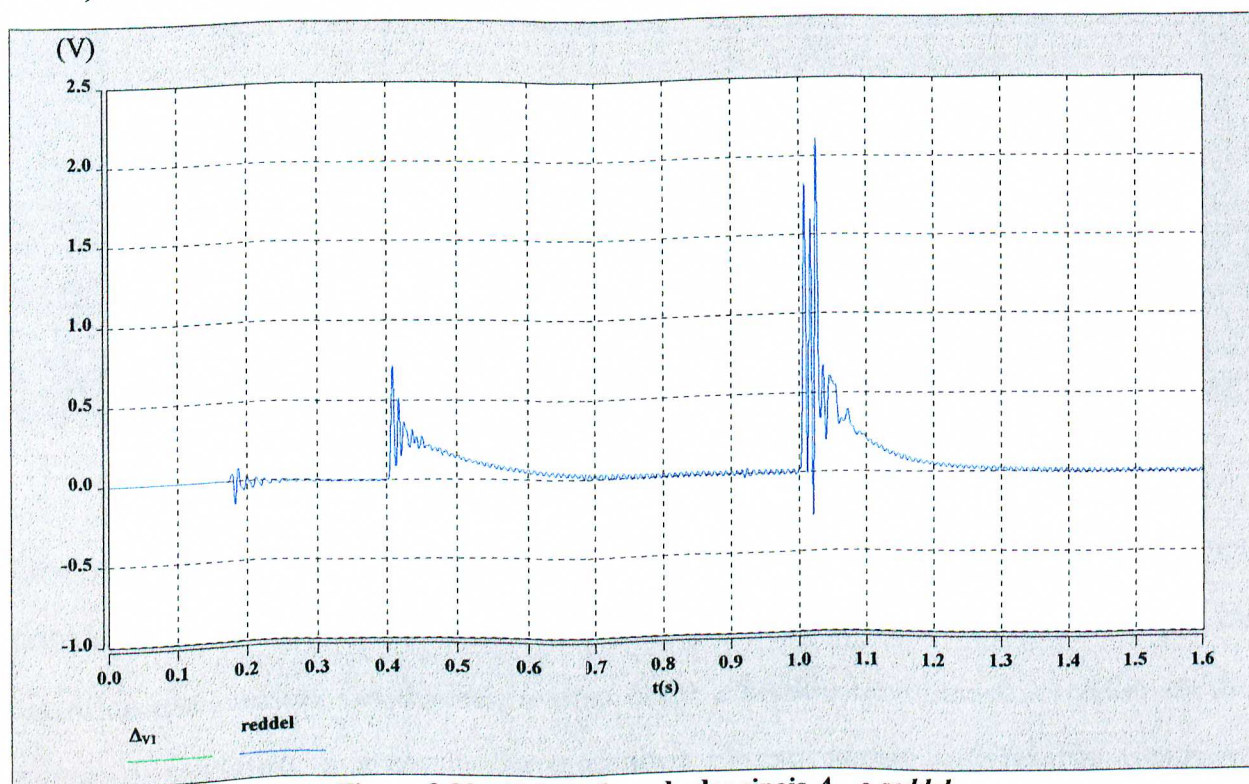


Figura 3.30 – Forma de onda dos sinais  $\Delta_{V1}$  e  $reddel$ .

Na figura 3.30, percebe-se que os sinais  $\Delta_{V1}$  e *reddel* estão superpostos e idênticos ao sinal  $\Delta_V$ . Exceto nas condições de sub ou sobretensão isso sempre ocorrerá. Isso porque, durante a presença de uma subtensão, a variável *Sub* é igual a 0. Desta forma, os sinais  $\Delta_{V1}$  e *reddel* serão zerados. No caso de uma sobretensão, o valor atribuído a *reddel* será -10000, sendo este valor fornecido pela variável *Sob*.

A figura 3.31 mostra os sinais de entrada e saída do regulador PI.

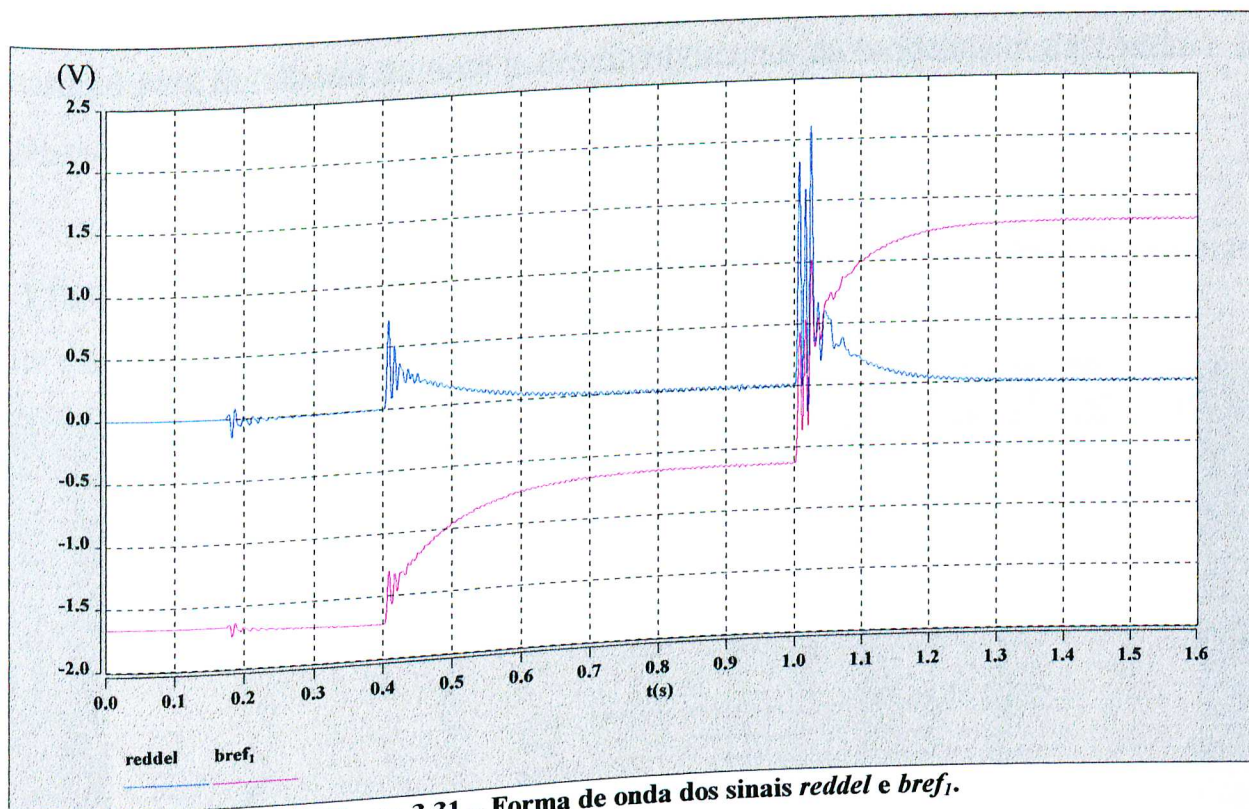


Figura 3.31 – Forma de onda dos sinais *reddel* e *bref1*.

Observa-se nesta figura que a saída do regulador PI, sinal *bref1*, permanece constante durante os intervalos em que a sua entrada, sinal *reddel*, é zero. Isto significa que, nestas condições, o erro entre a tensão desejada e a tensão medida é nulo e, portanto, a atuação do regulador PI está sendo satisfatória. Conforme mencionado anteriormente, se a saída do regulador PI for negativa, caracteriza-se



a operação indutiva para o C.E., tendo no valor -10 a capacidade máxima de absorção de reativos. Este fato é comprovado na figura 3.31. No momento da perda da linha 1, que corresponde ao instante 0,4 s, a tensão na barra sofreu um afundamento (fig. 3.28) e, para retornar ao seu valor de referência, o C.E. passou a absorver uma quantidade cada vez menor de reativos do sistema, encontrando em  $bref_1$  igual a -0,6 o valor ideal. Ainda com relação a figura 3.31 nota-se que, no instante 1,0 s, com a retirada da linha 3, o sinal  $bref_1$  passou a ser positivo, caracterizando operação capacitiva. Neste segundo afundamento de tensão, o C.E. foi obrigado a conectar o CCT para gerar reativos para o sistema. Este assunto será detalhado durante o desenvolvimento da modelagem da *Unidade de Distribuição*.

A figura 3.32 ilustra as formas de onda dos sinais  $bref_1$  e  $bref_2$ , também presentes no diagrama de blocos do regulador de tensão.

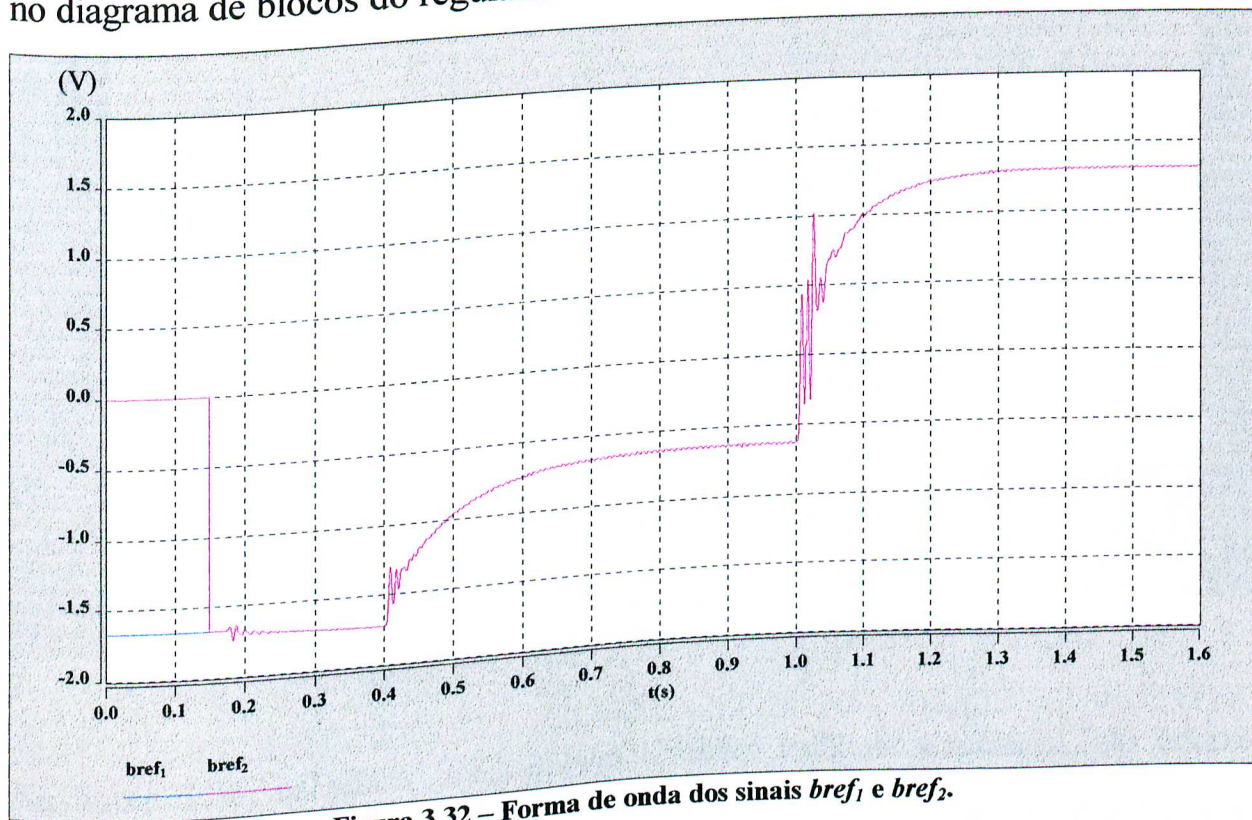
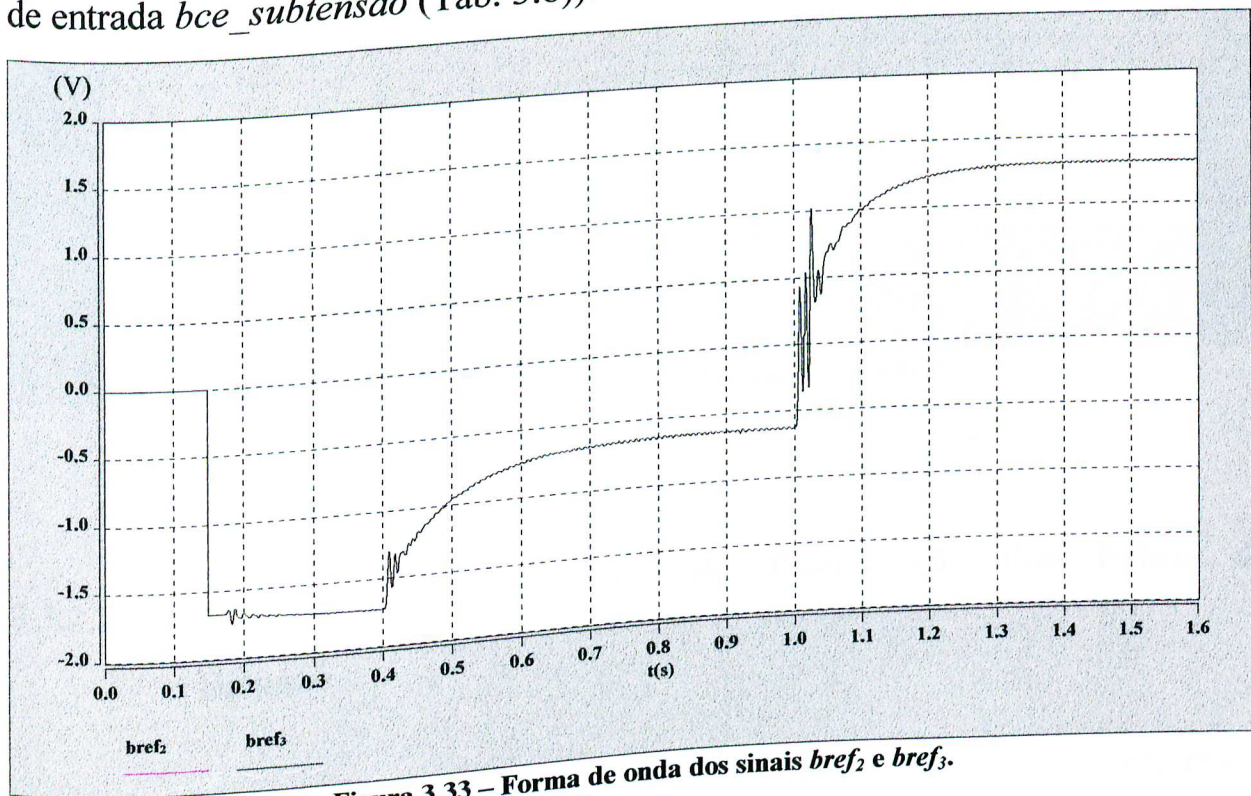


Figura 3.32 – Forma de onda dos sinais  $bref_1$  e  $bref_2$ .



Nota-se que a saída do regulador PI, sinal  $bref_1$ , é ignorada até o instante 0,150 s (valor utilizado na simulação para o dado de entrada  $ton$  - Tab. 3.8). Isso ocorre porque, durante o intervalo de tempo compreendido entre 0 e  $ton$ , o sinal  $bref_2$  (em cor vermelha) é forçado a zero (através da variável  $Sub$  que é inicializada em zero e permanece neste valor até o instante  $ton$ ). Este artifício permite que o início da operação do C.E. (instante  $ton$ ) seja suave, conforme pode ser constatado na figura 3.32, onde se observa pequenas oscilações no sinal  $bref_2$ .

Conforme pode ser observado na figura 3.33, os sinais  $bref_2$  e  $bref_3$  estão superpostos. Porém, se ocorrer uma subtensão,  $bref_2$  será forçado a zero (através da variável  $Sub$ ) e  $bref_3$  assumirá o valor do sinal  $b\_sub$  (que é definido pelo dado de entrada  $bce\_subtensão$  (Tab. 3.8)).



Na figura 3.34, os sinais  $bref_3$  e  $bref$  também estão superpostos. Isto ocorreu porque o sinal  $bref_3$  está dentro dos limites exigidos pelo limitador e o modo de

operação do C.E. foi definido em automático. Neste particular, as variáveis *Auto* e *b\_man* valem 1 e 0, respectivamente. Por outro lado, deve-se salientar que, em operação manual, o sinal *bref* assume o valor da variável *b\_man*, que é pré-definido pelo usuário através do dado de entrada *bce\_manual* (Tab.3.8). O sinal *bref*, correspondente ao valor desejado para a susceptância do C.E., é agora injetado na *Unidade de Distribuição dos Pulsos de Disparo*. Este procedimento será discutido no próximo item.

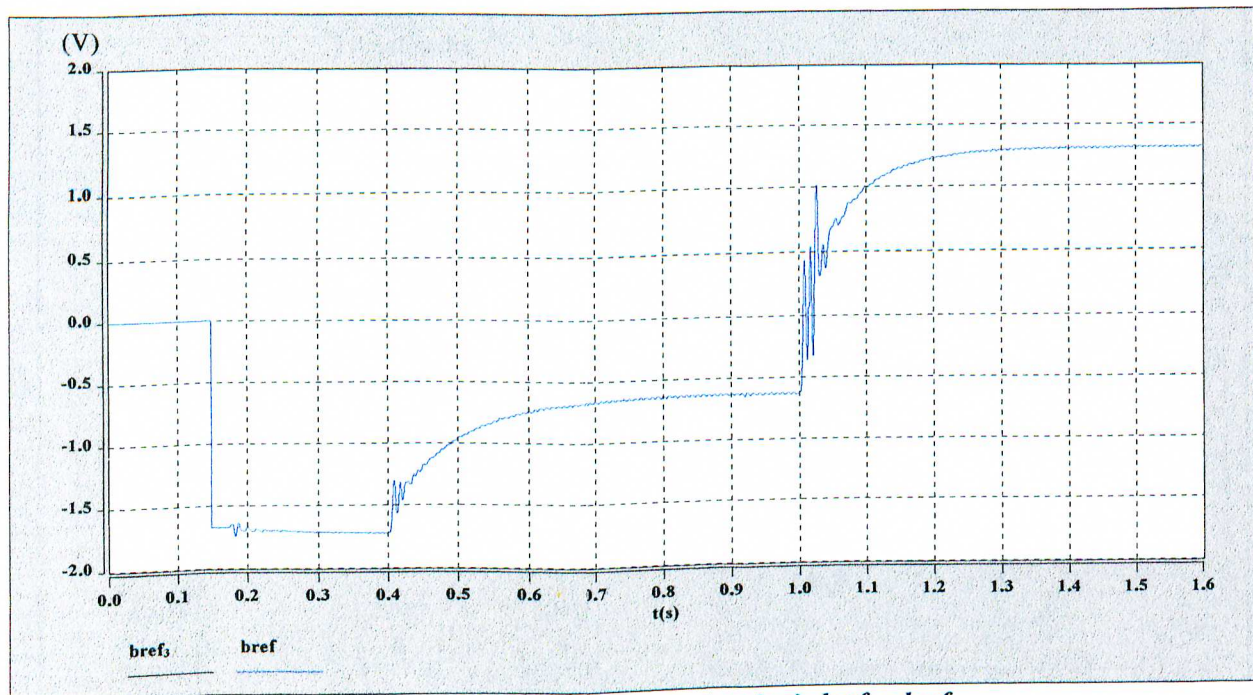


Figura 3.34 – Forma de onda dos sinais *bref<sub>3</sub>* e *bref*.

### 3.3.3.2 - Modelagem da Unidade de Distribuição dos Pulsos de Disparo

A *Unidade de Distribuição dos Pulsos de Disparo* tem por objetivo interpretar o valor da susceptância requerida pelo sistema (*bref*) para manter a tensão desejada na barra controlada pelo C.E, definindo a necessidade de chaveamento do CCT e



o montante de reativo a ser absorvido pelo RCT. O modelo matemático desta unidade baseia-se no diagrama da figura 3.35.

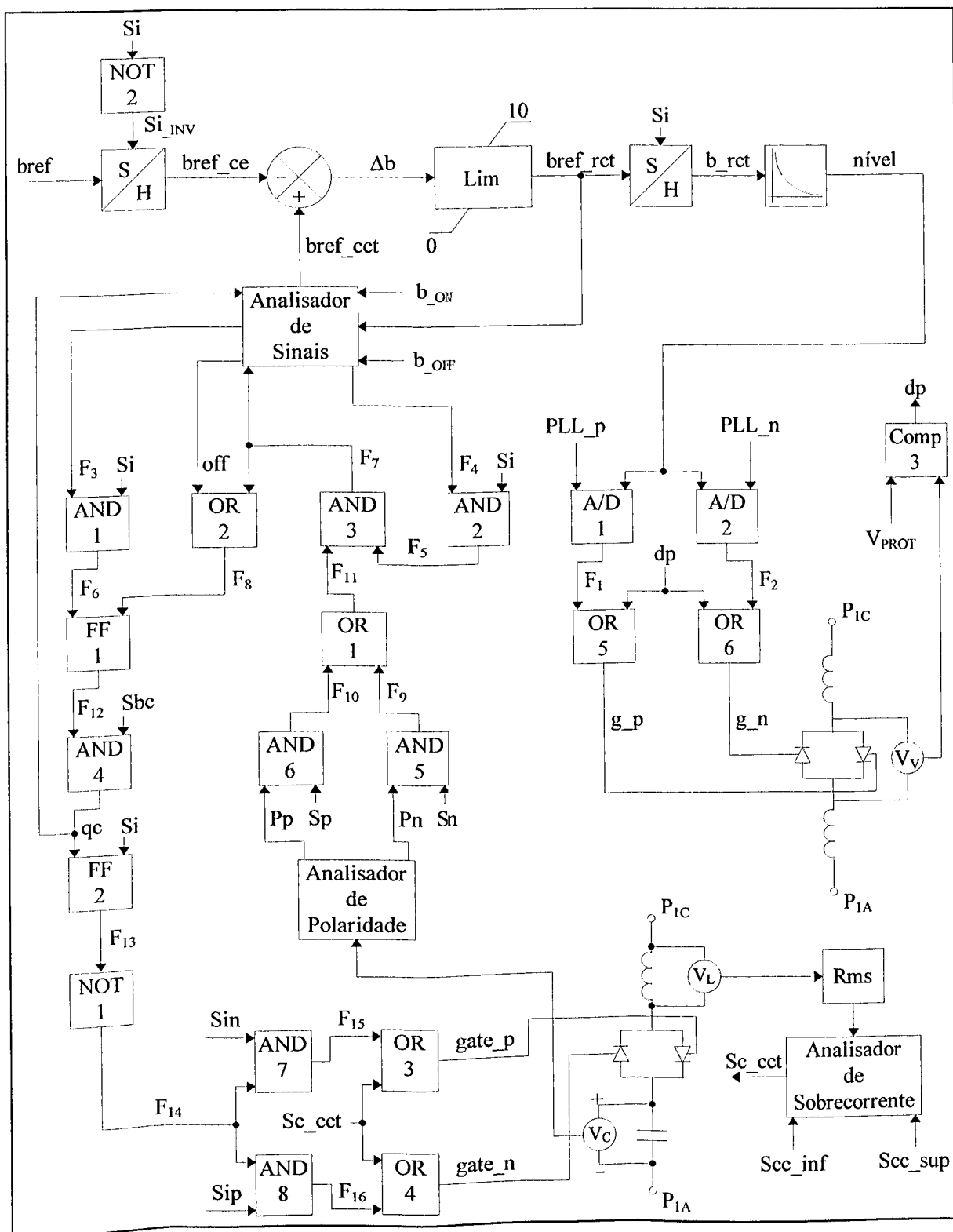


Figura 3.35 - Diagrama de blocos da Unidade de Distribuição.

Na figura 3.35 estão representadas as seguintes funções: Sincronização com a rede, Disparo do RCT e do CCT, verificação da polaridade do capacitor do CCT e as proteções do C.E. Deste modo, e diante da complexidade envolvida no diagrama de blocos da unidade de distribuição, suas funções serão reapresentadas individualmente.

### a) Sincronização com a rede

Os sinais  $Sp$ ,  $Sn$ ,  $Si$ ,  $Sin$ ,  $Sip$  identificados na figura 3.35, permitem uma perfeita sincronia entre os pulsos de disparo e a tensão aplicada nos terminais dos tiristores do circuito de potência. A figura 3.36 ilustra o circuito utilizado para a formação dos sinais de sincronismo que estão presentes no diagrama de blocos da figura 3.35.

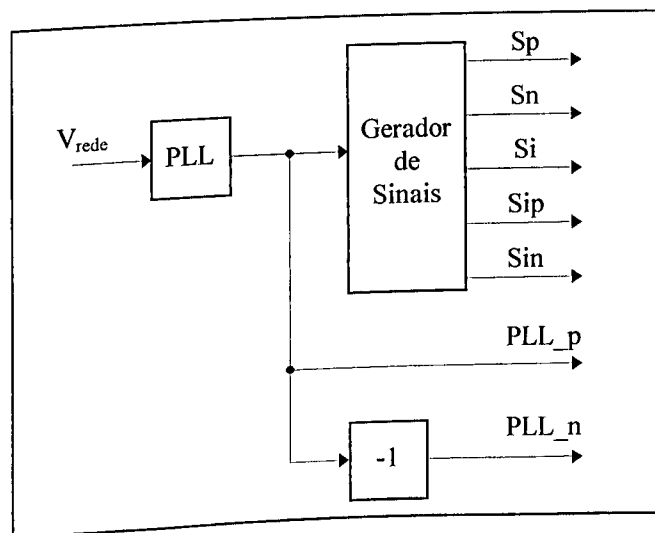


Figura 3.36 - Sinais de Sincronização

O diagrama mostrado na figura 3.36 é de fundamental importância para o controle do C.E. pois ele gera, a partir das condições impostas pela rede, os sinais de sincronismo. O método utilizado consiste, basicamente, de um circuito

chamado “Phase Locked Loop”(PLL), cuja diagrama de blocos se encontra representado pela figura 3.10. Deste forma, as mesmas considerações feitas para a figura 3.10 se aplicam aqui, ressaltando-se, no entanto, que o sinal de entrada do PLL,  $V_{rede}$ , mostrado na figura 3.36, é dado pela tensão entre as fases C e A da barra que está conectado o circuito de potência do C.E. e não pela barra controlada pelo C.E, conforme utilizado na *Unidade de Medição*. Vale enfatizar ainda que, se a barra a ser controlada for a mesma que alimenta o C.E, a modelagem continuara a utilizar dois circuitos PLL, embora com os mesmos sinais.

Diante do exposto, o sinal  $PLL\_p$ , mostrado na figura 3.36, será uma tensão puramente senoidal, de amplitude constante e defasada de  $90^\circ$  da tensão da rede. A partir desta tensão, o bloco “Gerador de Sinais” fornece os pulsos de sincronização:  $Sp$ ,  $Sn$ ,  $Si$ ,  $Sin$  e  $Sip$ , conforme mostrado pela figura 3.37.

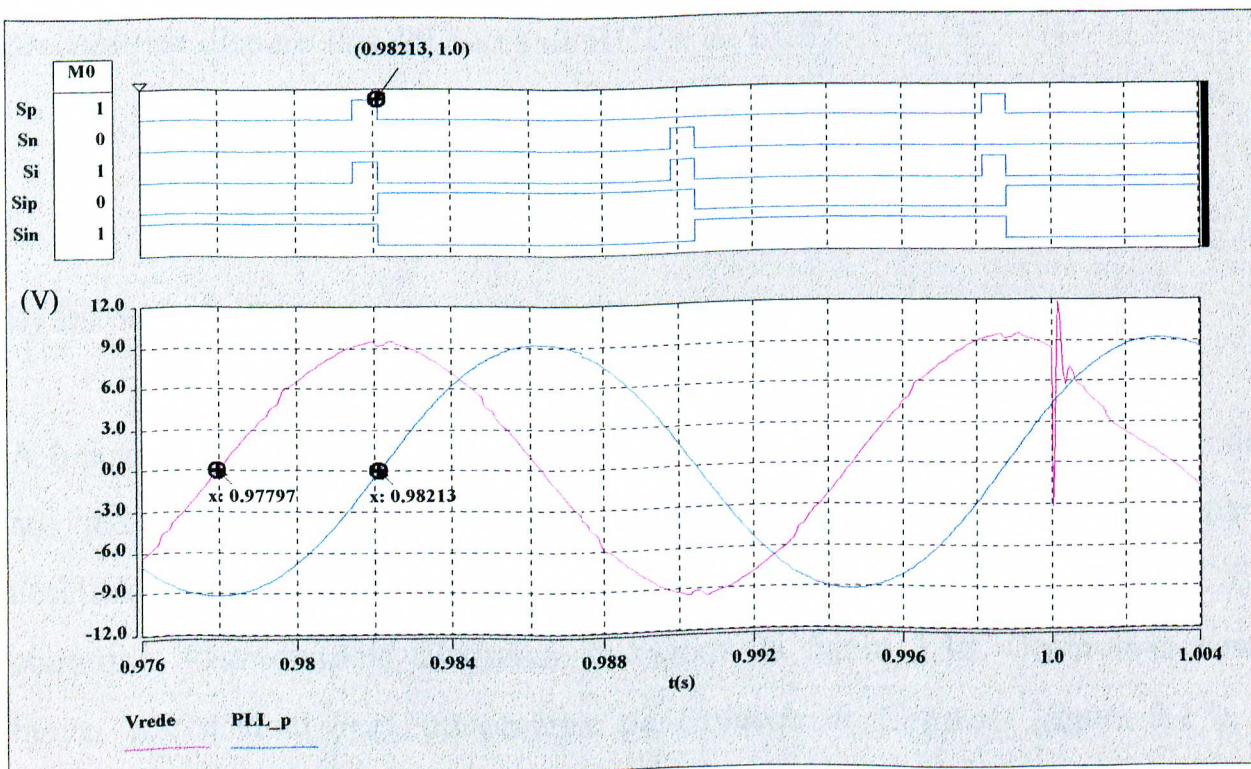


Figura 3.37 - Forma de onda do sinal  $PLL\_p$  e dos pulsos de sincronização.

Na figura 3.37, percebe-se que as imperfeições presentes na tensão da rede (em cor vermelha) não são repassadas para o sinal  $PLL_p$  (em cor azul). Nota-se ainda que a amplitude do sinal  $PLL_p$  é sempre igual a 9,2 V, independentemente do valor da tensão da rede. De acordo com a referência [5], a duração dos pulsos  $S_p$  e  $S_n$  é de  $15^\circ$ . O sinal  $S_p$ , conforme indicado na figura 3.37, termina no instante em que a tensão  $PLL_p$  passa por zero (tensão da rede em  $90^\circ$ ) e o sinal  $S_n$  termina quando a tensão  $PLL_p$  passa pelo ponto correspondente a  $180^\circ$  (tensão da rede em  $270^\circ$ ). O sinal  $S_i$  é formado pela soma dos sinais  $S_p$  e  $S_n$ . Deste modo, o controle do C.E. será informado, indiretamente através do sinal  $S_i$ , o exato instante que a tensão da rede passa por zero. Ainda observando-se a figura 3.37, verifica-se que, se a tensão  $PLL_p$  estiver no semiciclo positivo, o sinal  $S_{ip}$  é igual à lógica “1” e  $S_{in}$  é igual à lógica “0”. Por outro lado, se  $PLL_p$  estiver no semiciclo negativo,  $S_{ip}$  será lógica “0” e  $S_{in}$  lógica “1”. Este conjunto de sinais lógicos e as tensões  $PLL_p$  e  $PLL_n$  são utilizados no processo de disparo dos tiristores do RCT e do CCT.

## b) Disparo do RCT

A função desta unidade é emitir pulsos de disparos, sincronizados com a rede, aos tiristores do RCT. Estes pulsos fundamentam-se no ângulo de disparo desejado. Este é calculado a partir da susceptância de referência do C.E., conforme ilustrado pelo diagrama de blocos da figura 3.38. Observa-se nesta figura, que o sinal  $bref$ , proveniente da *Unidade de Controle* (figura 3.17), é injetado em um circuito “Sample and Hold”. Este circuito possui duas entradas

---

(uma analógica,  $bref$ , e uma digital,  $Si\_inv$ ) e uma saída (analógica, sinal  $bref\_ce$ ). Se a entrada digital for lógica “1”, o sinal  $bref\_ce$  será idêntico ao sinal  $bref$ . No entanto, se  $Si\_inv$  passar para a lógica “0”,  $bref\_ce$  não seguirá mais o sinal  $bref$  e será mantido constante durante a presença do pulso no sinal  $Si\_inv$ . A figura 3.39 corresponde a este processo.

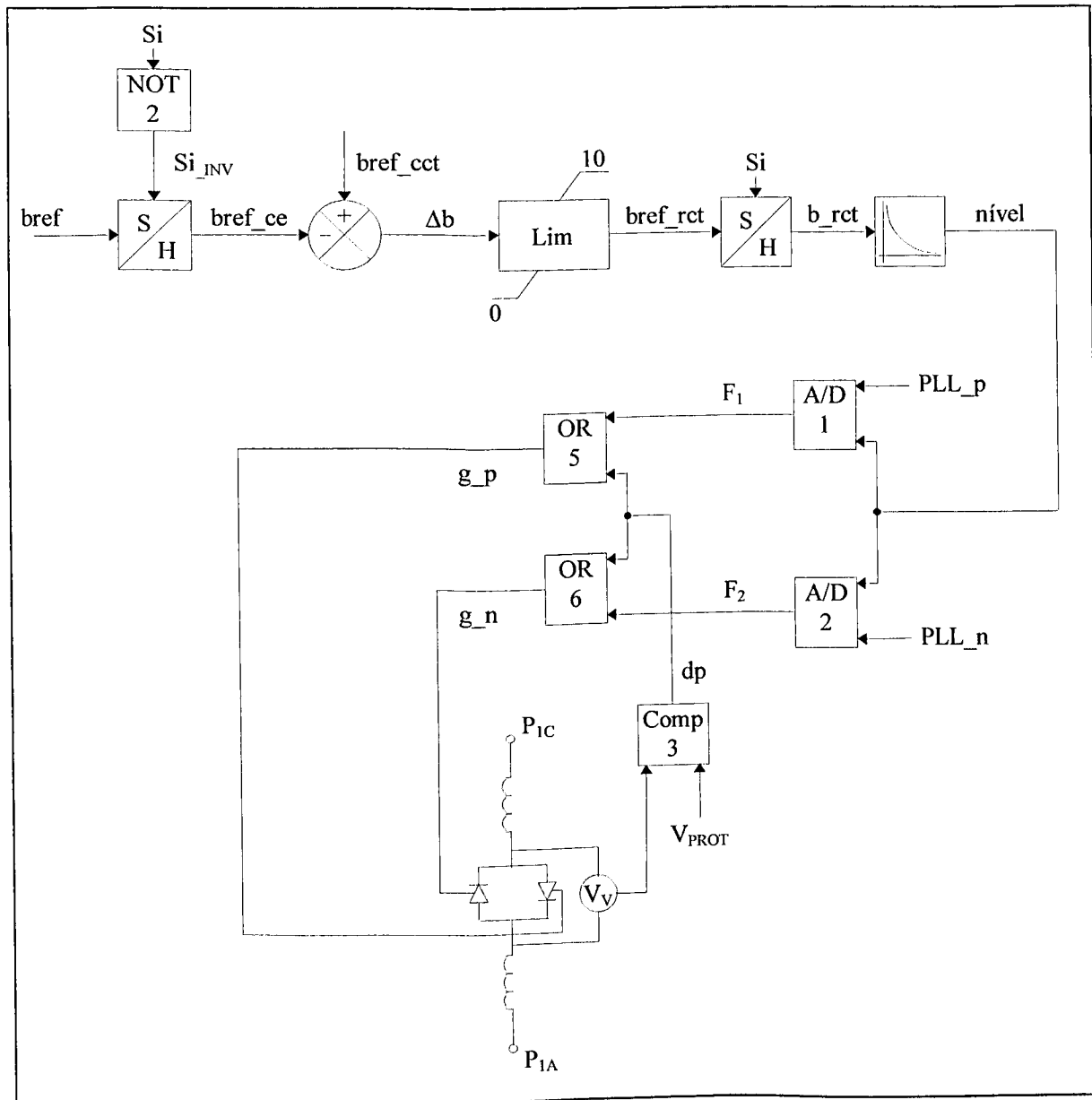


Figura 3.38 - Diagrama de blocos do sistema de disparo do RCT ilustrado na figura 3.35.



Com base na figura 3.39, verifica-se que, durante a presença do pulso de sincronização  $Si$ , o sinal  $bref\_ce$  (em cor vermelha) permanece inalterado, de modo a permitir atualizações com valores constantes na *Unidade de Distribuição*.

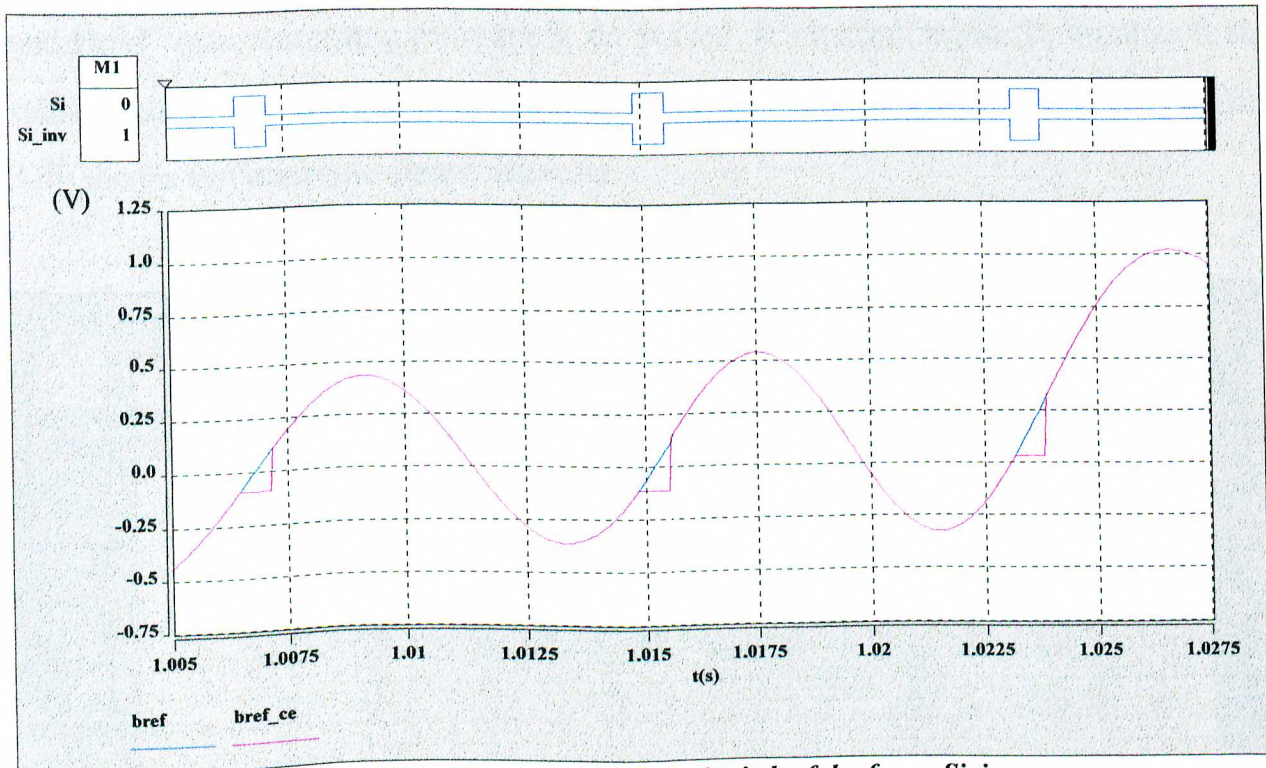


Figura 3.39 - Forma de onda dos sinais  $bref$ ,  $bref\_ce$  e  $Si\_inv$ .

Retornando ao diagrama mostrado na figura 3.38, constata-se que o sinal  $bref\_ce$  é subtraído da variável  $bref\_cct$ . Esta operação matemática produz o sinal  $\Delta b$ . Ressalte-se ainda que, o sinal  $bref\_cct$  indica o estado de operação do CCT, sendo o seu valor igual a zero quando o CCT está desconectado. Se o CCT estiver em funcionamento,  $bref\_cct$  assumirá um valor proporcional à susceptância do CCT em relação à susceptância do RCT. Este referido valor é calculado pelo parâmetro  $b\_cct$  (eq 3.10) e atribuído ao sinal  $bref\_cct$ . Destaca-se contudo, que, o valor dado à  $bref\_cct$  é definido pela lógica utilizada no sistema de disparo do CCT. Este assunto será abordado no próximo item.



Ao injetar o sinal  $\Delta b$  no limitador, mostrado na figura 3.38, obtém-se, através do sinal  $b_{ref\_rct}$ , um valor proporcional à susceptância desejada para o RCT, sendo a sua faixa de variação compreendida entre 0 (RCT desconectado) e 10 V (RCT totalmente indutivo). O sinal  $b_{ref\_rct}$  é ainda submetido a um circuito “Sample and Hold” que, durante a existência de pulsos de sincronização  $S_i$ , atualiza a sua saída, sinal  $b_{rct}$ , e a mantém constante até que ocorra um novo pulso. A figura 3.40 ilustra um exemplo desta atuação.

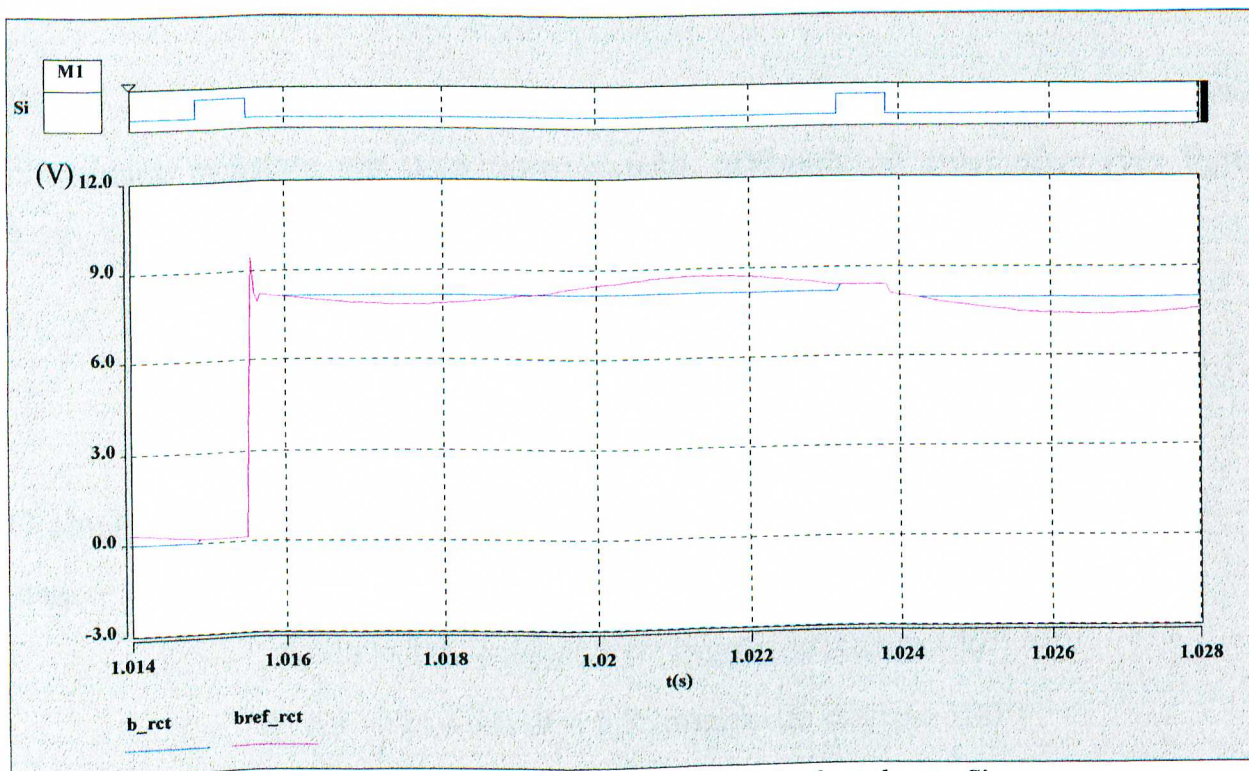


Figura 3.40 - Forma de onda dos sinais  $b_{ref\_rct}$ ,  $b_{rct}$  e  $S_i$ .

Observa-se ainda na figura 3.40 que o sinal  $b_{rct}$  continua acompanhando (atualizando) o sinal  $b_{ref\_rct}$  (em cor vermelha) por mais 0,0004 s após o término do pulso  $S_i$ . Este pequeno prolongamento evita que o CCT seja conectado ou retirado do sistema sem o conhecimento imediato do RCT.

Como é classicamente conhecido, a relação entre a susceptância e o ângulo de disparo de um RCT é altamente não linear, sendo dada pela equação (3.11).

$$\beta = 2 - \frac{\alpha}{90} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{\pi} \quad (3.11)$$

onde:

$\beta$ : é a susceptância em [p.u.]

$\alpha$ : é o ângulo de disparo em [graus]

Diante do exposto, a estratégia utilizada em [5] para representar esta não linearidade consiste em uma aproximação, atribuída ao sinal *nível* (ver figura 3.38), conforme indicado abaixo:

$$\text{nível} = 9,2 - 0,92 \times b_{rct} \quad (3.12)$$

O sinal *nível* é proporcional ao ângulo de disparo do RCT correspondente ao sinal  $b_{rct}$ :

$$b_{rct} = 10 \rightarrow \text{nível} = 0 \text{ (ângulo de disparo } 90^\circ\text{)}$$

$$b_{rct} = 0 \rightarrow \text{nível} = 9,2 \text{ (ângulo de disparo } 180^\circ\text{)}$$

Como pode ser observado na figura 3.38, os blocos A/D<sub>1</sub> e A/D<sub>2</sub> recebem como entradas, a variável *nível* e as tensões  $PLL_p$  e  $PLL_n$  oriundas da sincronização mostrada anteriormente na figura 3.36. A partir destas entradas, são gerados os pulsos de disparos  $F_1$  e  $F_2$ . Vale a pena ressaltar ainda que, os blocos A/D<sub>1</sub> e A/D<sub>2</sub> permanecem com as suas saídas bloqueadas até o instante de tempo definido pelo dado de entrada *ton* (Tab. 3.8).



A figura 3.41 fornece as formas de onda da tensão da rede ( $V_{rede}$ ) e dos sinais  $nível$ ,  $PLL_p$ ,  $F_1$  e  $g_p$ .

A faixa de variação do sinal  $nível$  vai de 0 a 9,2 V, sendo a amplitude do sinal  $PLL_p$  sempre igual a 9,2 V. Se o sinal  $nível$  for igual a zero, o ângulo de disparo ocorrerá no momento em que a tensão da rede ( $V_{rede}$ ) estiver passando por  $90^\circ$  (condução plena). Por outro lado, se  $nível$  for igual a 9,2 V o ângulo de disparo será de  $180^\circ$ .

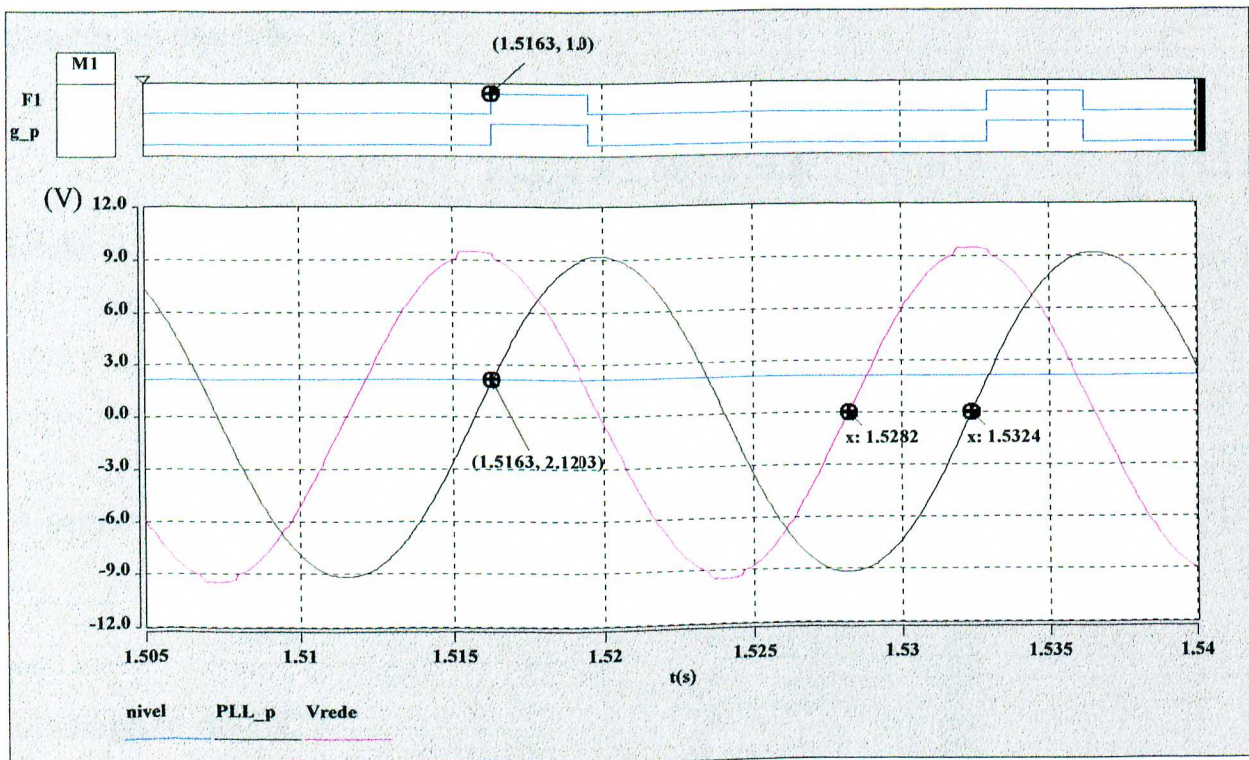


Figura 3.41 - Forma de onda dos sinais  $V_{rede}$ ,  $nível$ ,  $PLL_p$ ,  $F_1$  e  $g_p$ .

O ponto de cruzamento entre os sinais  $PLL_p$  (em cor preta) e  $nível$  (em cor azul), identificado por 1,5163 s na figura 3.41, corresponde ao instante em que o sinal  $F_1$  passa a ser lógica “1”, implicando no disparo do gate  $g_p$ . Neste ponto de cruzamento, o valor da tensão é de 2,1203 V corresponde a um ângulo de  $103^\circ$  (em relação a tensão da rede, sinal  $V_{rede}$  na figura 3.41).

O outro tiristor tem o seu processo de disparo obtido através da comparação deste mesmo sinal *nível* com a tensão  $PLL\_n$  (não mostrado na figura 3.41).

Retornando à figura 3.38, pode-se dizer que, na ocorrência de uma sobretensão elevada sobre os terminais dos tiristores, o comparador  $Comp_3$  atribui, através do sinal  $dp$ , disparos protetivos para os dois tiristores, independentemente do ângulo de disparo. Ou seja, as portas lógicas  $OR_5$  e  $OR_6$  impõem pulsos contínuos aos “gates”  $g_p$  e  $g_n$ , respectivamente. O parâmetro de comparação,  $V_{PROT}$ , é obtido através da equação 3.13.

$$V_{PROT} = 2,68 \times V_{rede} \tag{3.13}$$

Onde:

$V_{rede}$  é fornecida pelo usuário (Tab. 3.8)

A seguir, será apresentado o diagrama de blocos do sistema de disparo do CCT.

### b) Disparo do CCT

A função desta unidade é interpretar o sinal  $bref\_rct$ , proveniente da unidade de disparo do RCT e, a partir do seu valor, conectar ou retirar o CCT do sistema elétrico. A figura 3.42 ilustra o diagrama de blocos empregado. Esse diagrama é constituído a partir das conhecidas portas lógicas AND, OR e NOT, de dois flip-flops ( $FF_1$  e  $FF_2$ ) e pelos blocos designados por Analisador de Sobrecorrente, de Polaridade e de Sinais.



O bloco “Analisador de Polaridade” tem por objetivo verificar o sinal da polaridade do capacitor do CCT. Se a tensão sobre os terminais do capacitor coincidir com o sentido adotado por  $V_C$ , as saídas  $p_P$  e  $p_N$  recebem os níveis lógicos “1” e “0”, respectivamente. Caso contrário,  $p_P$  se apresenta com a lógica “0” e  $p_N$  com a lógica “1”.

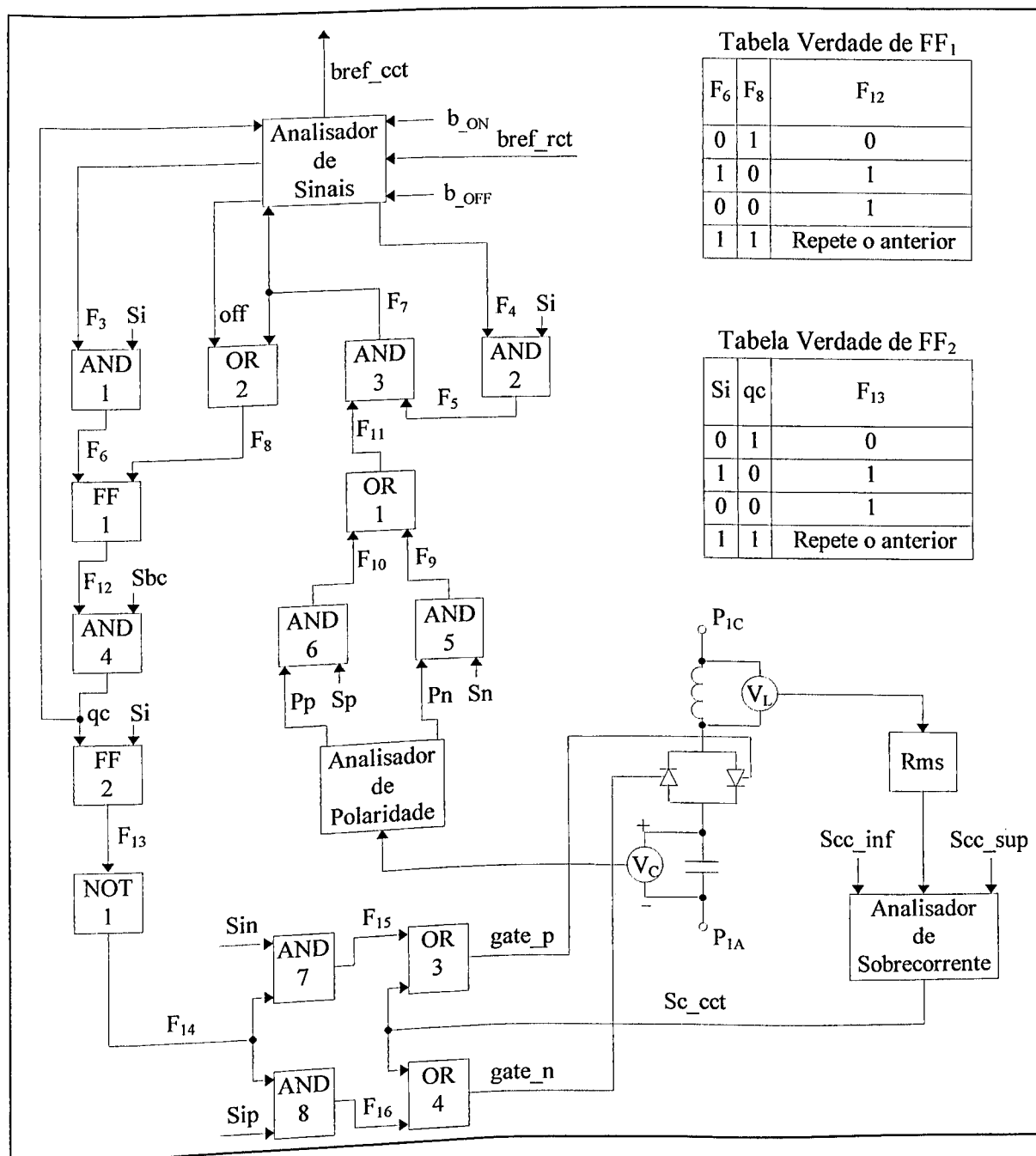


Figura 3.42 - Diagrama de blocos do Sistema de Disparo do CCT ilustrado na figura 3.35.

A figura 3.43 ilustra as formas de onda da tensão sobre o capacitor ( $V_c$ ) e dos sinais  $P_p$  e  $P_n$ , as quais foram obtidas para o intervalo de tempo compreendido entre 0,98 e 1,08 s, na simulação do sistema elétrico da figura 3.6.

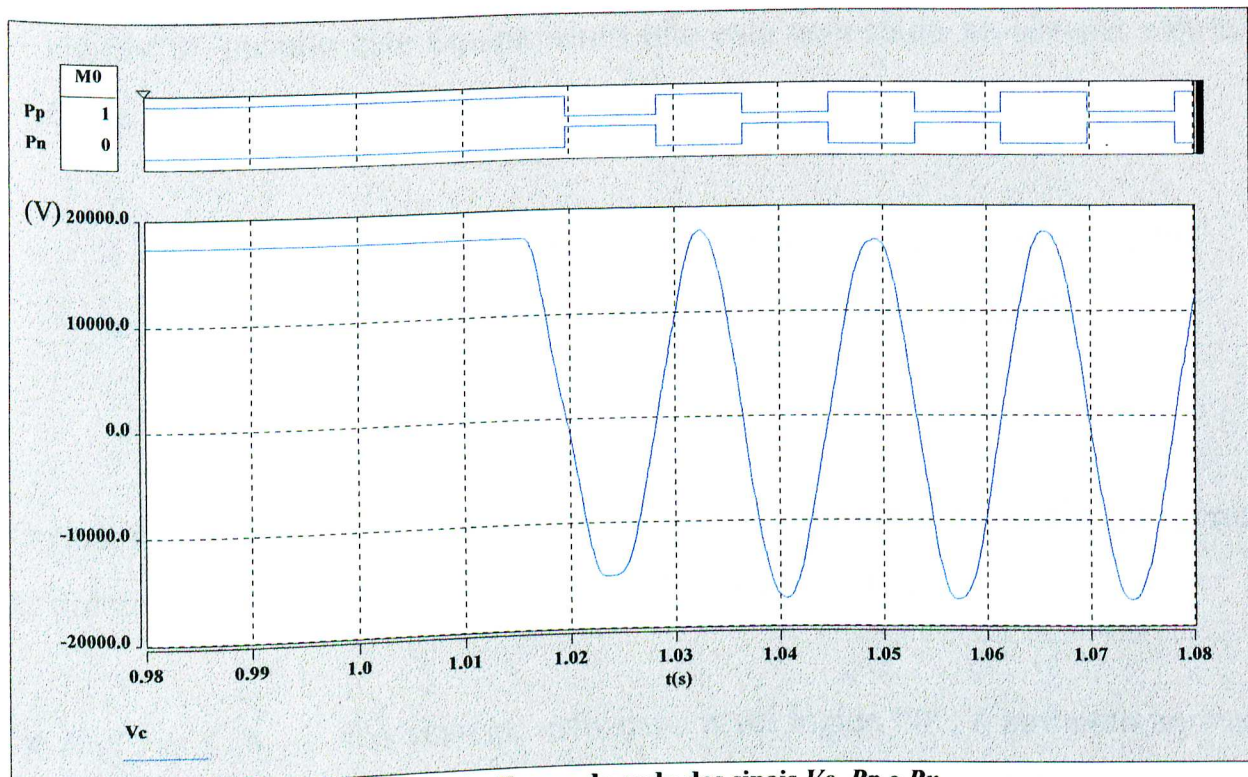


Figura 3.43 - Forma de onda dos sinais  $V_c$ ,  $P_p$  e  $P_n$ .

Como pode ser observado na figura 3.43, a tensão sobre o capacitor é constante durante o período em que o CCT permanece desconectado, pois o modelo foi inicializado, na simulação do caso exemplo, com o capacitor carregado. Esta tensão residual corresponde ao valor do dado de entrada  $V_{cap\_init}$  (Tab. 3.8) e, neste caso em particular, vale 17394,83 V. Obviamente, quando o CCT estiver em operação, o sinal  $V_c$  será alternado.

- bloco “Analisador de Sinais” possui 5 variáveis de entradas ( $b_{ON}$ ,  $b_{OFF}$ ,  $bref\_rct$ ,  $F_7$  e  $qc$ ) e 4 variáveis de saída ( $F_3$ ,  $F_4$ ,  $off$  e  $bref\_cct$ ). Os sinais  $F_3$  e

$F_4$  são responsáveis em emitir, respectivamente, as ordens de retirada e entrada do CCT. Estes dois sinais são inicializados com o nível lógico “0”, enquanto o sinal *Off* começa com a lógica “1”. O sinal *qc* refere-se ao estado de operação do CCT e assume o nível lógico “1” enquanto o CCT está conectado e o nível lógico “0” quando este equipamento não está conectado ao sistema elétrico. Deste modo, se o sinal *qc* for igual a lógica:

- “1”, *bref\_cct* será igual a  $\mathbf{b\_cct}$  (eq. 3.10) e o sinal  $F_4$  terá lógica “0”
- “0”, *bref\_cct* será igual a 0 (zero) e o sinal  $F_3$  terá lógica “0”

O sinal de entrada, *bref\_rct*, é submetido a dois detectores de níveis, que geram as ordens de conexão e retirada do CCT, da seguinte forma:

Se  $bref\_rct \leq b\_ON$  e o sinal *qc* estiver no nível lógico “0”, é atribuído ao sinal  $F_4$  o nível lógico “1”, representando uma ordem de conexão do CCT.

Se  $bref\_rct \geq b\_OFF$  e o sinal *qc* estiver no nível lógico “1”, é atribuído aos sinais  $F_3$  e *off* o nível lógico “1”, representando uma ordem de retirada do CCT. Os valores dos parâmetros  $b\_ON$  e  $b\_OFF$  são fornecidos pelo usuário (Tab. 3.8).

O sinal *off* torna-se lógica “0” quando *qc* e  $F_7$  possuem lógica “0” e “1”, respectivamente.

A figura 3.44 ilustra o funcionamento do bloco “Analisador de Sinais”. Observa-se nesta figura que o sinal *bref\_rct* (em cor azul) atinge o valor 0,1 V (nível



utilizado na simulação para  $b_{on}$ ) no instante 1,007 s. Neste exato momento o sinal  $F_4$  emite a ordem de conectar o CCT. Após verificada a disponibilidade do capacitor, o sinal  $F_7$  volta a “0” e, portanto,  $q_c$  vai a “1”, indicando efetivamente a entrada em operação do CCT. O sinal  $F_7$  volta a “0” porque  $S_i$  foi a “0” (ver figura 3.42). Em outras palavras, o CCT entra em funcionamento somente nos instantes em que a tensão da rede está passando por  $90^\circ$  ou  $270^\circ$ , conforme ilustra a figura 3.45.

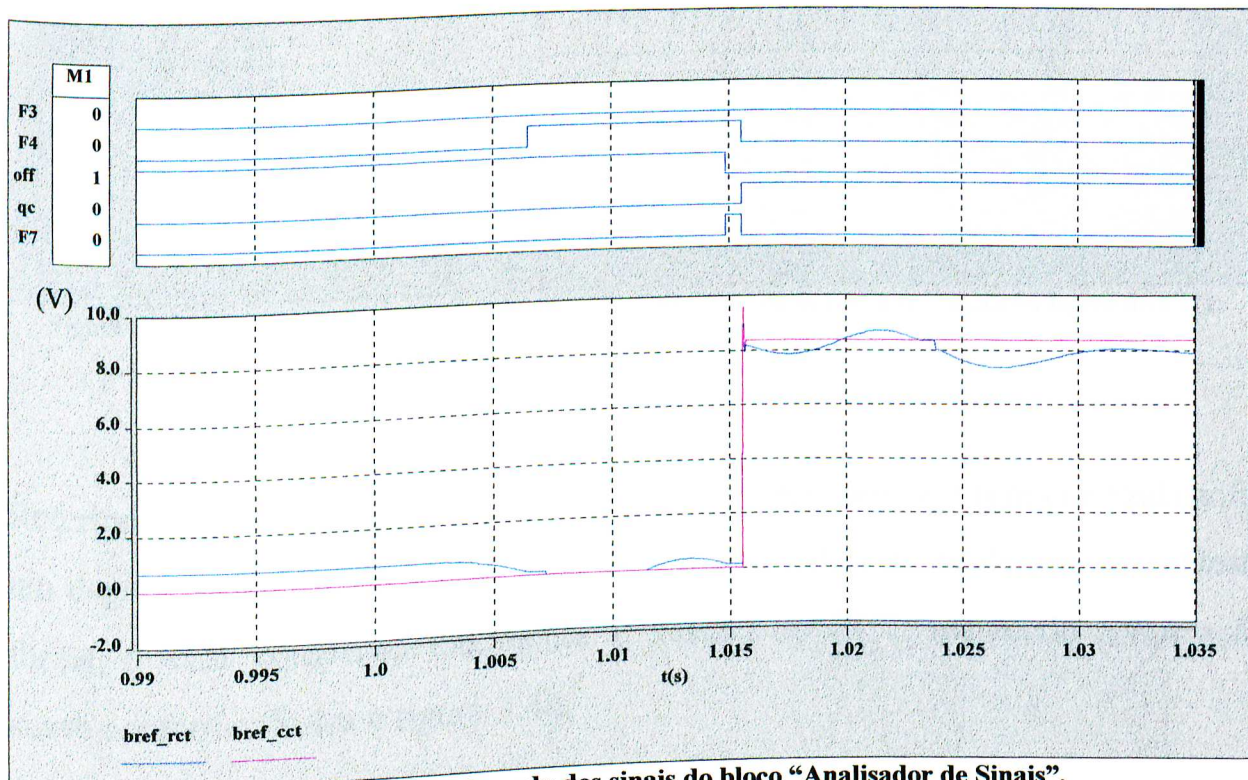


Figura 3.44 - Forma de onda dos sinais do bloco “Analisador de Sinais”.

A figura 3.45 ilustra os instantes iniciais da energização do CCT.

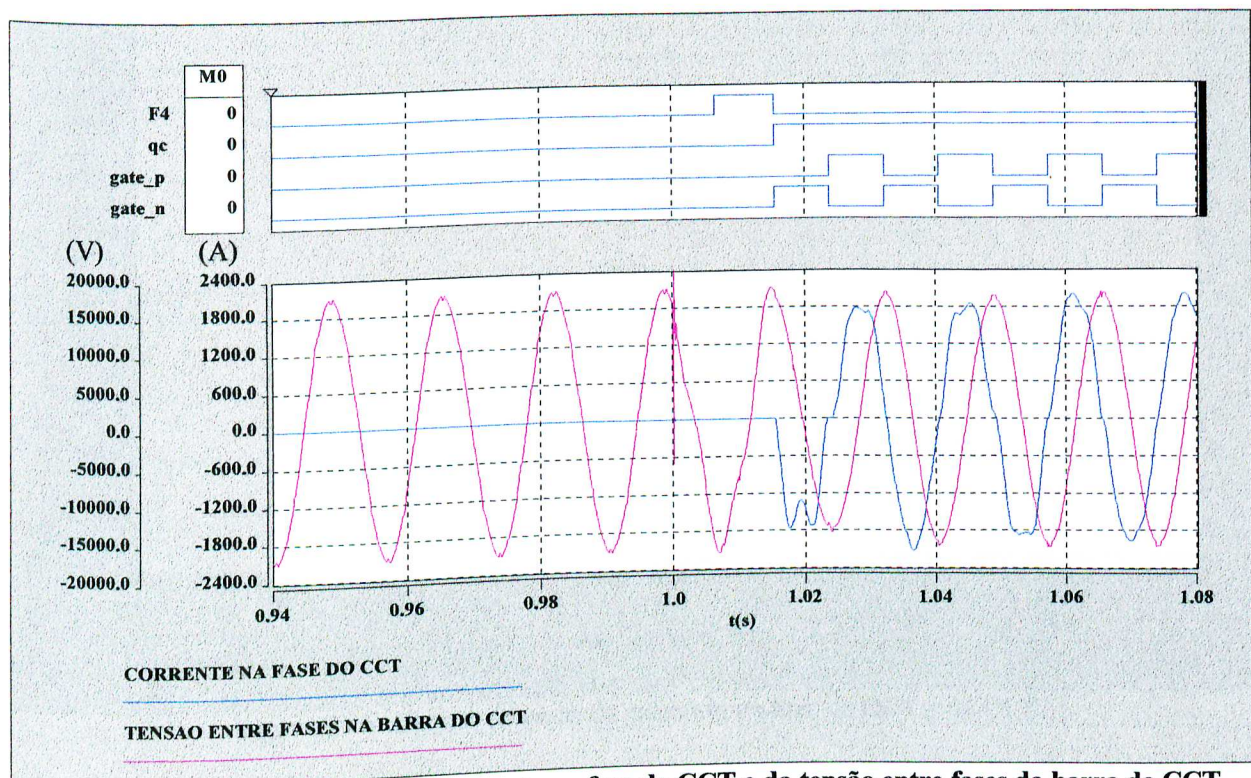
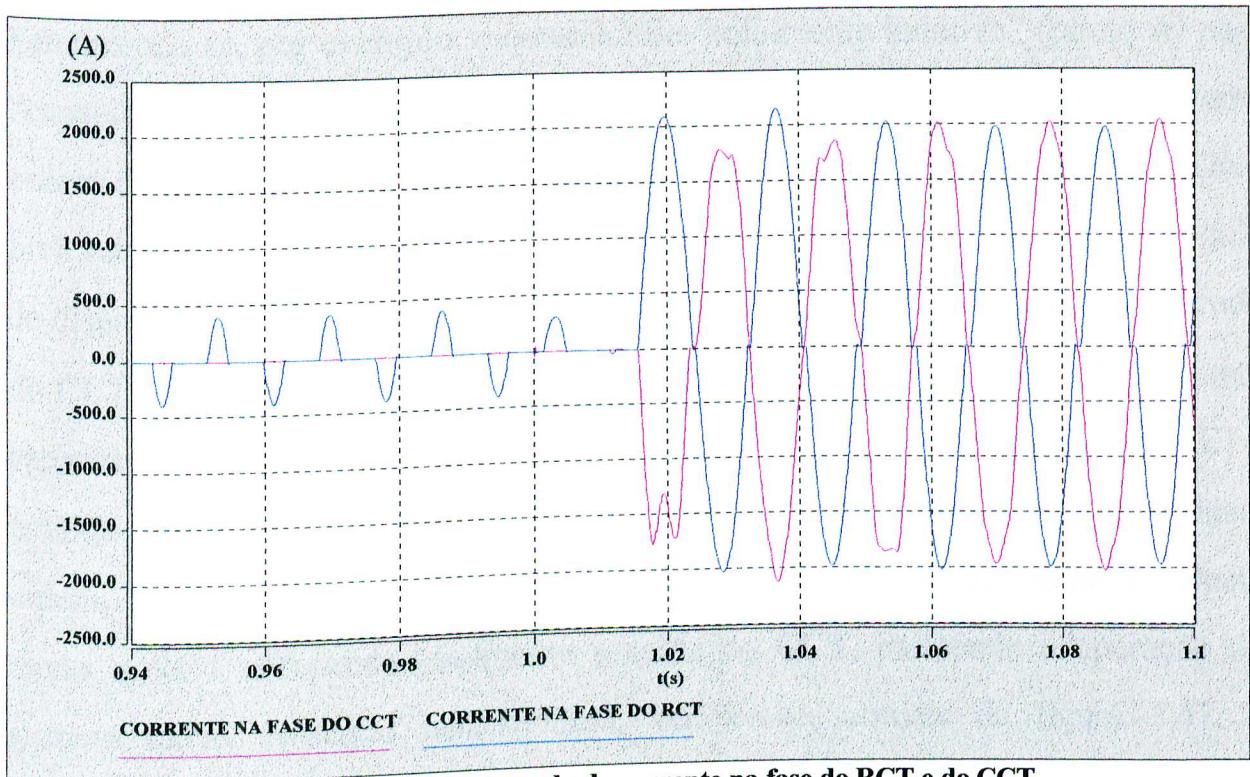


Figura 3.45 - Forma de onda da corrente na fase do CCT e da tensão entre fases da barra do CCT.

Referindo-se ainda à figura 3.44, nota-se que o sinal  $bref_{rct}$  (em cor azul) sofre um degrau quando o sinal  $bref_{cct}$  (em cor vermelha) deixa de ser zero. Desta forma, o RCT compensa totalmente a entrada do CCT, mantendo a operação suave conforme ilustra a figura 3.46.

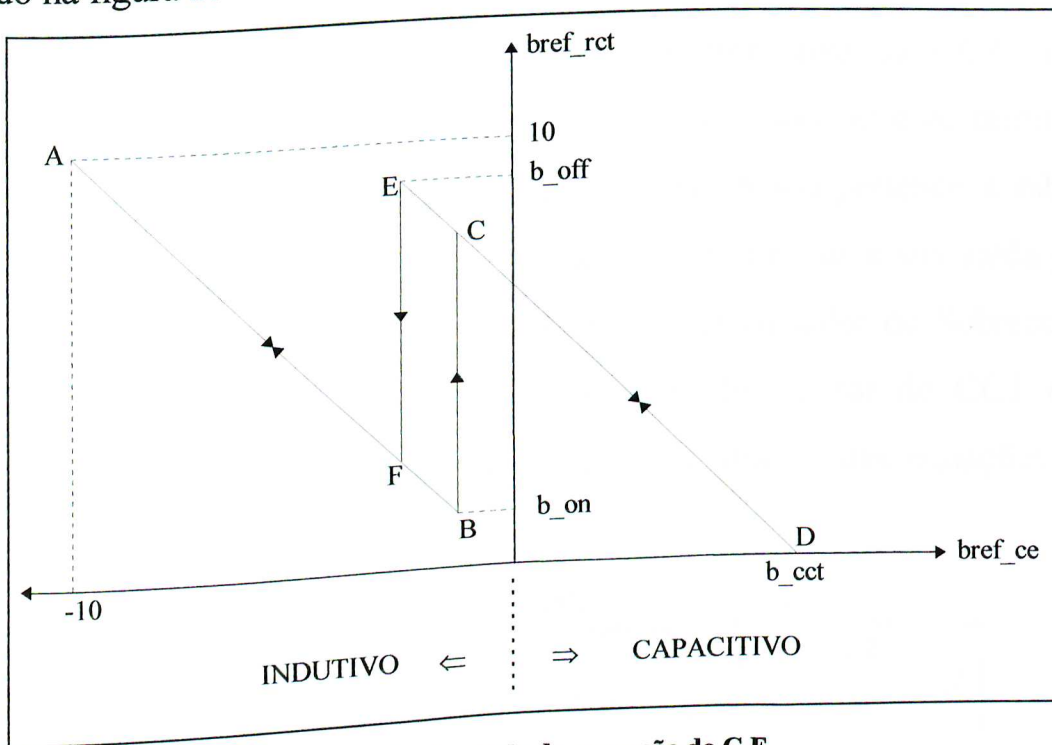
Constata-se, através da figura 3.46, que o RCT, antes da conexão do CCT, estava absorvendo uma pequena quantidade de reativos do sistema. Durante os primeiros ciclos de operação do CCT, ele absorve totalmente o reativo gerado pelo CCT. Deste modo, o sistema não sofre grandes perturbações com a entrada do CCT.





**Figura 3.46 - Forma de onda da corrente na fase do RCT e do CCT.**

O ciclo completo de operação de um C.E., em termos de susceptância, está ilustrado na figura 3.47.



**Figura 3.47 - Ciclo de operação do C.E.**

Percorrendo-se, por exemplo, o caminho de “totalmente indutivo” (ponto A) para “capacitivo”, quando o sinal  $bref\_rct$  atinge o valor  $b\_on$  (ponto B) é emitida uma ordem de conexão do CCT. Neste ponto, após a efetivação da ordem, o sinal  $bref\_rct$  é atualizado para o valor correspondente ao ponto C, ou seja, o ângulo de disparo do RCT é alterado, permitindo que ele compense totalmente a entrada do CCT. Por outro lado, se o caminho percorrido for o de  $D \rightarrow C$  (“totalmente capacitivo” para “indutivo”), quando  $bref\_rct$  alcançar o valor  $b\_off$  (ponto E) é emitida uma ordem de retirada do CCT. Neste ponto, após a efetivação desta ordem,  $bref\_rct$  é atualizado para o valor correspondente ao ponto F. Deste modo, o RCT compensa totalmente a saída do CCT, mantendo a operação do sistema suave. Baseado nestes fatos, verifica-se, através da figura 3.47, a existência de uma “histerese”, ou seja, caminhos diferentes relativos à conexão e à retirada do CCT, evitando situações instáveis de operação.

Quanto à proteção do CCT, esta é feita através do bloco “Analisador de Sobrecorrente”, cuja função é a de detectar uma sobrecorrente no CCT. Assim, o sinal  $V_L$  (identificado na figura 3.42 como sendo a tensão entre os terminais do indutor do CCT) é injetado no bloco “Rms” (este bloco pertence a biblioteca original do Simulador “Saber”), cuja função é a de atribuir à sua saída o valor rms do sinal de entrada. Desta forma, O bloco “Analisador de Sobrecorrente” compara o valor eficaz da tensão nos terminais do indutor do CCT com os parâmetros  $Scc\_inf$  e  $Scc\_sup$ . Estes são obtidos através das equações 3.14 e 3.15:

$$Scc\_inf = 1,5 \times \frac{Vrede \times 377 \times l_{c\_cct}}{\sqrt{\left( \left( 377 \times l_{c\_cct} - \frac{1}{377 \times cc\_cct} \right)^2 + rc^2 \right)}} \quad (3.14)$$

$$S_{cc\_sup} = 5 \times \frac{V_{rede} \times 377 \times l_{c\_cct}}{\sqrt{\left( \left( 377 \times l_{c\_cct} - \frac{1}{377 \times cc\_cct} \right)^2 + rc^2 \right)}} \quad (3.15)$$

Onde:

As variáveis  $l_{c\_cct}$ ,  $V_{rede}$ ,  $cc\_cct$  e  $rc$  estão indicadas na tabela. 3.8.

$S_{cc\_inf}$  e  $S_{cc\_sup}$  correspondem, respectivamente, a uma tensão proporcional a 1,5 e 5 vezes a corrente nominal no indutor do CCT. Quando a tensão sobre o indutor for superior a  $S_{cc\_sup}$ , é atribuído ao sinal  $Sc\_cct$  um pulso contínuo, forçando o disparo dos tiristores, evitando que ocorram sobretensões elevadas sobre as válvulas. Se a tensão retornar a um valor inferior a  $S_{cc\_inf}$ , esse pulso contínuo é retirado do sinal  $Sc\_cct$ .

### 3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo mostrou o desenvolvimento de um modelo matemático para os compensadores estáticos constituídos de reator controlado a tiristores (RCT) e capacitor chaveado por tiristores (CCT), ambos com conexão em triângulo. A configuração com o CCT conectado em estrela, bem como o RCT sem capacitores, também foram incorporadas junto ao Simulador “Saber”. Porém, devido à grande quantidade de detalhes envolvidos, optou-se pela descrição apenas do modelo mais completo do C.E. desenvolvido, pois este envolve as demais opções do C.E.

Deve-se destacar que a modelagem do C.E. é trifásica, com as fases independentemente representadas. Neste sentido, o comportamento do C.E. frente às perturbações no sistema elétrico pode também ser avaliado sob condições não-ideais de operação. Ressalta-se ainda que o modelo permite ao usuário fornecer, através dos dados de entrada, valores distintos de parâmetros para cada fase do C.E.. Deste modo, simulações como por exemplo, desbalanço nas impedâncias dos reatores são facilmente obtidas.

Um outro aspecto que deve ser mencionado, refere-se à estrutura adotada no modelo: os circuitos de potência do RCT e do CCT são representados no programa por um único “template”. Esta metodologia possibilita a obtenção de arranjos diferentes daquele apresentado na figura 3.1, como por exemplo, um C.E de 12 pulsos.

---

## ***CAPÍTULO IV***

### ***SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COM VISTAS À VALIDAÇÃO DA MODELAGEM***

#### **4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O capítulo anterior fundamentou-se no desenvolvimento da modelagem de um compensador estático de reativos do tipo reator controlado a tiristores (RCT) associado ao capacitor chaveado por tiristores (CCT). O modelo matemático deste C.E. foi destacado com uma simulação de um caso hipotético. Todavia, há de se considerar que a modelagem desenvolvida ainda não foi comprovada nesta dissertação. Diante deste fato, este capítulo em particular, tem como objetivo apresentar uma comparação entre os resultados obtidos nas simulações computacionais com aqueles provenientes de medições. Os resultados de campo que serão utilizados na análise comparativa foram obtidos e fornecidos pela *ELETRONORTE*. As medições foram realizadas no sistema de transmissão de energia elétrica do estado de Mato Grosso, em dezembro de 1990, quando entrou

---



em operação comercial o compensador estático da “Subestação de Coxipó” (em Cuiabá), para controle da tensão do barramento de 230 kV desta subestação.

## **4.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE SUPRIMENTO AO ESTADO DE MATO GROSSO EM DEZEMBRO DE 1990**

A figura 4.1, ilustra o diagrama unifilar do sistema de suprimento ao estado de Mato Grosso em dezembro de 1990. Este é composto por dois circuitos de 230 kV e um de 138 kV, ligando as usinas hidroelétricas de Itumbiara e Cachoeira Dourada aos centros de carga do estado, sendo que cerca de 75% destas cargas são atendidas a partir do setor de 138 kV da SE Coxipó, distante cerca de 850 km do centro de geração. Os 25% restantes são atendidos a partir de subestações intermediárias [4]. Estas características tornam extremamente difícil o controle de tensão do sistema que, até a entrada em operação do C.E., vinha sendo efetuada de forma discreta, basicamente pelo chaveamento de reatores e bancos de capacitores. De forma a atender às necessidades do sistema foi especificado um C.E. constituído por um ramo de reator controlado a tiristores (RCT) de 60 MVar, um ramo de capacitores chaveados por tiristores (CCT) de 60 MVar e de um filtro sintonizado para a quinta harmônica de 10 MVar, o que permite uma faixa de operação de 50 MVar indutivos a 70 MVar capacitivos.

O diagrama trifilar deste compensador estático encontra-se ilustrado na figura 4.2. Nesta mesma figura estão indicadas as variáveis elétricas que terão as suas formas de ondas (simulação) e os oscilogramas (medição) apresentados ao longo deste capítulo.

---

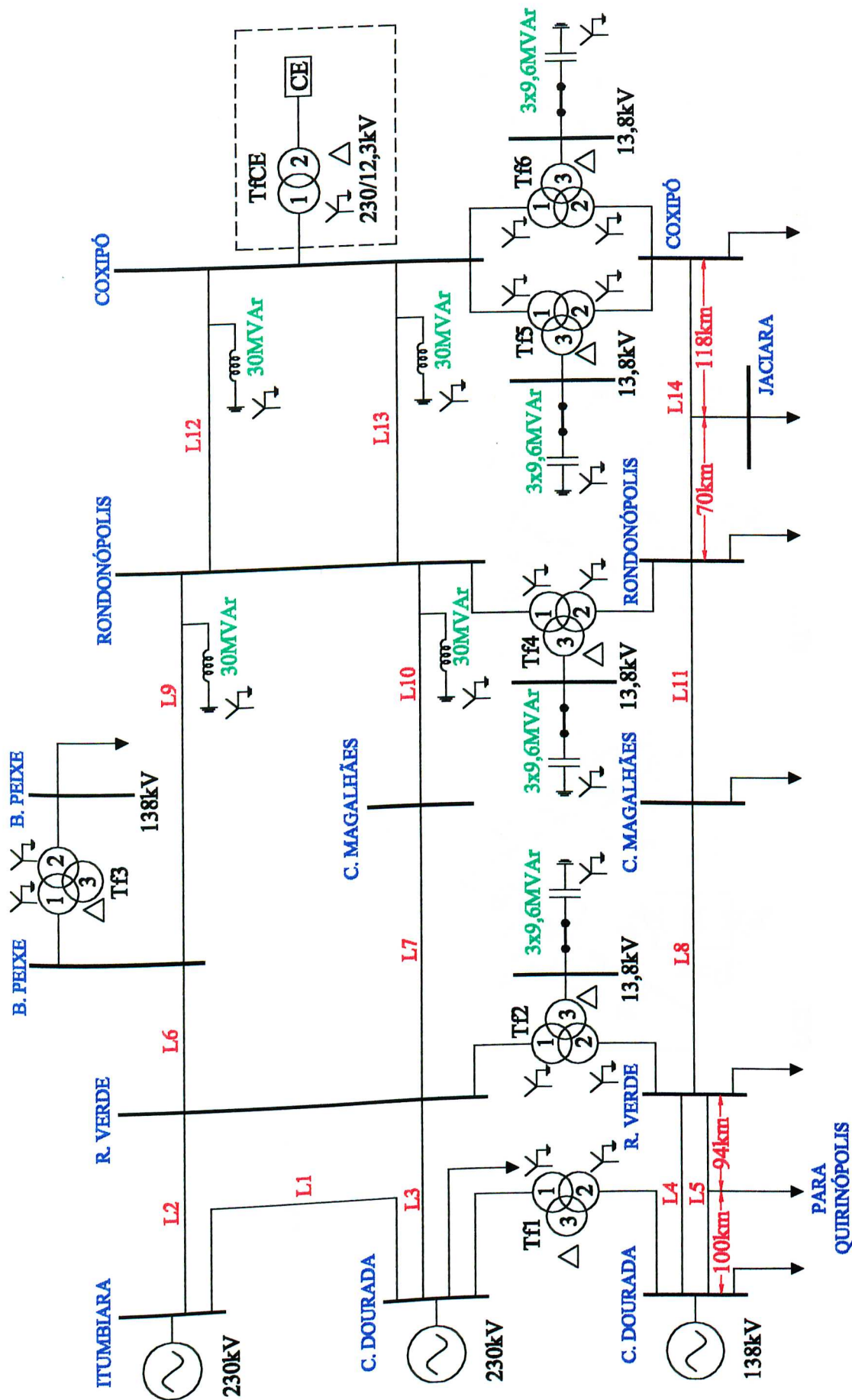


Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico de suprimento ao estado do Mato Grosso em dez./1990.

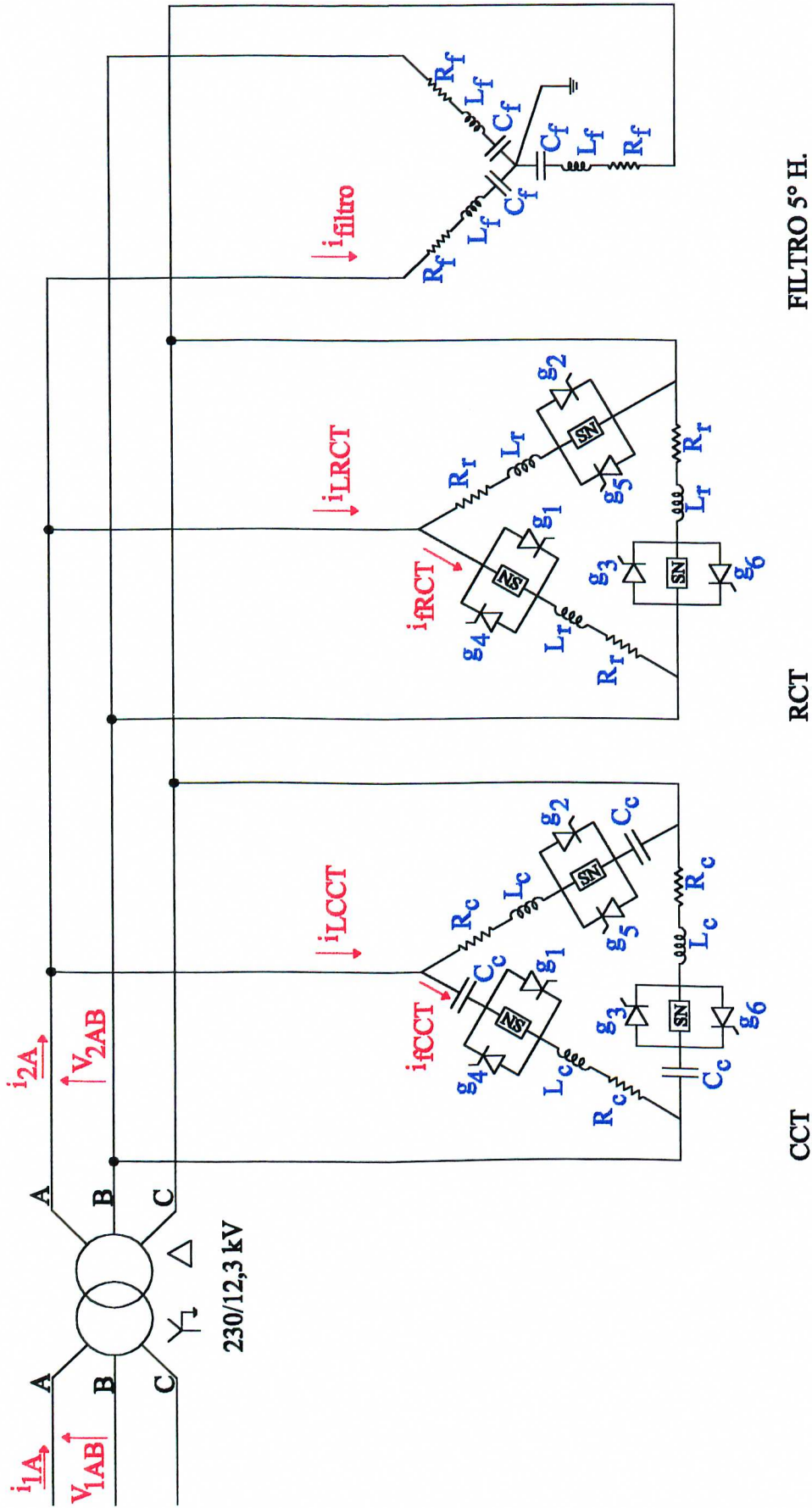


Figura 4.2 - Diagrama trifilar do C.E. ilustrado na figura 4.1

#### 4.2.1 - DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DOS DIVERSOS COMPONENTES CONSTITUINTES DO SISTEMA ELÉTRICO

As características nominais de cada um dos componentes do sistema elétrico simulado são fornecidas nas tabelas de 4.1 a 4.7.

Tabela 4.1 - Dados das linhas de transmissão ilustradas na figura 4.1.

Nome da linha	R [ $\Omega/\text{km}$ ]	L $\times 10^{-3}$ [H/km]	C $\times 10^{-6}$ [F/km]	Comp. [km]	Tensão [kV]
L1	0,0767	1,358	0,00862	44	230
L2	0,0352	0,957	0,01207	219	230
L3	0,1085	1,348	0,00865	175	230
L4	0,1790	1,340	0,00869	175	138
L5	0,1622	1,250	0,00922	194	138
L6	0,1083	1,348	0,00864	240	230
L7	0,1083	1,332	0,00874	251	230
L8	0,1788	1,314	0,00880	251	138
L9	0,1015	1,337	0,00873	217	230
L10	0,1015	1,337	0,00872	178	230
L11	0,1909	1,319	0,00876	178	138
L12	0,1015	1,337	0,00872	188	230
L13	0,1018	1,337	0,00875	188	230
L14	0,1909	1,319	0,00876	188	138

Onde:

R - Resistência de cada fase da linha, em ohms por quilômetro;

L - Indutância de cada fase da linha, em milihenries por quilômetro;

C - Capacitância de cada fase da linha, em microfarads por quilômetro;

Comp - Comprimento total da linha de transmissão, em quilômetros.

Tabela 4.2 - Dados dos transformadores de três enrolamentos ilustrados na figura 4.1.

Nome do transformador	Tensão primária [kV]	Tensão secundária [kV]	Tensão terciária [kV]	Potência nominal [MVA]	X <sub>12</sub> [%]	X <sub>13</sub> [%]	X <sub>23</sub> [%]
Tf1	230	138	13,8	120	7,34	25,33	16,67
Tf2	230	138	13,8	100	8,00	26,97	16,97
Tf3	230	138	13,8	50	8,24	21,00	13,50
Tf4	230	138	13,8	100	8,30	22,90	14,00
Tf5 e Tf6	230	138	13,8	100	8,30	22,90	14,00

Onde:

X<sub>12</sub> - Reatância percentual entre o enrolamento primário e secundário;

X<sub>13</sub> - Reatância percentual entre o enrolamento primário e terciário;

X<sub>23</sub> - Reatância percentual entre o enrolamento secundário e terciário.

Tabela 4.3 - Dados do transformador do compensador estático ilustrado nas figuras 4.1 e 4.2.

Nome do transformador	Tensão primária [kV]	Tensão secundária [kV]	Potência nominal [MVA]	X [%]
TfCE	230	12,3	70	10

Os transformadores identificados nas tabelas 4.2 e 4.3 possuem os mesmos valores para a corrente de magnetização ( $i_{mag} = 0,20\%$ ), ponto de joelho = 1,17 p.u. e a relação  $X/R = 40$ , sendo X e R, respectivamente, a reatância e a resistência percentual do transformador em questão.



**Tabela 4.4 - Dados do CCT ilustrado na figura 4.2.**

Nome	$R_c$ [ $\Omega$ ]	$L_c$ $\times 10^{-3}$ [H]	$C_c$ $\times 10^{-6}$ [F]	$R_{c1}$ [ $\Omega$ ]	$R_{c2}$ $\times 10^6$ [ $\Omega$ ]	$C_s$ $\times 10^{-6}$ [F]
CCT	0,0015	1,155	300,5	255	34	0,2

*Obs: Os parâmetros  $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$  e  $C_s$  pertencem ao circuito Snubber (ver cap.III, figura 3.3).*

**Tabela 4.5 - Dados do RCT ilustrado na figura 4.2.**

Nome	$R_r$ [ $\Omega$ ]	$L_r$ $\times 10^{-3}$ [H]	$R_{r1}$ [ $\Omega$ ]	$R_{r2}$ $\times 10^6$ [ $\Omega$ ]	$C_r$ $\times 10^{-6}$ [F]
RCT	0,023	18,7	450	30	0,157

*Obs: Os parâmetros  $R_{r1}$ ,  $R_{r2}$  e  $C_r$  pertencem ao circuito Snubber (ver cap.III, figura 3.4).*

**Tabela 4.6 - Dados do filtro ilustrado na figura 4.2.**

Nome	$R_f$ [ $\Omega$ ]	$L_f$ $\times 10^{-3}$ [H]	$C_f$ $\times 10^{-6}$ [F]
Filtro de 5º Harmônico	0,002	1,753	165,8

**Tabela 4.7 - Dados das cargas equivalentes ilustradas na figura 4.1.**

Localização da carga	Tensão [kV]	Potência nominal [MVA]
Cachoeira Dourada	230	337,00 - j 0,06
Barra do Peixe	138	26,48 - j 9,49
Cachoeira Dourada	138	87,50 + j 11,65
Quirinópolis	138	20,40 + j 1,30
Rio Verde	138	51,20 + j 16,80
Couto Magalhães	138	7,00 + j 0,00
Rondonópolis	138	50,36 - j 13,65
Jaciara	138	8,82 + j 0,89
Coxipó	138	180,00 + j 5,00

*Obs: As cargas foram utilizadas nas simulações com característica de impedância constante.*

### **4.3 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COM AQUELES PROVENIENTES DAS MEDIÇÕES DE CAMPO**

A programação dos ensaios realizados para a etapa final do período de comissionamento do C.E visou, principalmente, a minimização dos seus impactos com relação ao sistema de transmissão. Desta forma, foram previamente analisadas as condições mais favoráveis para a realização dos ensaios, estando os seus resultados e os comentários pertinentes apresentados na referência [17].

Dentre os vários ensaios realizados pela ELETRONORTE, dois deles foram selecionados para efeito de comparação entre medições e simulações. Eles serão denominados por:

- Caso A: Ensaio para avaliação de harmônicos;
- Caso B: Ensaios de energização e desenergização do CCT.

#### **4.3.1 - CASO A: ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DE HARMÔNICOS**

**Objetivo:** Verificar os níveis de injeção harmônica no sistema, causados pelo reator controlado a tiristores (RCT).

**Características:** Este ensaio foi realizado com o C.E. operando no modo manual e ângulo de disparo igual a  $104^\circ$  para os tiristores do RCT.

---

A seguir são apresentados os resultados da simulação do caso A e alguns dos respectivos oscilogramas referentes às medições de campo [18]. Todos os resultados se apresentam em regime permanente e no mesmo intervalo de tempo, compreendido entre 0,945 e 0,995 s.

A figura 4.3 corresponde à forma de onda da tensão entre as fases A e B no primário do transformador do C.E. (sinal  $V_{IAB}$ , figura 4.2).

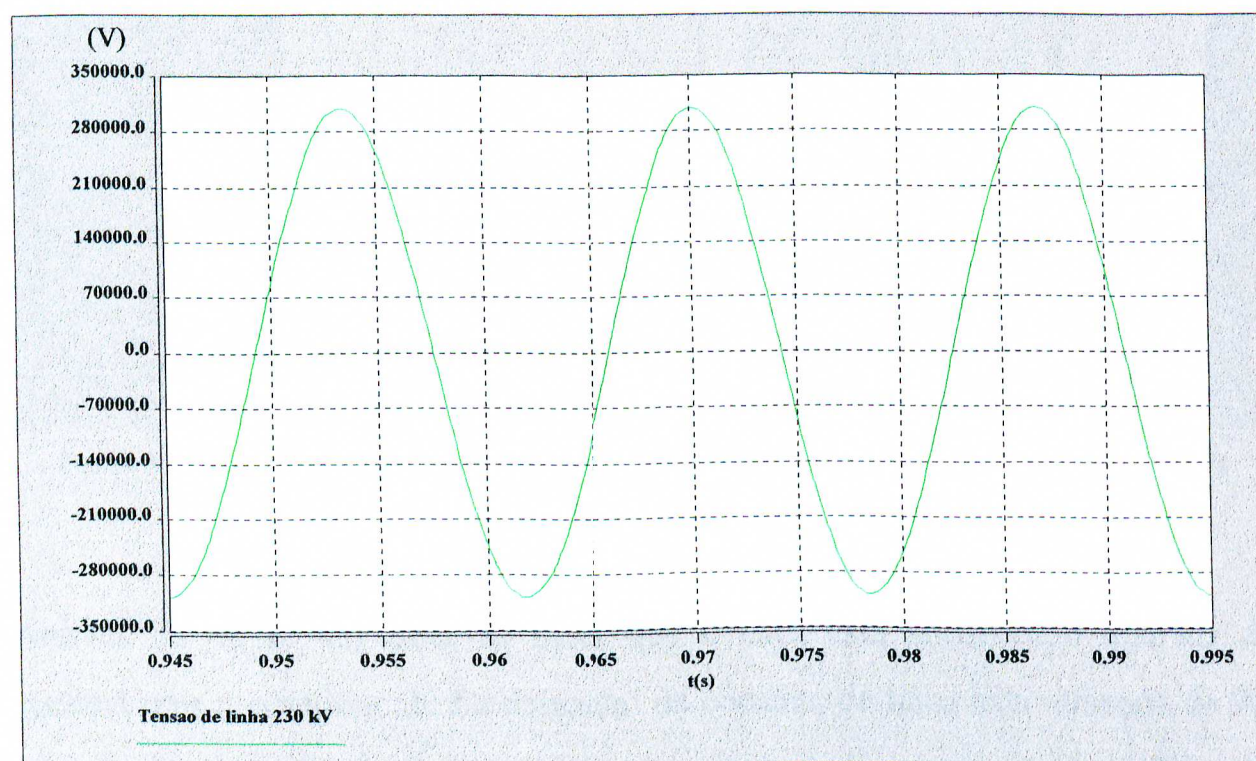
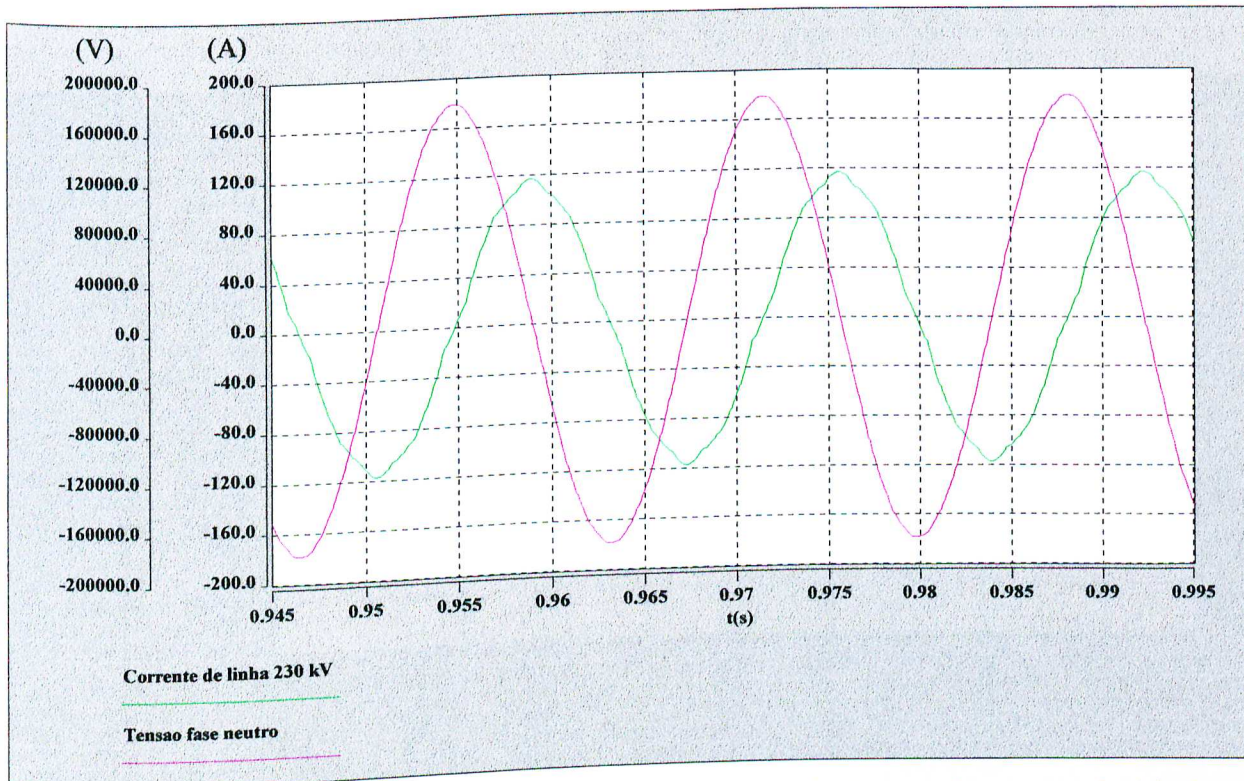


Figura 4.3 - Forma de onda da tensão entre as fases A e B no primário do transformador do C.E.

A decomposição harmônica da tensão mostrada na figura 4.3 indica que a componente fundamental possui um valor eficaz igual a 218,5 kV. Este valor corresponde a 95% da tensão nominal (230 kV) do barramento da SE de Coxipó (o que foi previamente recomendado para os ensaios de campo [17]). As componentes harmônicas, por sua vez, apresentam-se com baixos valores (quinta e sétima harmônicas com 0,1 e 0,25 % da fundamental, respectivamente).



A figura 4.4 apresenta a corrente de linha na fase A do primário do transformador (sinal  $i_{1A}$ , figura 4.2).



**Figura 4.4 - Formas de onda da tensão da fases A e da corrente de linha na fase A, no primário do transformador do C.E.**

Através da figura 4.4 pode-se dizer que o C.E. está absorvendo reativos do sistema pois a componente fundamental da corrente de linha está atrasada de  $90^\circ$  em relação a tensão de fase (em cor vermelha). A decomposição harmônica da corrente indica para a grandeza fundamental um valor eficaz de 81,3 A. As harmônicas mais significativas foram a quinta e a sétima, com valores eficazes da ordem de 0,8 e 2 A, respectivamente. A potência reativa trifásica absorvida pelo C.E. é de  $\sqrt{3} \times 218,5 \times 81,3 = 30,8 \text{ MVar}$ .



A figura 4.5 ilustra a forma de onda da tensão entre as fases A e B e a corrente na fase A, no lado secundário do transformador. Estes sinais estão indicados por  $V_{2AB}$  e  $i_{2A}$  na figura 4.2.

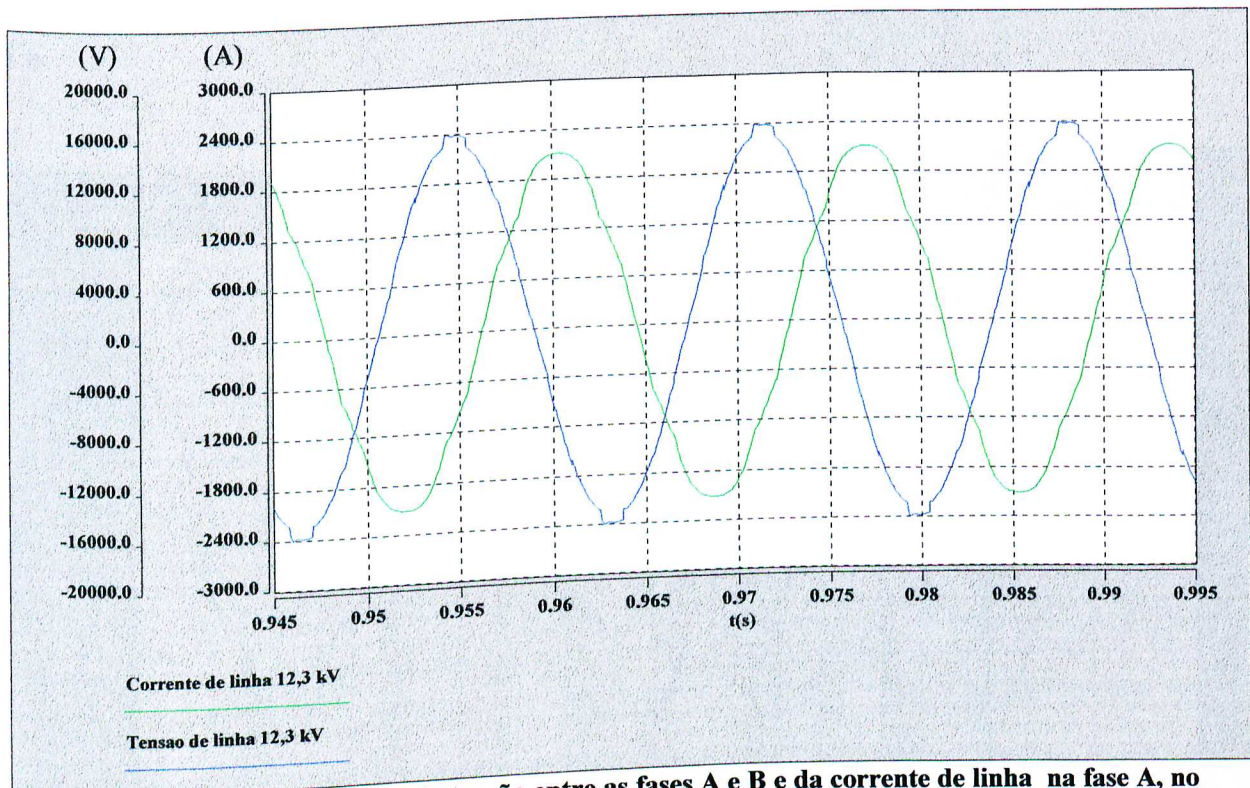


Figura 4.5 - Formas de onda da tensão entre as fases A e B e da corrente de linha na fase A, no secundário do transformador.

A decomposição harmônica dos sinais mostrados na figura 4.5 está na tabela 4.8:

Tabela 4.8 - Decomposição harmônica dos sinais  $V_{2AB}$  e  $i_{2A}$  (simulação) - Valores eficazes.

Sinal	fundamental	5º Harmônico	7º Harmônico	11º Harmônico	13º Harmônico
Tensão (V)	11117,00	33,14	123,34	49,17	11,72
Corrente (A)	1512,70	15,42	39,02	11,85	0,54

Conforme poderá ser observado através das figuras 4.6 e 4.7, uma das grandes vantagens que se obtém com os modelos implementados no Simulador “Saber” é



a elevada quantidade de informações que se pode extrair dos resultados simulados, permitindo deste modo que o usuário interprete as formas de onda com maior clareza. Um exemplo típico refere-se às diferenças entre as formas de onda da corrente de fase e de linha de um RCT, conforme está ilustrado na figura 4.6.

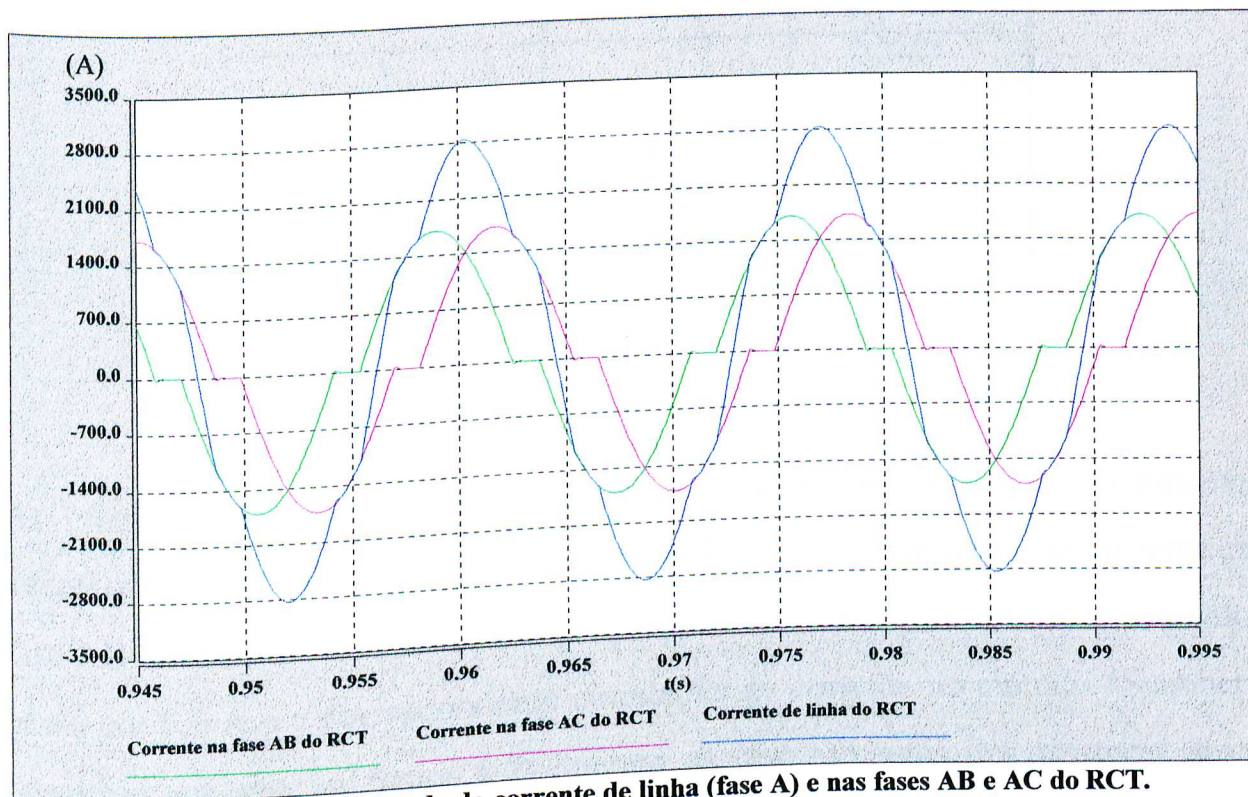


Figura 4.6 - Forma de onda da corrente de linha (fase A) e nas fases AB e AC do RCT.

Com respeito ao diagrama trifilar do C.E. (figura 4.2) estes sinais estão indicados por  $i_{LRCT}$  (corrente de linha) e  $i_{FRCT}$  (corrente de fase). Uma análise harmônica destes sinais (tabela 4.9) mostra que os harmônicos que são, simultaneamente, ímpares e múltiplos de 3, estarão ausentes na corrente de linha. Isto ocorre porque o sistema se encontra em regime permanente e, tanto o suprimento quanto o C.E., nesta simulação, são equilibrados e balanceados.

**Tabela 4.9 - Decomposição harmônica dos sinais  $i_{LRCT}$  e  $i_{RCT}$  (simulação).**

Ordem Harmônica	Valor eficaz	
	Corrente ( $i_{LRCT}$ ) (A)	Corrente ( $i_{RCT}$ ) (A)
1	2731,50	1111,20
3	-	144,14
5	180,43	74,01
7	95,69	39,08
9	-	22,27
11	24,10	9,34
13	4,90	1,65
15	-	2,91
17	11,33	4,77

As facilidades do Simulador “Saber” permitem verificar fenômenos interessantíssimos. Por exemplo, a figura 4.7 ilustra a ampliação da corrente na fase AB do RCT (sinal em cor verde na figura 4.6) na região em que o seu valor passa por 0,0 A e a correspondente circulação de corrente no circuito “Snubber” (sinal em cor azul na figura 4.7) durante os chaveamentos dos tiristores desta referida fase. Com tal ampliação, pode-se analisar detalhadamente essas formas de ondas. Por exemplo, percebe-se que, um pouco antes do instante 0,955 s, a corrente no circuito “Snubber” é idêntica à corrente na fase AB do RCT. Isso ocorre porque, no instante de tempo 0,95 s, não existe corrente no circuito “Snubber” e o caminho percorrido pela corrente na fase AB do RCT é estabelecido através do tiristor  $g_4$  (ver figura 4.2). Durante a condução do tiristor  $g_4$ , a tensão  $V_{2AB}$ , indicada na figura 4.2, é totalmente aplicada sobre o resistor ( $R_r$ ) e o indutor ( $L_r$ ). Este processo somente é interrompido quando a corrente no tiristor passar por zero (caracterizando o término de sua condução).



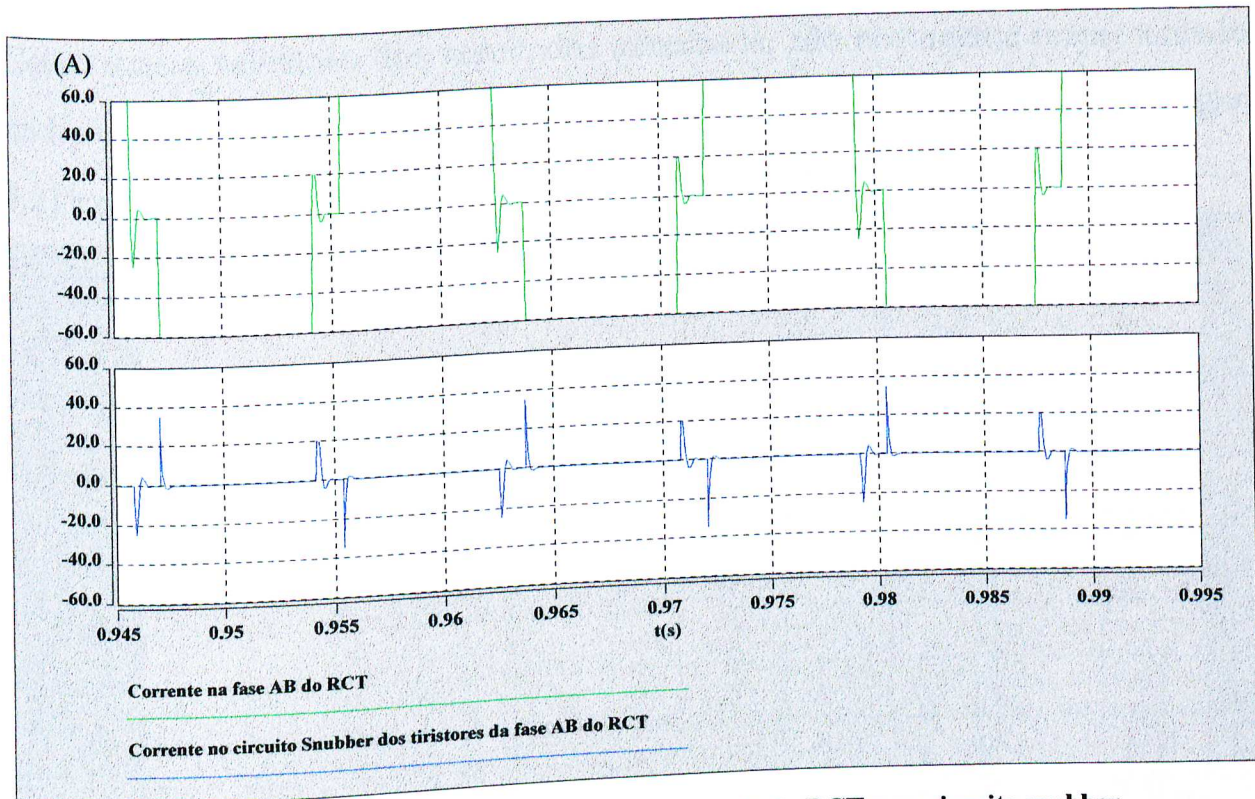


Figura 4.7 - Forma de onda da corrente na fase AB do RCT e no circuito snubber.

Sem a presença do “Snubber” a tensão seria agora integralmente aplicada nos terminais dos tiristores, provocando um elevadíssimo  $dv/dt$  que, provavelmente danificaria esses semicondutores. Porém, devido às características do circuito “Snubber” (mais especificamente do seu capacitor), a taxa de crescimento ( $dv/dt$ ) ocorre mais lentamente, obrigando, desta forma, a corrente na fase AB do RCT a circular pelo circuito snubber até o instante 0,955 s, conforme ilustrado na figura 4.7. Já o “spike” à direita do instante 0,955 s é correspondente ao chaveamento do tiristor  $g_1$  (figura 4.2). Quando o tiristor  $g_1$  entra em condução, o capacitor do circuito snubber é descarregado na malha formada pelo circuito snubber e o tiristor  $g_1$ , ou seja, a corrente de descarga do capacitor, somente circula pela válvula e, portanto, não provoca distorções na corrente na fase AB do RCT (conforme pode ser constatado na figura 4.7).



Com vistas à validação dos resultados simulados, são novamente rerepresentados na figura 4.8, a corrente de linha no secundário do transformador (sinal  $i_{2A}$ , figura 4.2) e a corrente na fase AB do RCT (sinal  $i_{RCT}$ , figura 4.2).

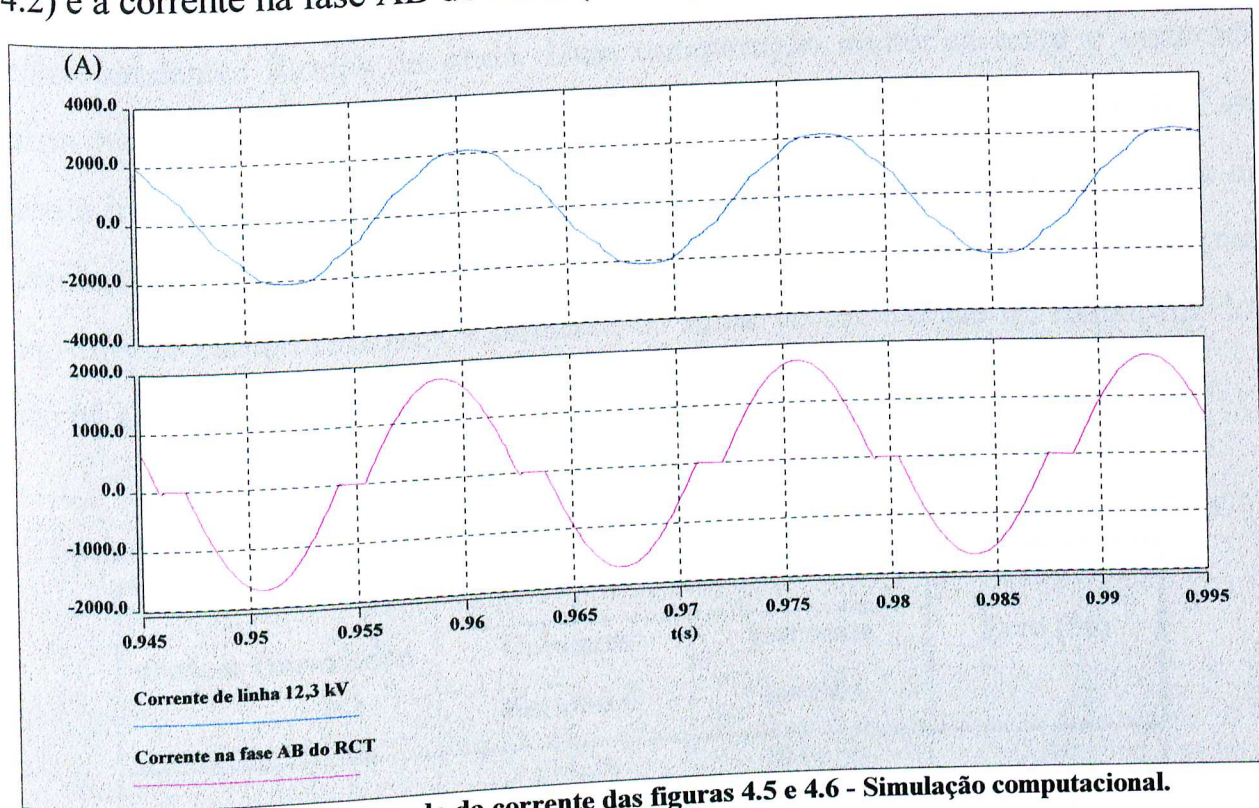


Figura 4.8 - Forma de onda da corrente das figuras 4.5 e 4.6 - Simulação computacional.

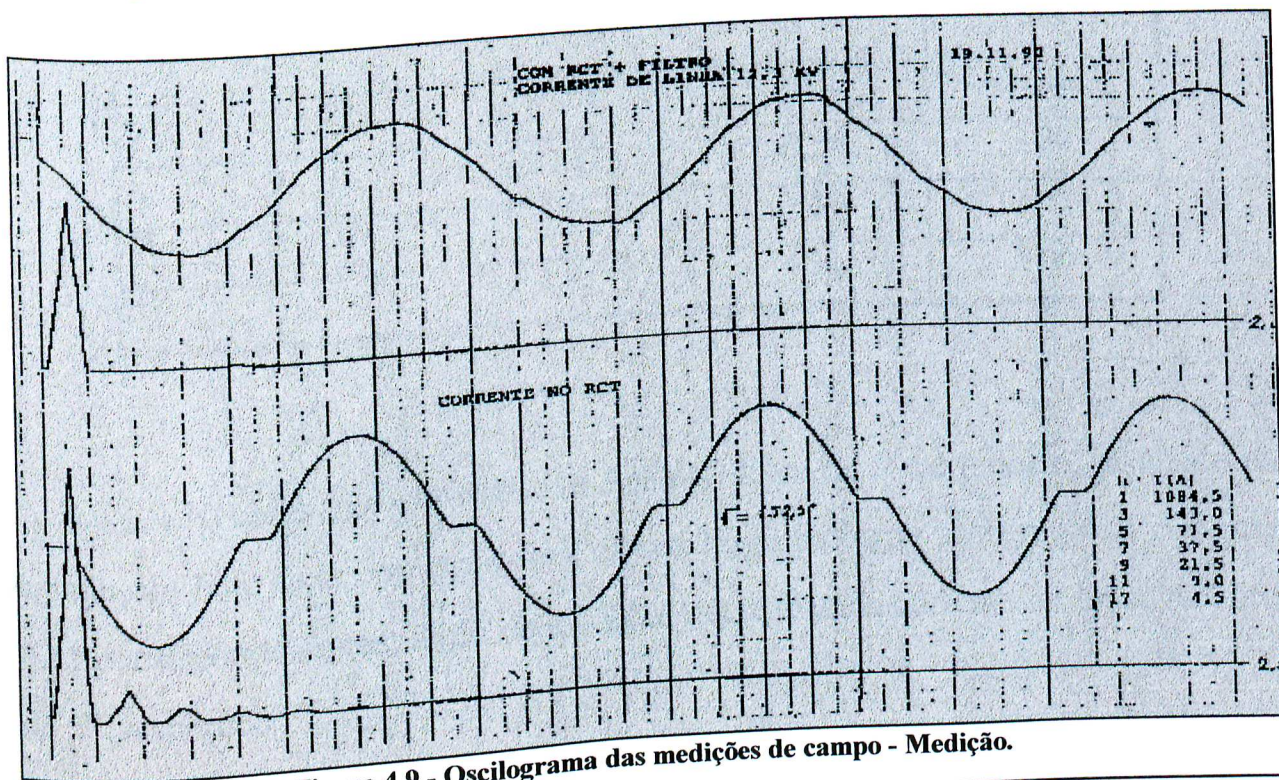


Figura 4.9 - Oscilograma das medições de campo - Medição.

Observando-se e comparando-se os resultados da figura 4.8 (que correspondente à simulação), com os oscilogramas indicados na figura 4.9 (que corresponde a resultados de medição [18]), nota-se que existe uma grande similaridade entre as correspondentes formas de onda. Uma comparação numérica entre o conteúdo harmônico das correntes medidas e simuladas está mostrada na tabela 4.10. Essa tabela indica que o conteúdo harmônico da corrente de fase do RCT obtida da simulação se apresenta com valores bem próximos dos medidos em campo (nos registros de campo relativos à corrente de linha no secundário do transformador não há a decomposição harmônica deste sinal).

Tabela 4.10 - Comparação entre os resultados medidos e simulados para a corrente de fase do RCT.

Ordem Harmônica	Valor eficaz (A)		Erro (%)
	Corrente simulada	Corrente medida	
1	1111,20	1084,50	2,46
3	144,14	143,00	0,80
5	74,01	71,50	3,39
7	39,08	37,50	4,21
9	22,27	21,50	3,58
11	9,34	9,00	3,78
17	4,77	4,50	6,00

A figura 4.10 apresenta a corrente de linha no filtro de 5º harmônico, resultado da simulação. Este sinal corresponde à variável  $i_{\text{filtro}}$  indicada na figura 4.2. A figura 4.11 corresponde ao resultado da medição desta mesma corrente de linha no filtro de 5º harmônico.



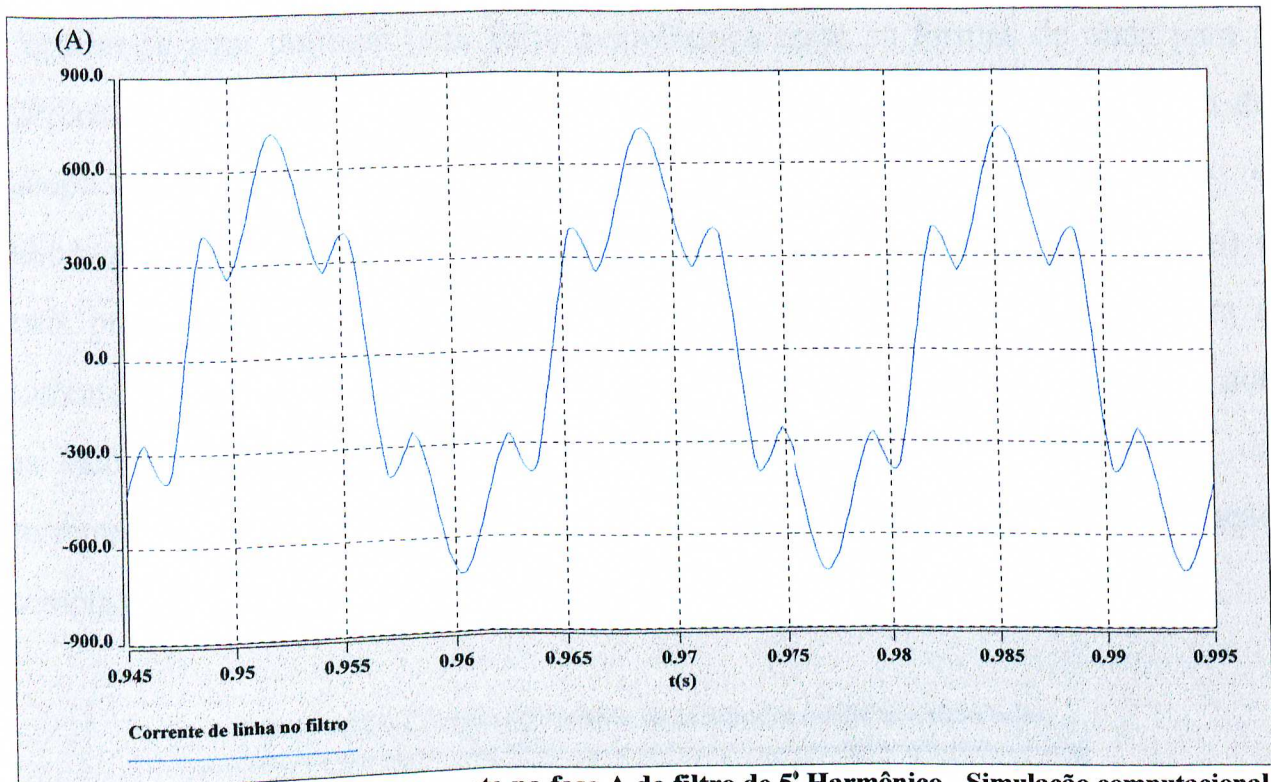


Figura 4.10 - Forma de onda da corrente na fase A do filtro de 5º Harmônico - Simulação computacional.

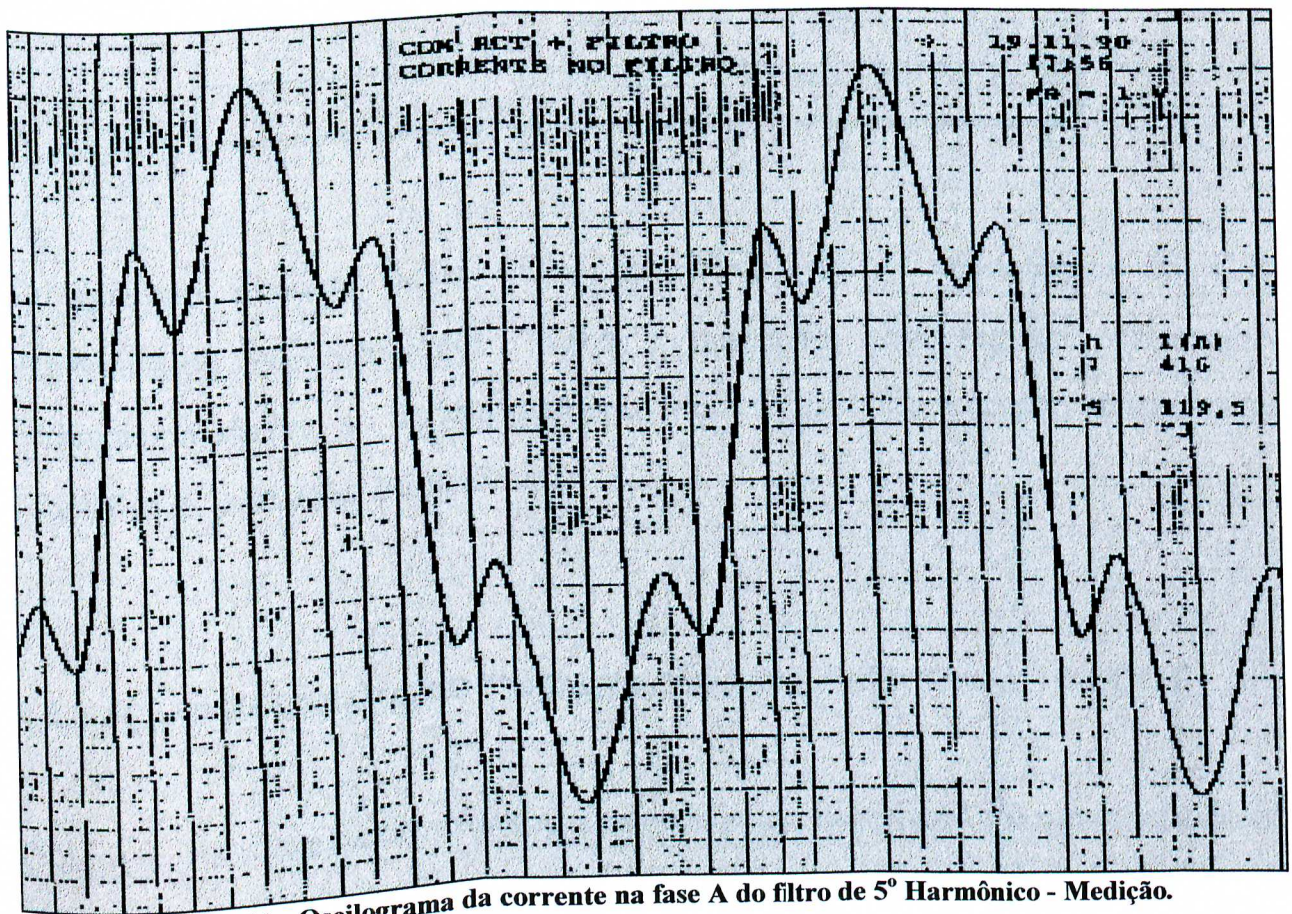


Figura 4.11 - Oscilograma da corrente na fase A do filtro de 5º Harmônico - Medição.

Constata-se aqui também uma forte semelhança entre as formas de onda para a corrente de linha no filtro de 5<sup>o</sup> harmônica obtida via simulação e medição de campo. Observa-se na figura 4.10 que, durante o semiciclo positivo, o afundamento à esquerda do valor máximo (por exemplo, no instante 0,95 s) é mais pronunciado que o da direita. Tal característica também ocorre com a corrente medida (figura 4.11). No aspecto quantitativo, a tabela 4.11 mostra que os valores eficazes da componente fundamental e da quinta harmônica da corrente medida estão bem próximos dos obtidos através da simulação computacional.

**Tabela 4.11 - Comparação entre os resultados medidos e simulados.**

Ordem harmônica	Simulado (A)	Medido (A)	Erro (%)
1	418,74	416,00	0,66
5	123,00	119,5	2,93

Do que foi exposto neste caso, conclui-se que, a modelagem do C.E. implementada no Simulador “Saber”, apresenta, em regime permanente, desempenho similar ao do equipamento real. O caso B, a seguir, destacará as condições de operação transitórias.

### 4.3.2 - CASO B: ENSAIOS DE ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO DO CCT

**Objetivo:** Verificar os transitórios decorrentes da energização/desenergização do CCT, com o C.E operando no modo “manual” e “automático”.



**Características:** Para a realização dos ensaios de energização do CCT, o sistema foi preparado de forma que a corrente no RCT fosse a mínima possível, permanecendo a tensão no barramento de 230 kV da SE de Coxipó próxima da nominal [19]. Nestas condições, a potência do C.E. é apenas referente à do filtro de quinto harmônico.

Serão mostrados os resultados de dois ensaios de energização do CCT, os quais serão apresentados como casos B1 e B3, e um ensaio de desenergização do CCT (caso B2). Os oscilogramas provenientes de medições (oriundos da referência [19]) infelizmente não possuem valores numéricos. Dentro deste contexto, a análise comparativa entre os resultados será realizada de forma qualitativa.

#### 4.3.2.1 - Caso B1:

*Ensaio de energização do CCT, estando o C.E. operando no modo “manual”, com os capacitores do CCT inicialmente descarregados.*

Como já dito anteriormente, a corrente no RCT é de mesma ordem de grandeza do que a corrente no filtro de quinto harmônico e, neste caso, o valor da susceptância “oferecida” pelo RCT ao sistema está muito próximo do valor pré-especificado para o parâmetro “b\_on” (ver, Tab. 3.8 no capítulo III). Se a susceptância do RCT, definida pelo sistema de controle do C.E., for igual a b\_on, é emitido a ordem de conexão do CCT. Como neste caso o modo de operação do C.E. é “manual”, para “forçar” propositadamente a entrada do CCT, bastou alterar o valor do parâmetro bce\_manual (Tab. 3.8), após o instante 0,6 s, para o mesmo valor dado por b\_on.

As figuras a seguir ilustram algumas curvas referentes a esta energização, para as três fases, pois o sistema de controle do C.E. é de atuação monofásica.

A figura 4.12 apresenta a corrente de linha na fase A no primário do transformador (em cor azul), e as correntes na fase AB no CCT (em cor preta) e no RCT (em cor verde). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes serão mostrados na figura 4.13.

Nota-se que, as correntes nas fases do RCT e do CCT na figura 4.12 estão com polaridade contrária as da figura 4.13. Isto ocorreu porque adotou-se para os resultados simulados os sentidos de correntes e tensões indicados na figura 4.2. Isto é de fundamental importância, pois possibilita ao leitor “acompanhar” corretamente o que acontece com o fluxo de corrente em cada componente (RCT, CCT e filtro) ciclo a ciclo. Esta referida constatação não é possível de ser identificada através dos resultados medidos, pois estes foram medidos com polaridades aleatórias, provocando algumas incoerências que serão destacadas ao longo deste capítulo, como por exemplo, a mesma polaridade para as correntes de uma determinada fase do RCT e do CCT.

Uma outra observação importante mostrada nas figuras 4.12 e 4.13 refere-se ao primeiro semiciclo da corrente na fase do RCT. Quando o CCT é energizado, o RCT compensa simultaneamente quase totalmente a sua potência, de modo a evitar variações bruscas na tensão do sistema. Ressalta-se que, estando o CCT com a tensão residual nos capacitores inferior a 50% do valor nominal, como neste caso, o sistema de controle do C.E. faz com que o RCT assumira somente



50% de sua potência no primeiro semiciclo. Desta maneira, consegue-se atenuar os efeitos dos transitórios provocados pela energização do CCT.

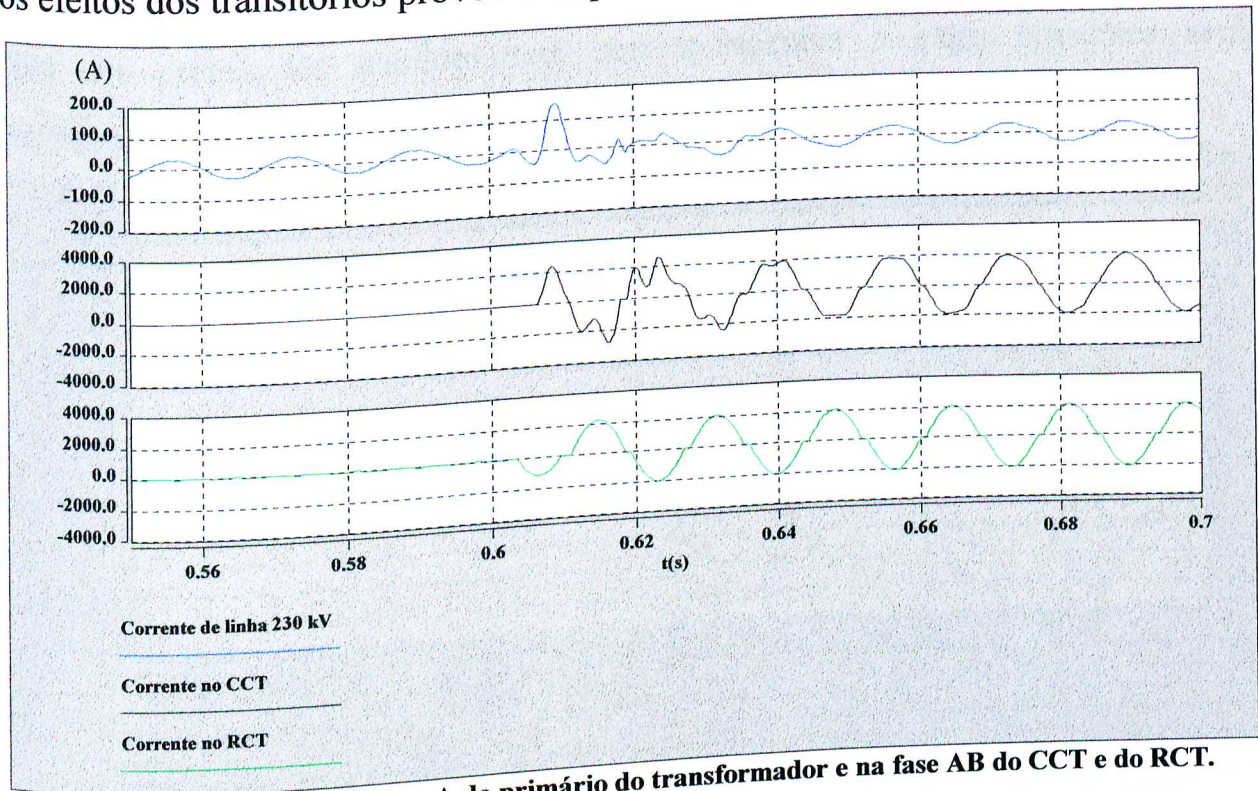


Figura 4.12 - Correntes na fase A do primário do transformador e na fase AB do CCT e do RCT.

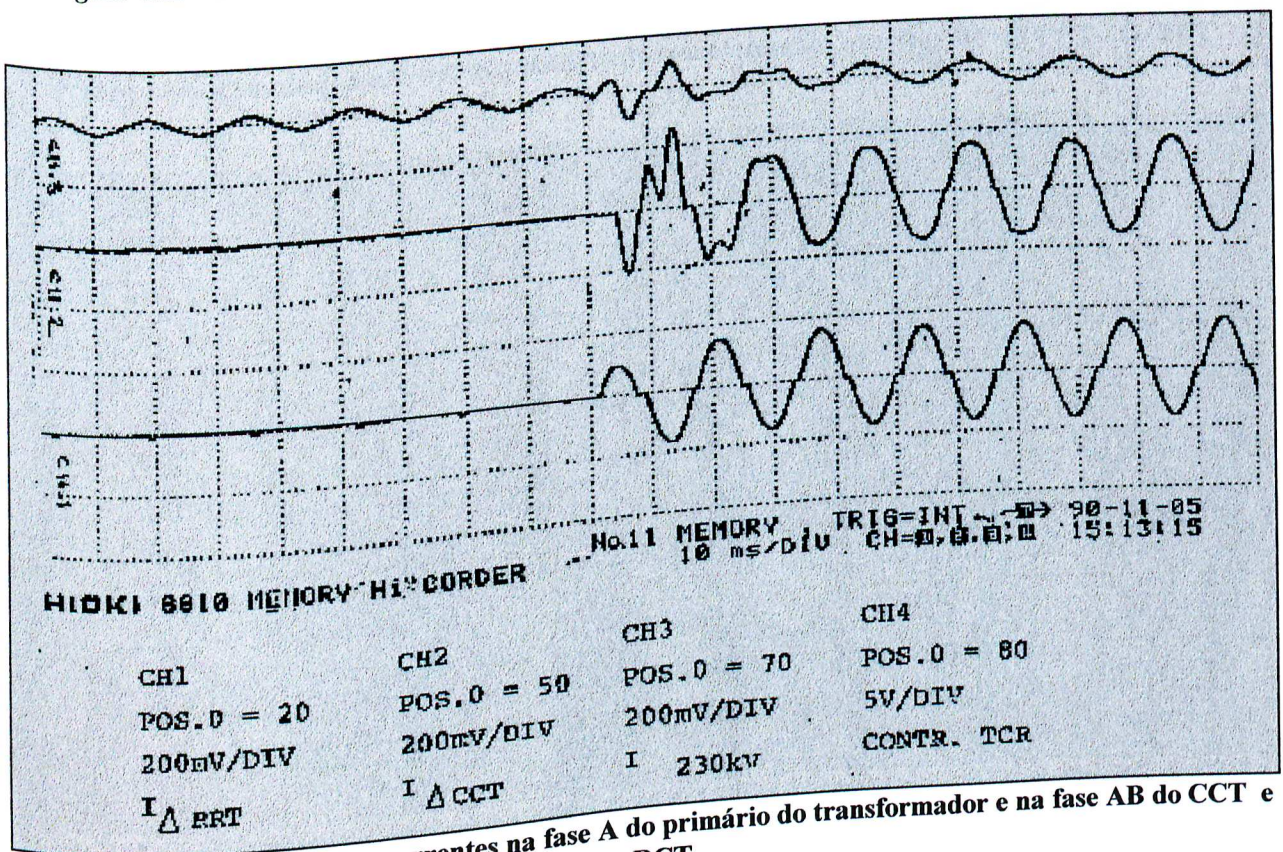


Figura 4.13 - Oscilograma das correntes na fase A do primário do transformador e na fase AB do CCT e do RCT.



A figura 4.14 apresenta a corrente de linha na fase B (em cor azul) no primário do transformador, e as correntes na fase BC no CCT (em cor vermelha) e no RCT (em cor preta). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes serão mostrados na figura 4.15.

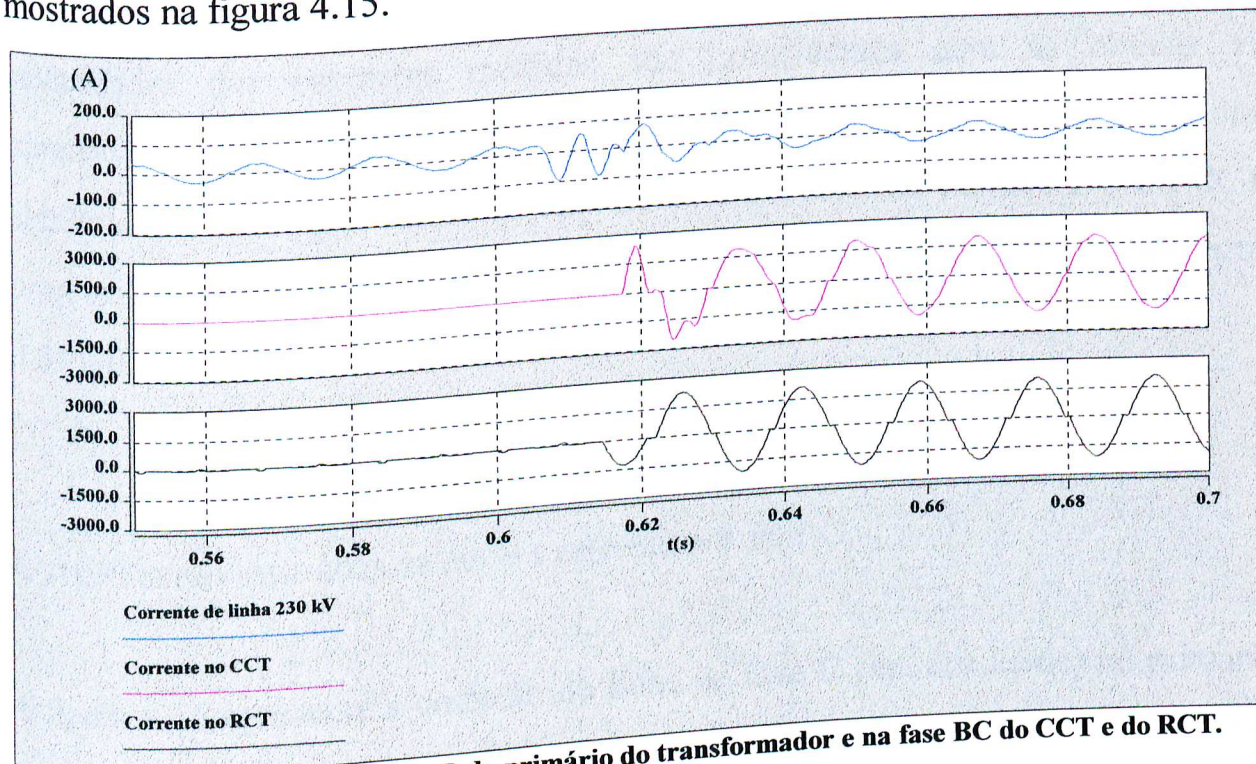


Figura 4.14 - Correntes na fase B do primário do transformador e na fase BC do CCT e do RCT.

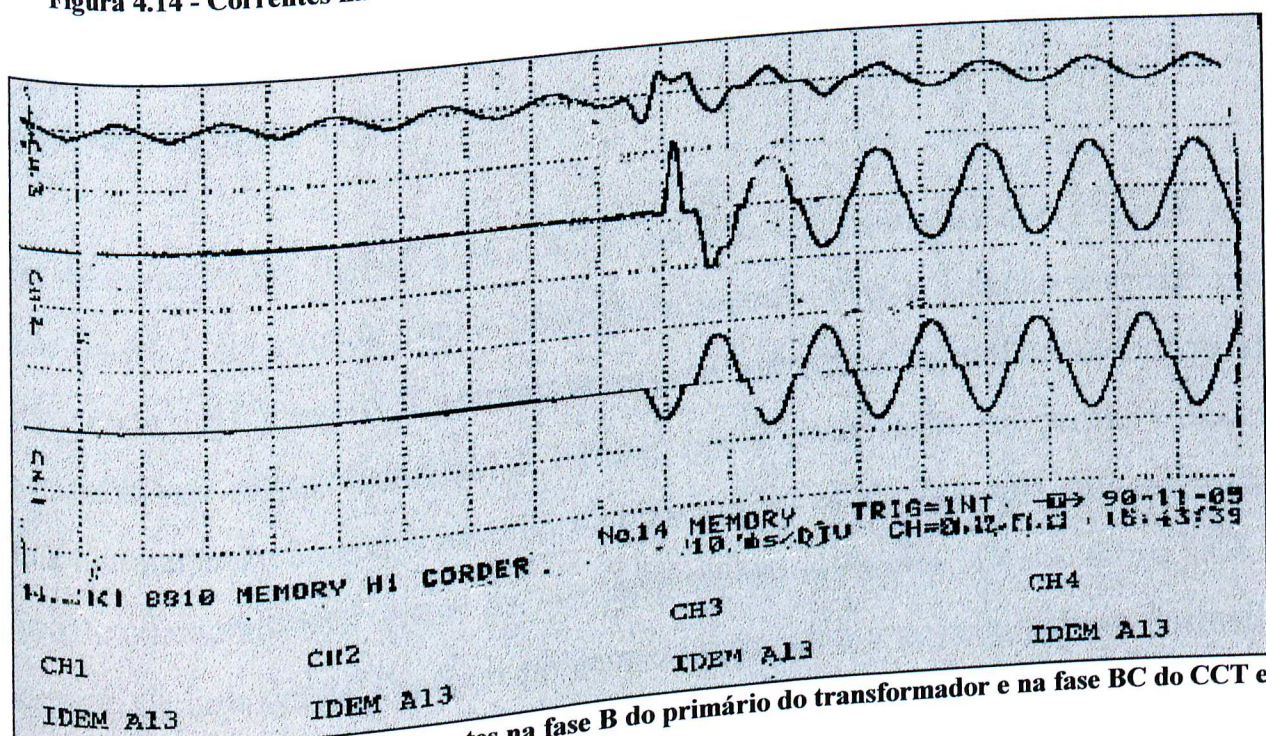


Figura 4.15 - Oscilograma das correntes na fase B do primário do transformador e na fase BC do CCT e do RCT.

Comparando-se os oscilogramas da figura 4.15 com os resultados de simulação fornecido pela figura 4.14, verifica-se uma forte concordância entre as correntes medidas e simuladas no tocante às formas de onda. As mesmas observações feitas para a fase A também se aplicam aqui. Ressalta-se no entanto que, as polaridades das correntes medidas são coincidentes com as obtidas via simulação, o que facilita as comparações. Por exemplo, pode ser constatado uma similaridade muito grande no comportamento da corrente na fase BC do CCT, principalmente nos instantes iniciais da energização, período compreendido entre 0,61 e 0,63 s.

A seguir serão ilustradas as curvas referentes à fase C.

A figura 4.16 apresenta a corrente de linha na fase C (em cor verde) no primário do transformador, e as correntes na fase CA no CCT (em cor azul) e no RCT (em cor vermelha). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes serão mostrados na figura 4.17.

Da observação das figuras 4.16 e 4.17, percebe-se claramente que a corrente na fase do RCT foi medida com a polaridade trocada. Esta afirmação é verdadeira, pois sendo o RCT e o CCT componentes com características fortemente indutivas e capacitivas, respectivamente. É natural que a associação em paralelo destes dois componentes (que é o caso aqui apresentado) estabeleça uma defasagem de aproximadamente  $180^\circ$  entre as suas respectivas correntes. Desta forma, se a corrente na fase do RCT estiver no semiciclo positivo a correspondente corrente



na fase do CCT estará no semiciclo negativo, conforme mostrado nos resultados simulados da figura 4.16.

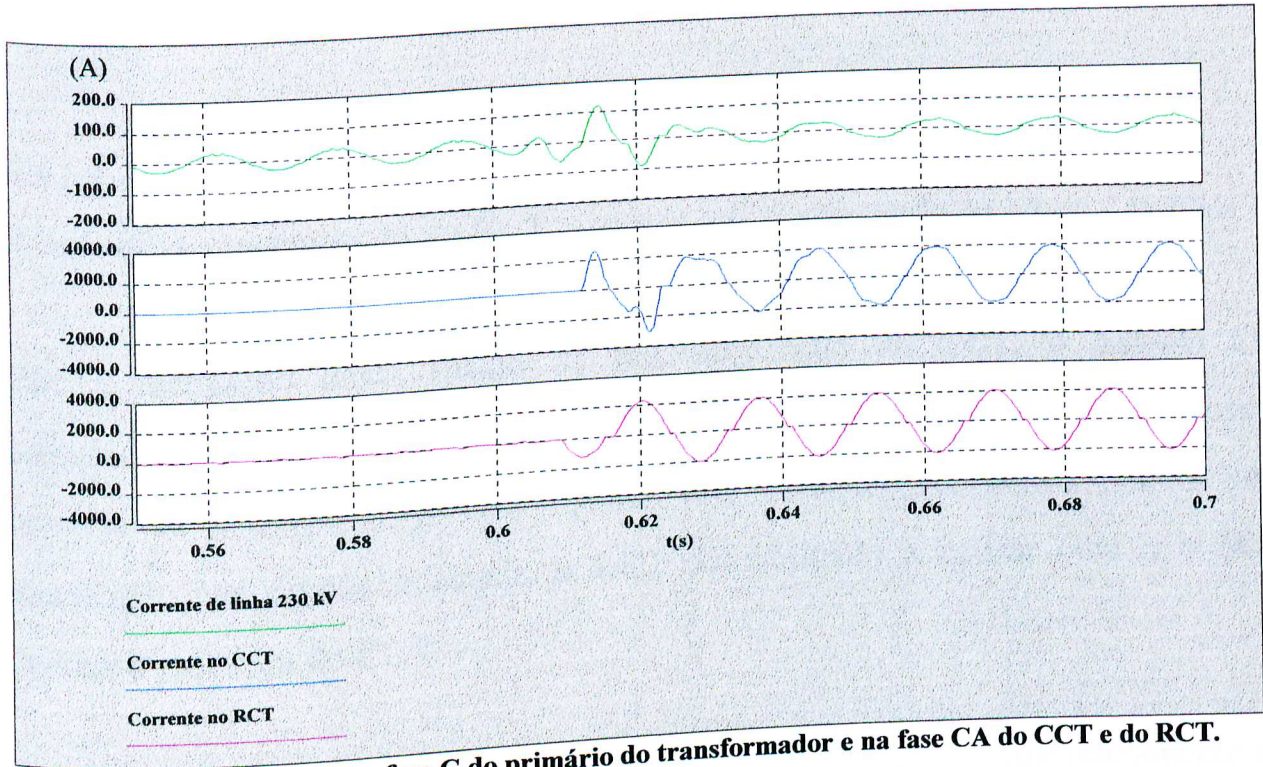


Figura 4.16 - Correntes na fase C do primário do transformador e na fase CA do CCT e do RCT.

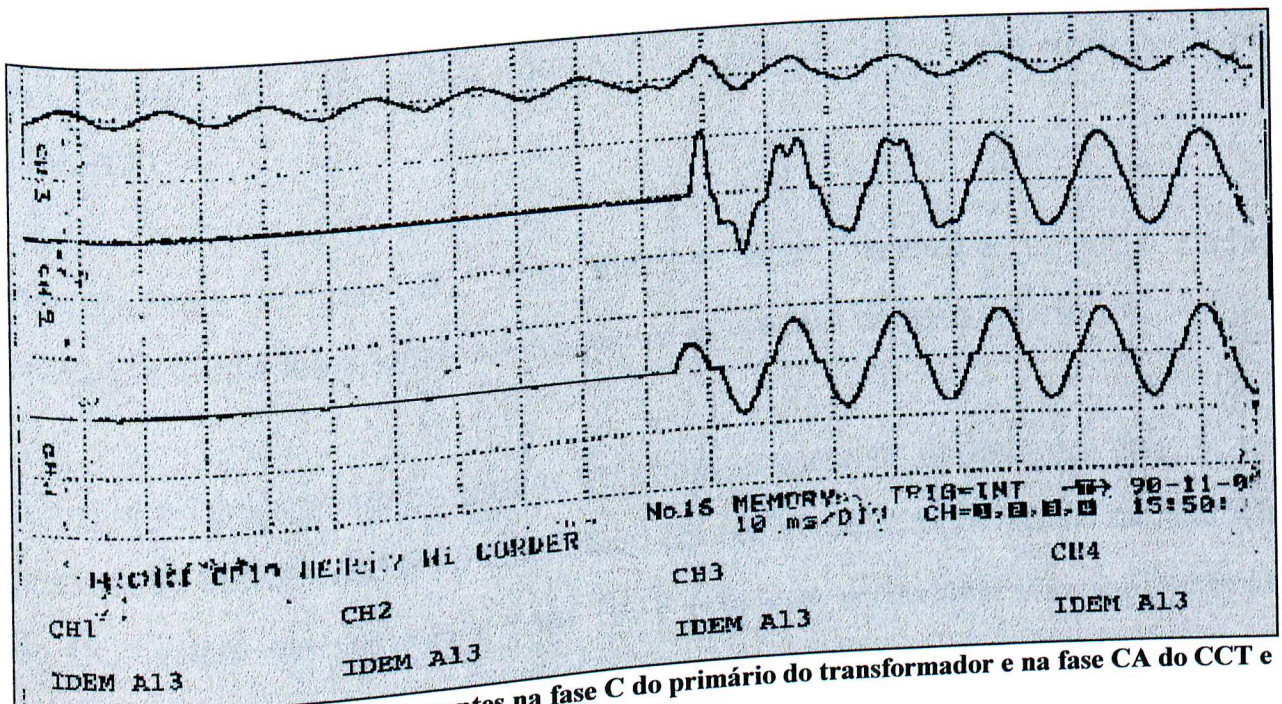


Figura 4.17 - Oscilograma das correntes na fase C do primário do transformador e na fase C do CCT e do RCT.

Enfim, conforme pode ser observado no caso desta energização do CCT, é grande a concordância entre as formas de ondas simuladas e as medições.

#### 4.3.2.2 - Caso B2:

*Ensaio de desenergização do CCT, estando o C.E operando no modo “manual”.*

Para a realização deste ensaio de desenergização do CCT, o sistema foi preparado para que a tensão no barramento de 230 kV da SE de Coxipó fosse próxima da nominal [19]. Para manter esta condição, conforme poderá ser visualizado nas figuras a seguir, o RCT foi obrigado a operar com  $\alpha = 90^\circ$  durante a presença do CCT.

Estando o C.E. operando no modo “manual” para “forçar” propositamente a desenergização do CCT, bastou, para este caso B2, alterar o valor do parâmetro `bce_manual` (Tab. 3.8), após o instante 0,7 s, para o mesmo valor dado por `b_off` (Tab. 3.8).

Analogamente ao caso B1, aqui também serão ilustradas algumas curvas referentes às três fases, devido às razões já apontadas no caso anterior.

A figura 4.18 apresenta as formas de onda da corrente de linha na fase A, no primário do transformador do C.E. (sinal em cor verde) e as correntes na fase AB do CCT (sinal em cor azul) e do RCT (em cor vermelha). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes estão na figura 4.19.



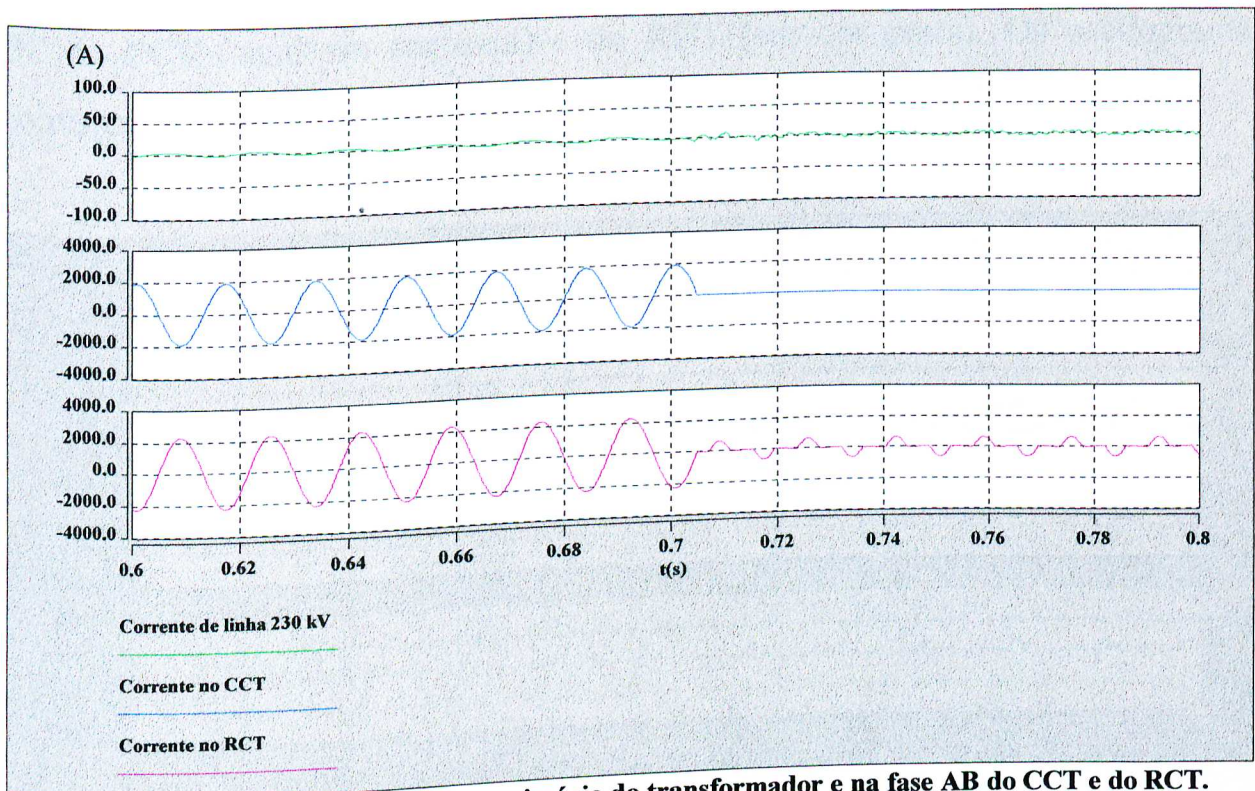


Figura 4.18 - Correntes na fase A do primário do transformador e na fase AB do CCT e do RCT.

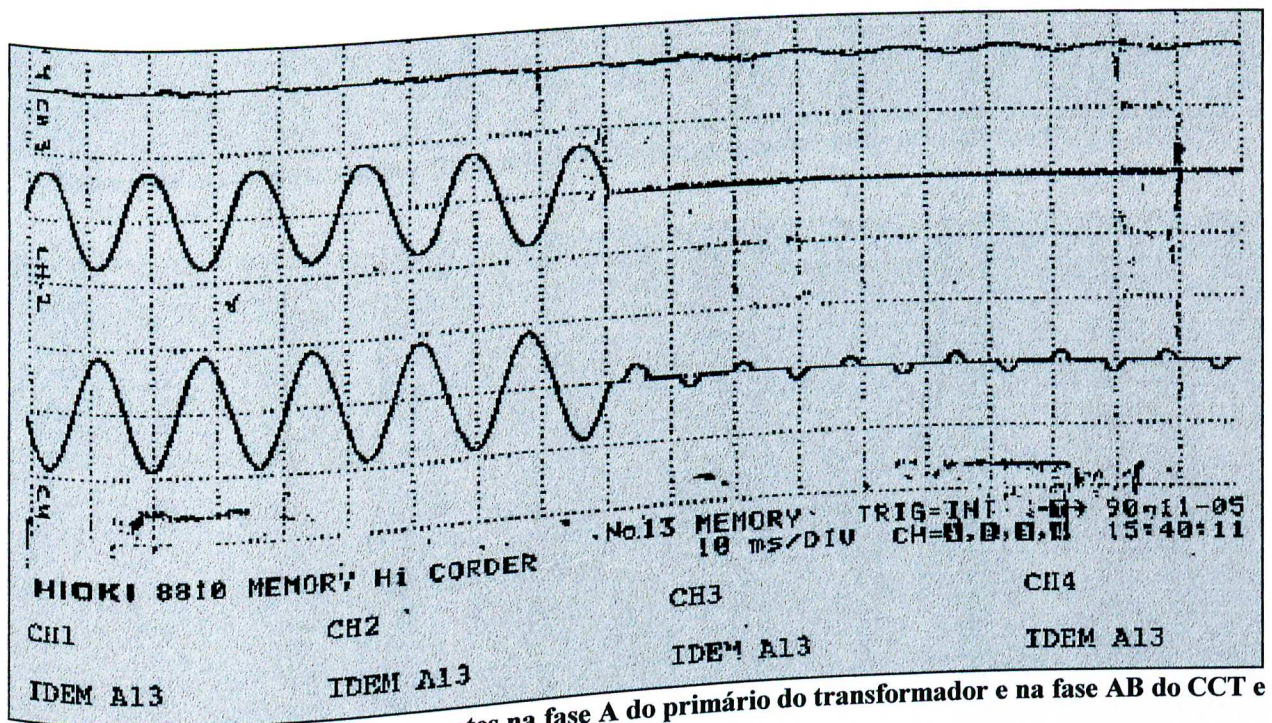


Figura 4.19 - Oscilogramas das correntes na fase A do primário do transformador e na fase AB do CCT e do RCT.

A figura 4.20 apresenta as formas de onda da corrente de linha na fase B no primário do transformador do C.E. (sinal em cor vermelha) e as correntes na fase



BC do CCT (sinal em cor azul) e do RCT (em cor preta). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes serão mostrados na figura 4.21.

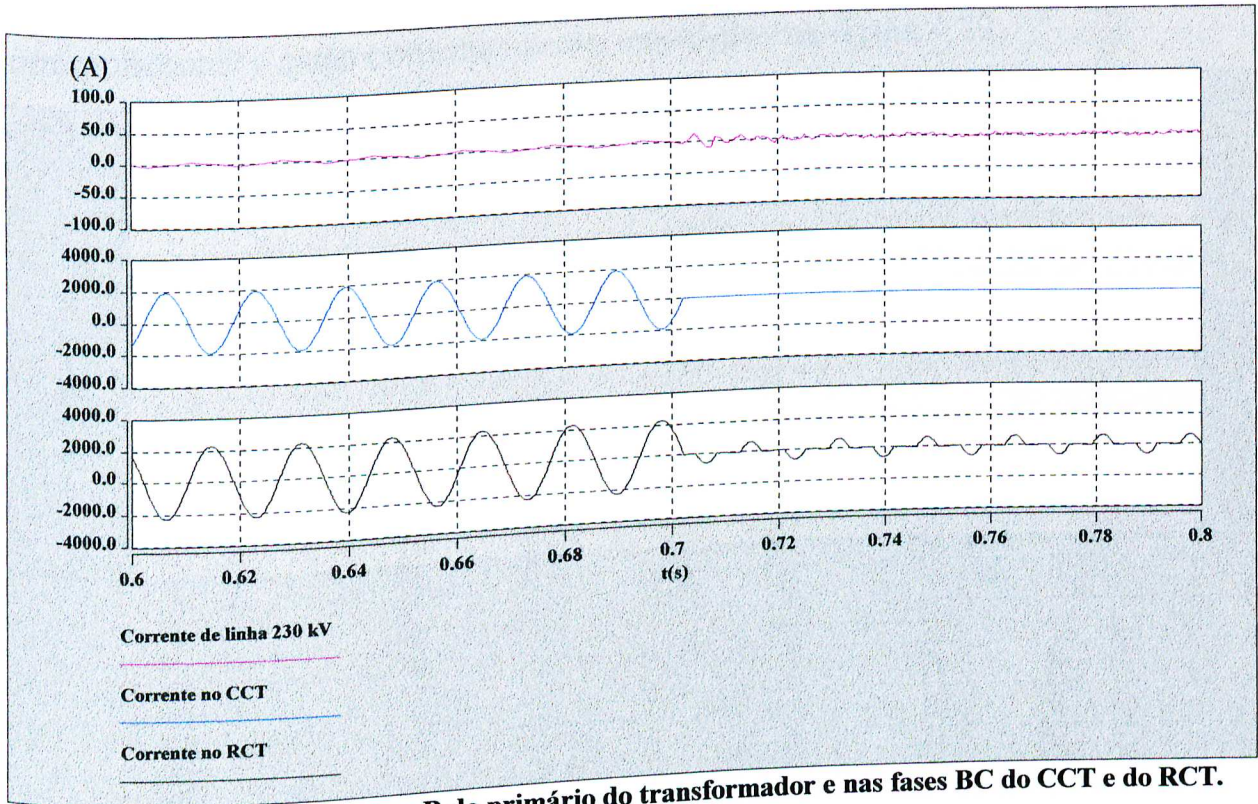


Figura 4.20 - Correntes na fase B do primário do transformador e nas fases BC do CCT e do RCT.

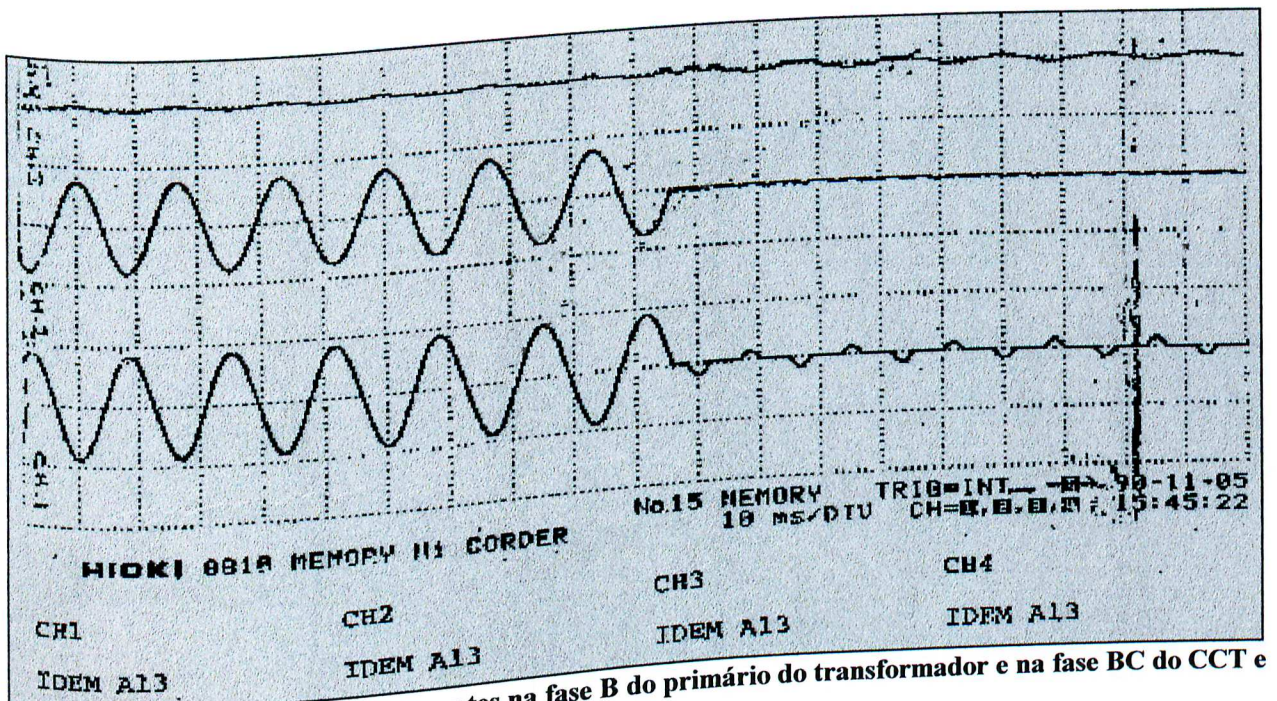


Figura 4.21 - Oscilogramas das correntes na fase B do primário do transformador e na fase BC do CCT e do RCT.



A figura 4.22 apresenta as formas de onda da corrente de linha na fase C no primário do transformador do C.E. (sinal em cor preta) e as correntes na fase CA do CCT (sinal em cor verde) e do RCT (em cor azul). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes serão mostrados na figura 4.23.

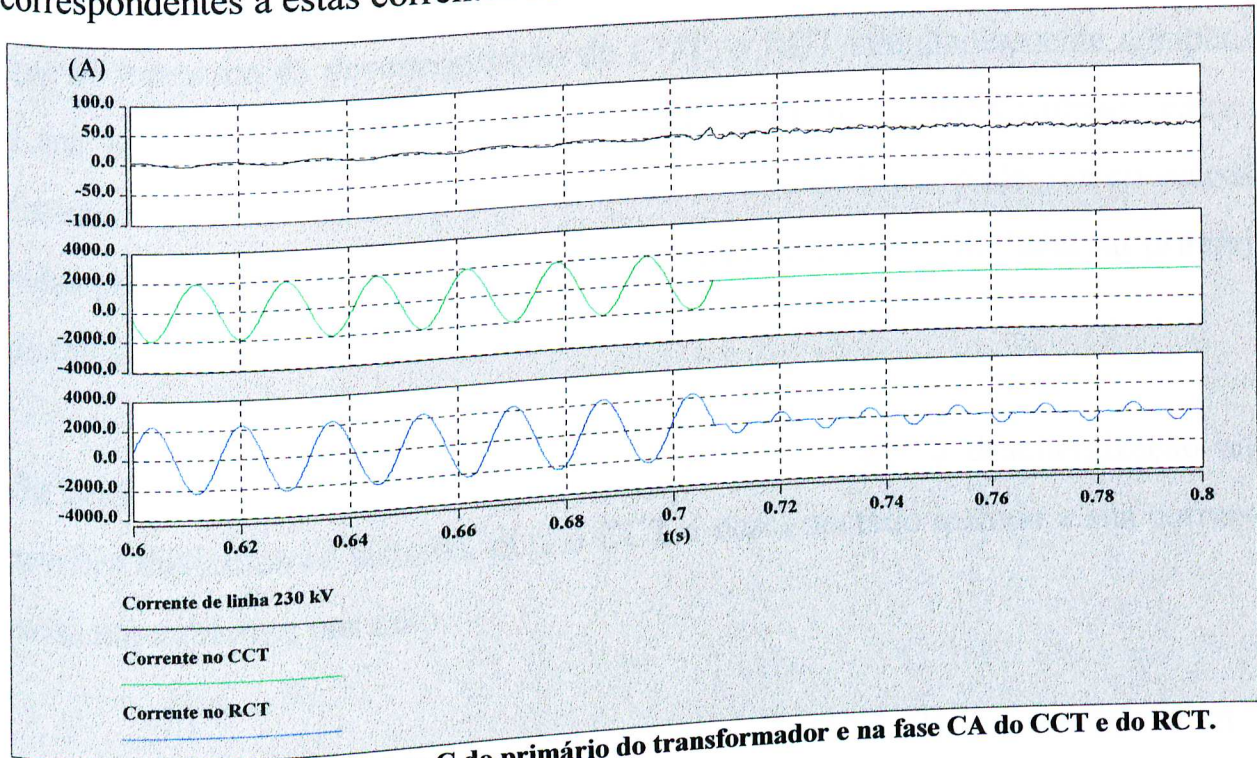


Figura 4.22 - Correntes na fase C do primário do transformador e na fase CA do CCT e do RCT.

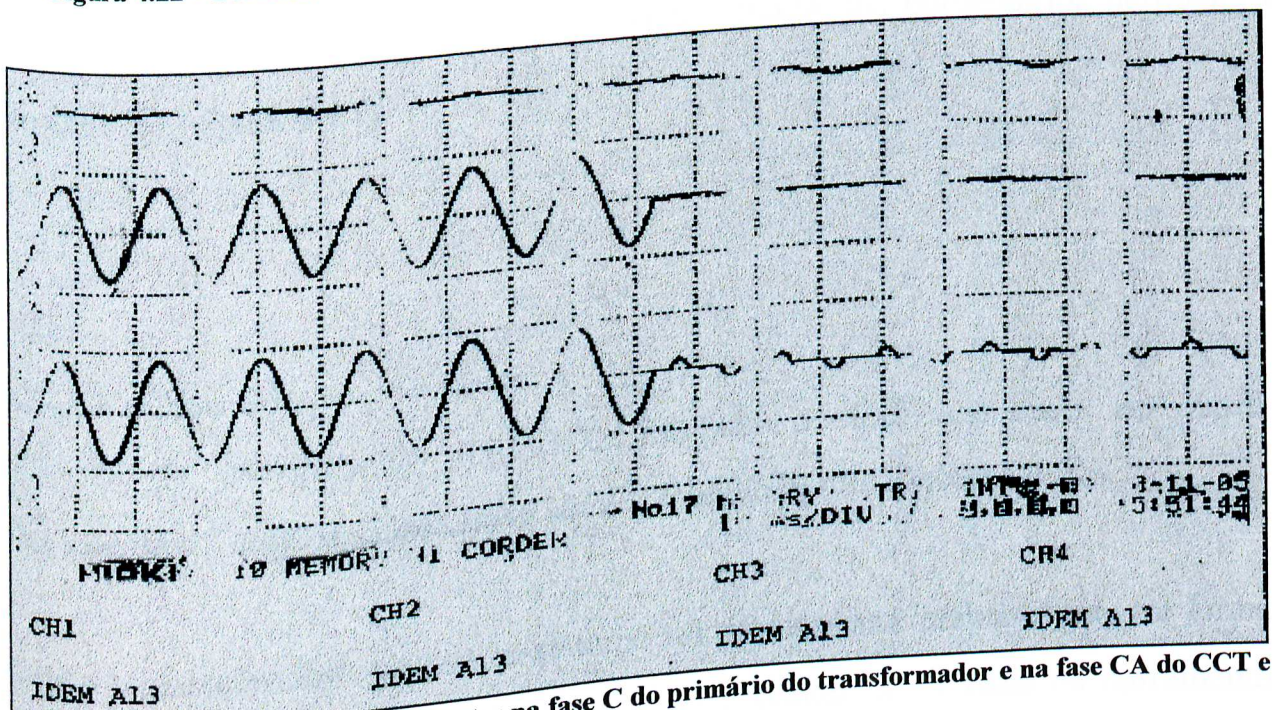


Figura 4.23 - Oscilogramas das correntes na fase C do primário do transformador e na fase CA do CCT e do RCT.

Da comparação entre as figuras 4.18, 4.20 e 4.22, associadas aos resultados da simulação, com as figuras 4.19, 4.21 e 4.23, relacionadas com as correspondentes medições, verifica-se uma grande similaridade entre os resultados relativos às correntes nas fases do CCT e do RCT. Das análises das figuras citadas, nota-se que no momento da desenergização do CCT, o RCT simultaneamente compensa a sua saída. Nestas condições, a quantidade de reativos intercambiada entre o sistema e o C.E. não sofre grandes alterações. Conforme pode ser constatado pelas pequenas modificações na forma de onda da corrente de linha no primário do transformador do C.E.

Da comparação entre os casos B1 e B2, conclui-se que a desenergização não provoca distúrbios ao sistema, pois o CCT é desconectado quando a sua corrente passa naturalmente por zero.

A corrente na fase do RCT (mostrada na figura 4.23) foi medida com a polaridade trocada. Esta afirmação é fundamentada nos comentários pertinentes ao caso B1 (figura 4.17).

#### **4.3.2.3 - Caso B3:**

*Ensaio de energização do CCT, estando o C.E operando no modo "automático" com os capacitores do CCT inicialmente descarregados.*

Para a realização deste ensaio, o sistema foi previamente preparado de tal forma que o C.E., operando no modo "automático", mantenha a tensão no barramento

---



de 230 kV da SE de Coxipó no seu valor nominal com a absorção de uma pequena quantidade de reativos no RCT.

Com o sistema operando nessas condições, é dado comando para elevação na tensão de referência de modo a “forçar” a entrada do CCT.

O sistema de controle, para eliminar a diferença entre a tensão medida e o valor desejado (referência), vai diminuindo cada vez mais o valor da susceptância oferecida pelo C.E. ao sistema. Quando o valor da susceptância do RCT se igualar ao valor dado ao parâmetro “b\_on” é emitida pelo sistema de controle uma ordem para conectar o CCT.

A seguir serão ilustradas as representações gráficas de algumas curvas referentes à esta energização do CCT.

A figura 4.24 apresenta a corrente de linha na fase A (em cor azul) no primário do transformador, e as correntes na fase AB no CCT (em cor vermelha) e no RCT (em cor verde). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes serão mostrados na figura 4.25.

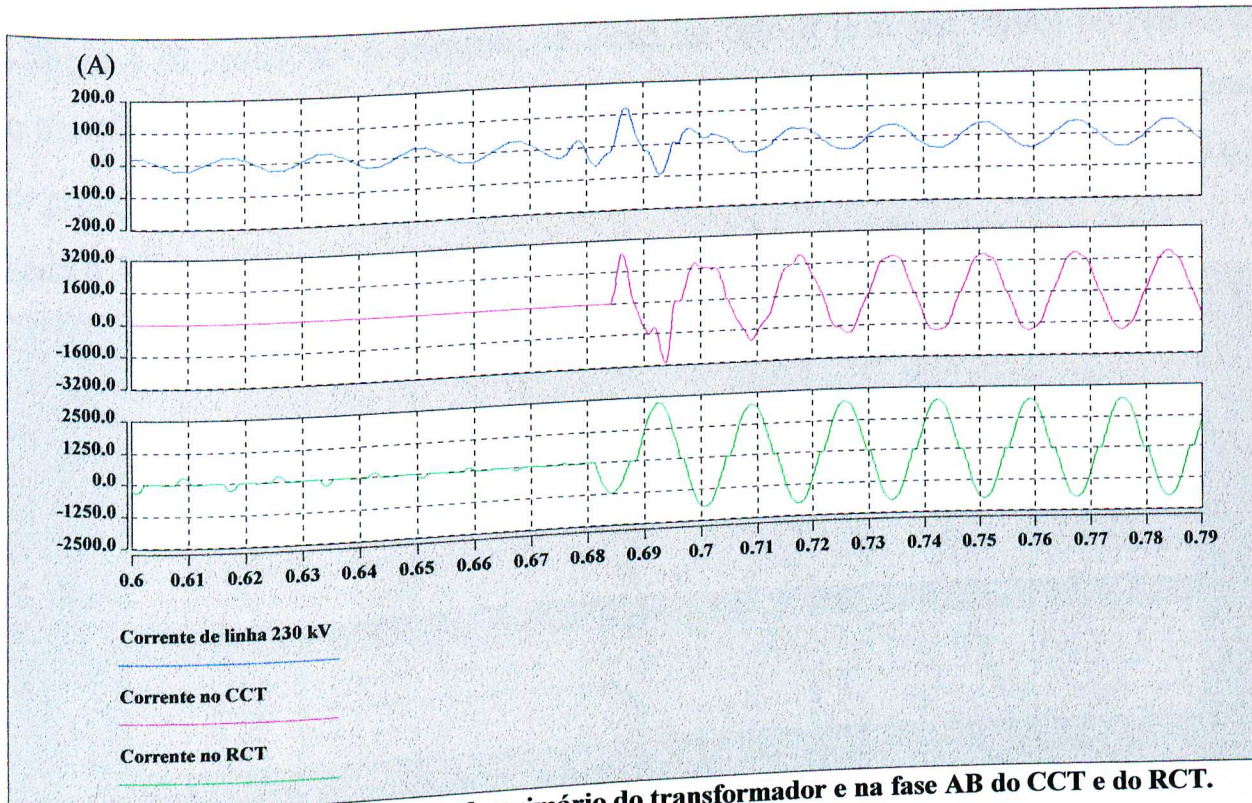


Figura 4.24 - Correntes na fase A do primário do transformador e na fase AB do CCT e do RCT.

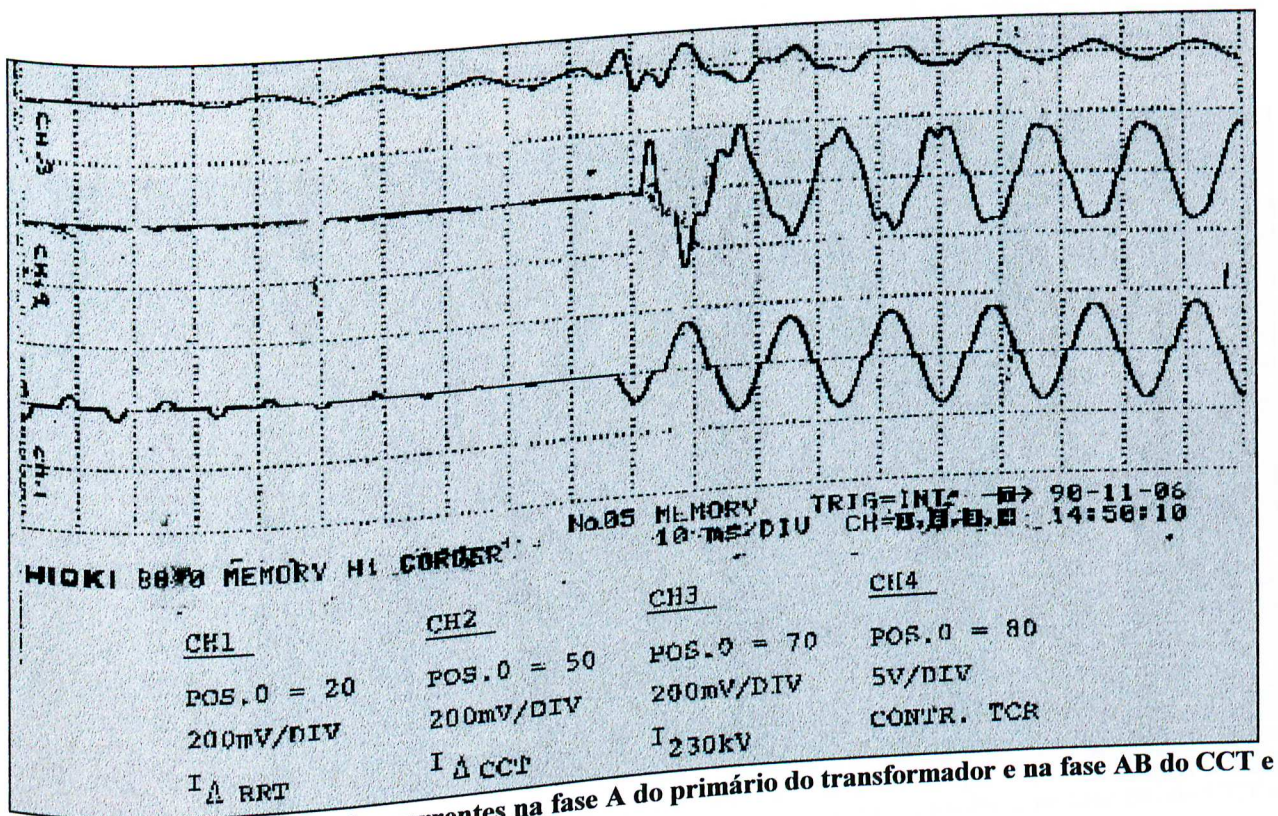


Figura 4.25 - Oscilogramas das correntes na fase A do primário do transformador e na fase AB do CCT e do RCT.



A figura 4.26 apresenta a corrente de linha na fase B (em cor verde) no primário do transformador, e as correntes na fase BC no CCT (em cor azul) e no RCT (em cor preta). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes serão mostrados na figura 4.27.

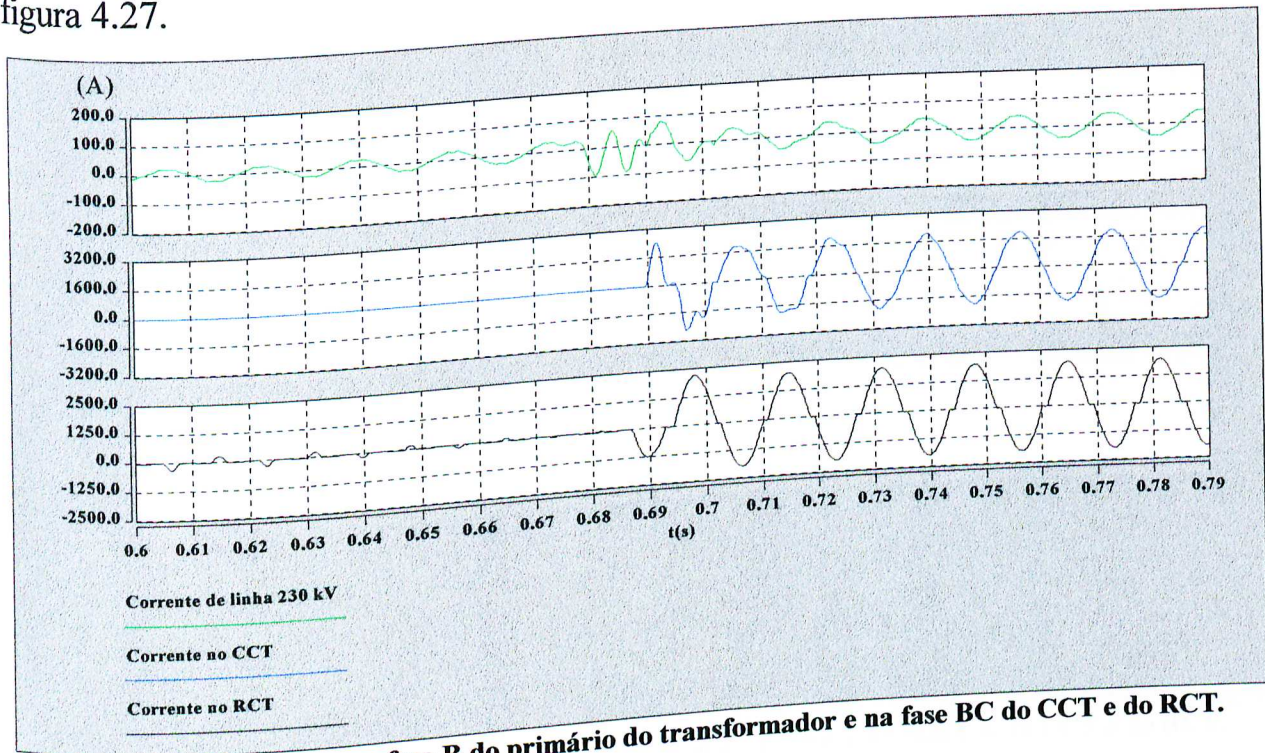


Figura 4.26 - Correntes na fase B do primário do transformador e na fase BC do CCT e do RCT.

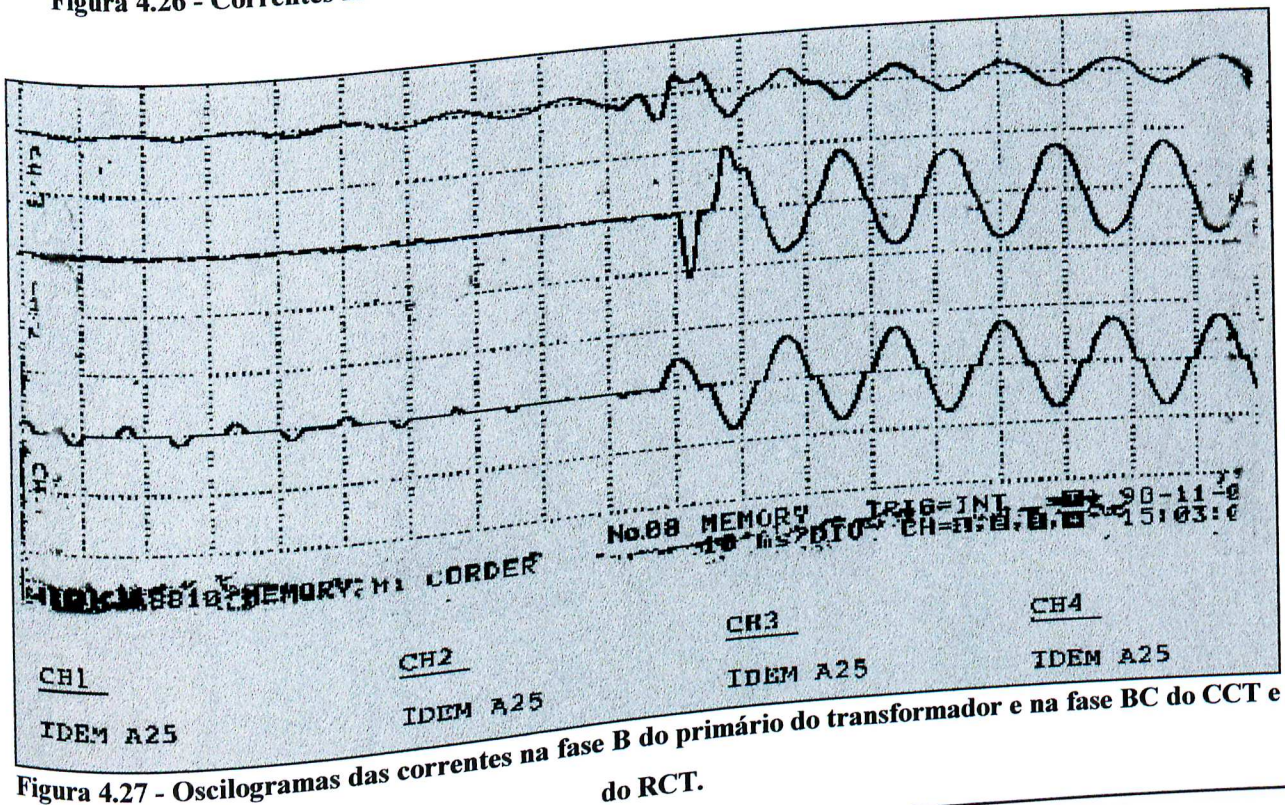


Figura 4.27 - Oscilogramas das correntes na fase B do primário do transformador e na fase BC do CCT e do RCT.



A figura 4.28 apresenta a corrente de linha na fase C (em cor verde) no primário do transformador, e as correntes na fase CA no CCT (em cor azul) e no RCT (em cor vermelha). Os oscilogramas correspondentes a estas correntes serão mostrados na figura 4.29.

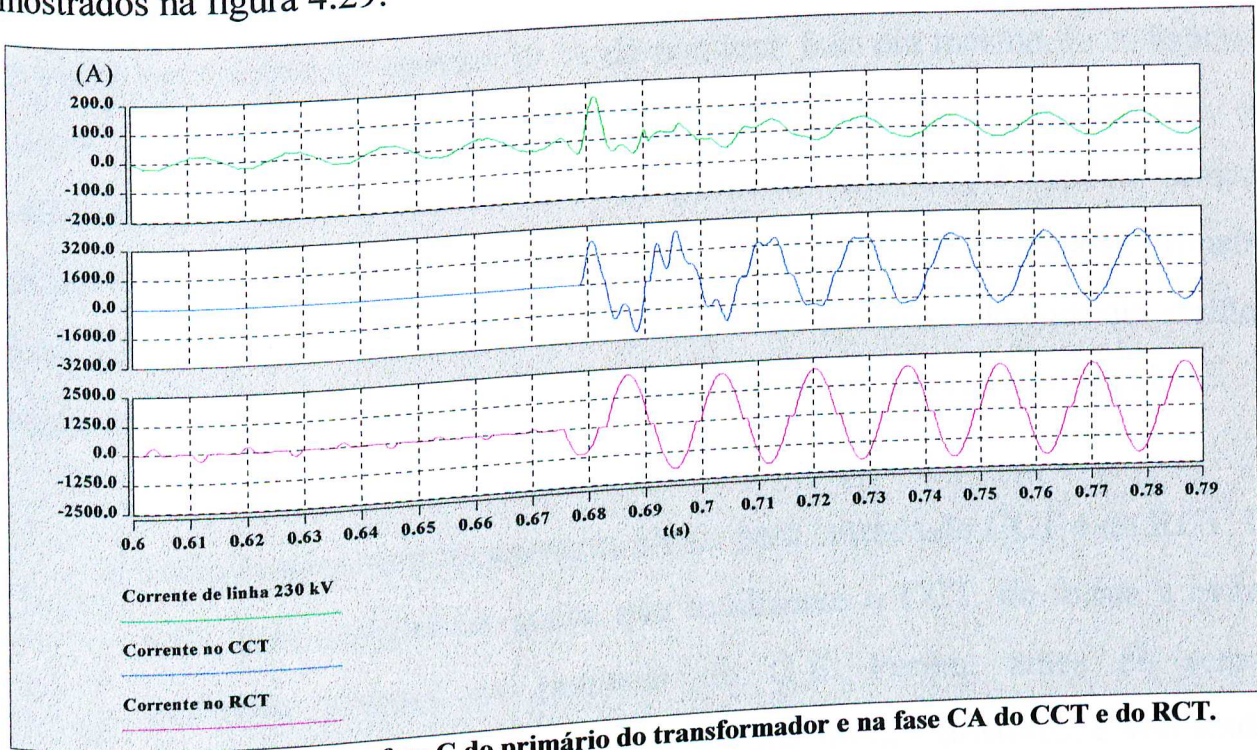


Figura 4.28 - Correntes na fase C do primário do transformador e na fase CA do CCT e do RCT.

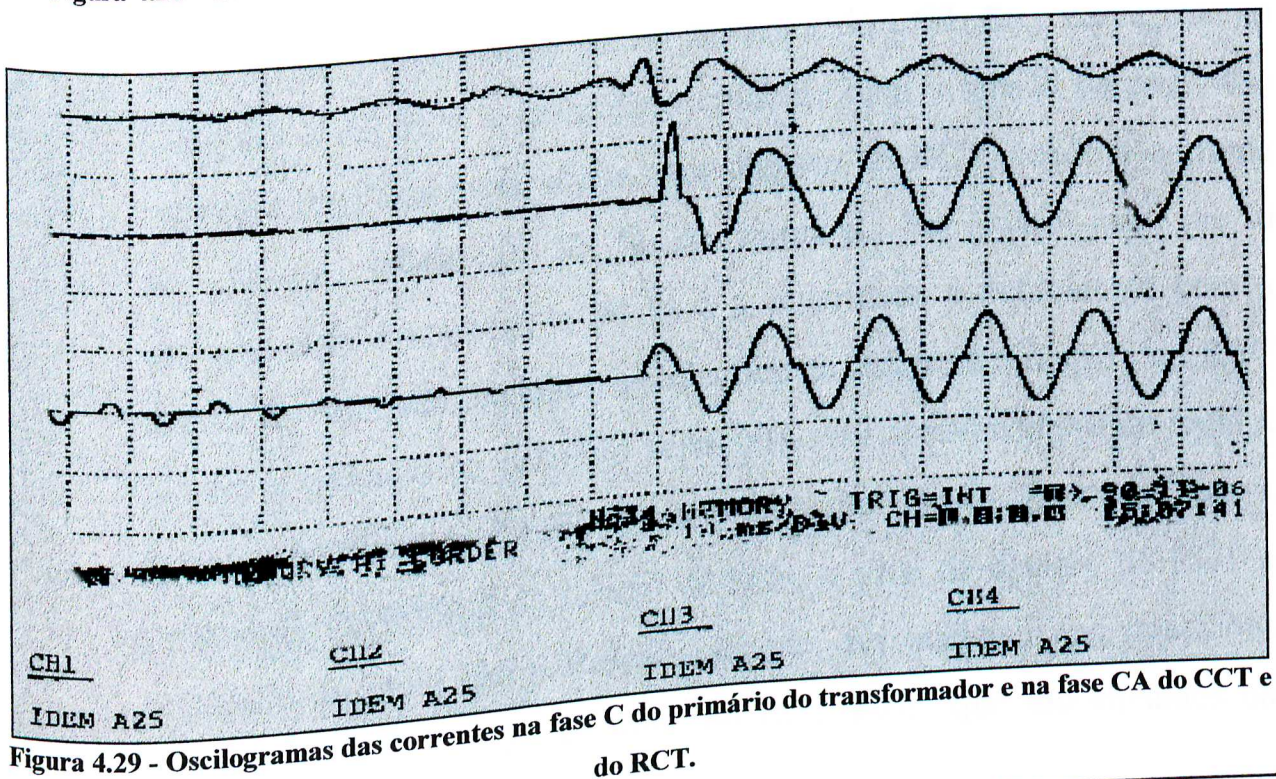


Figura 4.29 - Oscilogramas das correntes na fase C do primário do transformador e na fase CA do CCT e do RCT.



Como nos casos anteriores, há uma grande semelhança entre as simulações e as medições. Por outro lado, analogamente ao caso B1, nota-se através dos resultados (medidos ou simulados) que, no momento da energização do CCT, estando o mesmo com os seus capacitores descarregados, a corrente no RCT no primeiro semiciclo é de apenas 50 % da nominal. Isso era mesmo de se esperar, devido à estratégia adotada para o sistema de controle para redução de transitórios, pois a corrente no CCT, no primeiro semiciclo, é também sempre inferior à nominal. Verifica-se também que, a corrente no RCT inicia-se primeiro que a corrente no CCT. Isto ocorre porque, quando o sistema de controle verifica a necessidade de chaveamento do CCT, o procedimento adotado é o seguinte:

- São enviados simultaneamente sinais para entrada do CCT e do RCT. O RCT deve compensar quase que totalmente o CCT, de forma a evitar variações bruscas na potência do C.E. Porém, antes de serem efetivamente enviados os pulsos para disparo dos tiristores, é verificado a polaridade e o carregamento do capacitor do CCT. Se o carregamento é inferior a 50 % e a polaridade coincide com a tensão da rede, são enviados imediatamente sinais para disparo do RCT, sendo a corrente no primeiro semiciclo 50 % da nominal. Por outro lado, se o carregamento é superior a 50 % e a polaridade é coincidente com a tensão da rede, são enviados imediatamente sinais para disparo do RCT (porém a corrente no primeiro semiciclo será aproximadamente igual a corrente nominal do CCT). Caso o capacitor do CCT estiver com a polaridade contrária à da tensão da rede, o sinal de disparo do RCT é retardado de meio ciclo. Ressalta-se que, em qualquer das condições descritas, passa a existir corrente no RCT assim que são enviados os

pulsos de disparo. Quanto ao CCT, a circulação de corrente somente inicia-se após terem sido enviados os pulsos de disparo e a tensão na rede igualar com a do seu capacitor. Como o capacitor estava inicialmente descarregado, passou a haver condução no RCT assim que foram recebidos os pulsos de disparo. Já o CCT somente é energizado quando a tensão da rede passa por zero.

#### 4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo foram realizadas diferentes comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles extraídos da simulação.

Tomando-se como base os dois casos processados e analisados, pode-se concluir que:

- Demonstrou-se grande similaridade entre os resultados obtidos pelo Simulador “Saber” e as medições de campo. Esta afirmativa é fundamentada tanto pelos aspectos das formas de onda como pelo valores numéricos, os quais foram possíveis apenas para o caso A.
  - Em relação aos tempos utilizados para os processamentos definidos e necessários à comparação entre os resultados simulados e medidos, o caso A foi o que consumiu maior tempo de execução, gastando aproximadamente 15 minutos, com um passo de simulação em torno de 40 microsegundos. As simulações foram realizadas em um micro computador Pentium II 266 MHz com 64 MB de memória RAM.
-

De uma forma geral, os resultados obtidos proporcionaram a validação da ferramenta computacional e a garantia de que o modelo do C.E.(incorporado no Simulador “Saber”) é adequado, seguro e confiável, podendo ser utilizado para verificar o desempenho deste equipamento perante as mais diversas contingências operacionais.

Não obstante o otimismo alicerçado nos resultados apresentados, os estudos conduzidos e documentados neste capítulo, indicam que a plenitude da similaridade somente existirá quando as informações supridas ao programa estiverem em total consonância com o sistema real.

## ***CAPÍTULO V***

### ***CONCLUSÕES GERAIS***

Este trabalho teve por objetivo implementar e incorporar junto ao Simulador “Saber”, um modelo matemático para os compensadores estáticos, constituídos de reator controlado a tiristores (RCT) e capacitor chaveado por tiristores (CCT). Dentro deste enfoque, procurou-se dotar o modelo com flexibilidade suficiente para que permitisse a simulação de qualquer condição operacional desejada. Embora, ao longo desta dissertação, tenham sido apresentadas as conclusões específicas de cada capítulo, destacando as diversas constatações e contribuições obtidas, este capítulo sintetiza as principais abordagens oferecidas por este trabalho.

O capítulo II descreveu as características fundamentais dos compensadores estáticos de reativos do tipo reator controlado a tiristores, enfocando o seu princípio de funcionamento através das equações que regem a sua operação. Neste capítulo procurou-se detalhar o tema, por exemplo, apresentando formas de ondas de tensão e corrente bem como diagramas unifilares com os principais arranjos trifásicos de RCT's empregados nos sistemas elétricos.

---



O capítulo III apresentou o desenvolvimento de um modelo matemático para os compensadores estáticos constituídos de reator controlado a tiristores (RCT) e capacitor chaveado por tiristores (CCT), ambos com conexão em triângulo. A configuração com o CCT conectado em estrela, bem como o RCT sem capacitores, também foram implementadas. Porém, devido à grande quantidade de detalhes envolvidos, optou-se pela descrição apenas do modelo mais completo do C.E. desenvolvido, pois este envolve as demais opções do C.E.

O capítulo IV dedicou-se à validação da modelagem desenvolvida no capítulo III. Para tanto, foram realizadas diferentes comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles extraídos da simulação. Os casos processados demonstraram grande similaridade entre os resultados obtidos pelo Simulador "Saber" e as medições de campo, caracterizando definitivamente a adequacidade do modelo matemático desenvolvido.

Não obstante o otimismo alicerçado nos resultados apresentados, os estudos conduzidos e documentados no capítulo IV, indicaram que a plenitude da similaridade somente existirá quando as informações supridas ao programa estiverem em total consonância com o sistema real.

A quantidade de estudos de casos apresentados poderia ser ampliada, por exemplo, com as seguintes análises:

- Estudo da aplicação do RCT em sistemas de potência para a redução do fenômeno "Flicker", bem como a compensação de cargas desequilibradas;

- Simulações de diferentes condições operacionais, para verificar o comportamento do compensador, por exemplo, na aplicação de um curto-circuito, em uma rejeição de carga, na perda de uma linha de transmissão, na energização de reatores e capacitores, etc;

Tais estudos não foram feitos apenas por falta de tempo. No entanto, a modelagem desenvolvida poderá analisar todas essas condições acima mencionadas.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

- [1] Resende, J. W., "Interaction between controlled reactors and converters - A harmonic analysis", Tese de doutorado, University of Aberdeen (UK), 1986.
- [2] Fonseca, C. S. *et al*, "Desenvolvimento de modelo para representação da resposta transitória do compensador estático de Coxipó no programa EMTP", X SNPTEE, Curitiba, 1989.
- [3] Ramos, A. J. P. *et al*, "Modelagem detalhada de compensadores estáticos para estudos de transitórios eletromagnéticos", VIII SNPTEE, São Paulo, 1986.
- [4] Filho, Wilkens G. *et al*, "Análise de desempenho e interação de compensador estático em sistema de transmissão", XI SNPTEE, Rio de Janeiro, 1991.
- [5] ELETRONORTE - "Sistema Mato Grosso - Compensador estático de Coxipó Modelagem digital - versão II", EPL - RE- 3.002/94.
- [6] Pires, F. A. C., "Uma contribuição ao estudo de harmônicas em sistemas de potência", Tese de doutorado, UNICAMP, fevereiro, 1991.
-

- [7] Samesima, M. I., "Compensadores estáticos de reativos e de desequilíbrios em sistemas elétricos de potência", Dissertação de mestrado, USP, 1984.
- [8] Filho, Eduardo H. Ellery, "Modelagem de compensadores estáticos para estudos dinâmicos à frequência industrial", Dissertação de mestrado, EFEI, abril, 1985.
- [9] GAMA, C. A., "Utilização de equipamentos com tecnologia FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em sistemas de potência - Compensação série controlada", Dissertação de mestrado, UFSC, 1995.
- [10] Miller, T. J. E., "Reactive power control in electric systems", John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [11] Drummond, M. A. G., "Modelagem de reatores controlados por tiristores para simulação de transitórios eletromagnéticos no programa EMTP", Dissertação de mestrado, PUC-RJ, 1982.
- [12] Oliveira, J. C. *et al*, "Cargas elétricas especiais", apostila editada pela UFU, 1986.
- [13] Companhia Hidroelétrica do São Francisco, "Estudos pré-operacionais do compensador estático de Fortaleza: estudos de regime permanente", RT-DOEL-20/83.
-



- [14] Schneider, M. C., “Compensador estático de energia reativa e de desequilíbrios de uma instalação trifásica”, Dissertação de mestrado, UFSC, março, 1980.
- [15] Domingues, E. G., “Uma contribuição à modelagem de transformadores convencionais e especiais utilizando o Simulador Saber”, Dissertação de mestrado, UFU, agosto, 1996.
- [16] ASEA ELÉTRICA LTDA, “Projeto do sistema de transmissão do Mato Grosso - Subestação Coxipó”, janeiro, 1988.
- [17] GCOI/SCEL/CAMT- 09/90 “Diretrizes para testes de avaliação do desempenho operacional do compensador estático da SE de Coxipó”, 1990.
- [18] GCOI/SCEL/CAMT- 07/91 “Medição de harmônicos no sistema Mato Grosso em função da entrada em operação do compensador estático da SE Coxipó”, 1991.
- [19] GCOI/SCEL/CAMT- 03/91 “Análise do desempenho do compensador estático da SE Coxipó quando da realização dos ensaios especiais durante o comissionamento”, 1991.