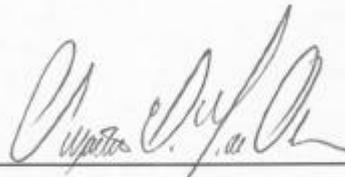


ELOS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA EM  
PROGRAMAS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Bernardo Schwenchk Fernandes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

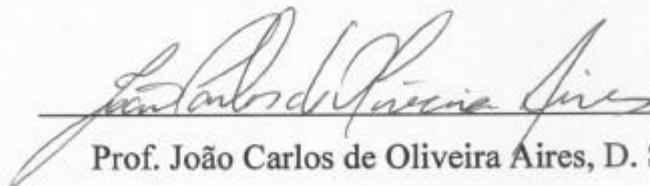
Aprovada por:



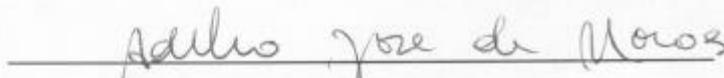
Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D. Sc.



Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph. D.



Prof. João Carlos de Oliveira Aires, D. Sc.



Prof. Adélio José de Moraes, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2005

FERNANDES, BERNARDO SCHWENCHK

Elos de Transmissão em Corrente Contínua  
em Programas de Estabilidade Transitória [Rio  
de Janeiro] 2005

IX, 123 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Elétrica, 2005)

Tese – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COOPE

1. Transmissão em Corrente Contínua
2. Estabilidade Transitória
3. Sistemas Elétricos de Potência

I. COPPE/UFRJ    II. Título (série)

A meu pai, que me ensinou a dar valor ao que realmente importa na vida.

A minha mãe que me indicou o caminho a seguir.

Ao meu irmão pelos muitos anos de amizade e companheirismo.

# **AGRADECIMENTOS**

A Marte Engenharia Ltda, pela oportunidade e incentivo para a realização deste trabalho.

Ao orientador e amigo Sebastião Ércules Melo de Oliveira, pela colaboração na caminhada até a conclusão deste trabalho e sobretudo, pela participação dedicada durante todo o curso.

Ao Engenheiro Nilo José Pereira de Macedo, pelas valiosas contribuições apresentadas. A sua cooperação foi fundamental para que este trabalho fosse concluído com êxito.

Aos amigos Antônio Felipe da Cunha Aquino e Márcio Leonardo Ramos Roberto pelo apoio incondicional nas horas difíceis.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ELOS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA EM PROGRAMAS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Bernardo Schwenchk Fernandes

Abril/2005

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Programa: Engenharia Elétrica

O objetivo deste trabalho é apresentar a descrição dos principais controles utilizados na implementação prática de um elo CCAT, verificar o efeito de algumas simplificações de modelagem e observar se podem afetar significativamente os resultados dos estudos dinâmicos.

Pretende-se também testar a influência de diferentes representações para o modelo do VCO, principalmente em situações de grande variação no nível de curto-circuito no lado inversor decorrente de emergências múltiplas próximas ao elo CC.

Este trabalho tomou como referência para comparação o Sistema de Transmissão em CC de FURNAS Centrais Elétricas implementado no programa ANATEM do CEPEL e previamente validado para algumas emergências no Simulador de Sistemas Elétricos de FURNAS.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## HVDC LINK MODELING IN TRANSIENT STABILITY PROGRAMS

Bernardo Schwenck Fernandes

April/2005

Advisor: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Department: Electrical Engineering

The objective of this work is to present the description of the main HVDC controllers applied to a practical implementation of a DC transmission link, to verify the effect of some modeling simplifications in HVDC representation and to show if it could affect significantly the results of the dynamic studies.

This work also intend to test the effect of different VCO models, mainly in case of large variations in short-circuit levels in the inverter side caused by multiple contingencies near HVDC links.

This work used as a comparison reference the HVDC system of FURNAS Centrais Eléctricas implemented in CEPEL's ANATEM program and previously validated to some contingencies in the FURNAS Electric System Simulator.

## PRINCIPAIS SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

CA	=	Corrente Alternada
CC	=	Corrente Contínua
CCAT	=	Corrente Contínua em Alta Tensão
CAAT	=	Corrente Alternada em Alta Tensão
$I_{0_{max}}$	=	Corrente de Ordem Máxima do Elo CCAT
$I_{0_{min}}$	=	Corrente de Ordem Mínima do Elo CCAT
Pmod	=	Modulação da Ordem de Potência
Iord	=	Ordem de Corrente do Controle de Bipolo do Elo CCAT
$V_{ref}$	=	Tensão de Referência
SCR	=	Relação de Curto-Circuito (Short Circuit Ratio)
CCC	=	Controle de Corrente Constante (Constant Current Control)
CEC	=	Controle do Erro de Corrente (Current Error Control)
VDCOL	=	Limitador da Ordem de Corrente Dependente da Tensão (Voltage Dependent Current Order Limiter)
AML	=	Limitador de Alfa Mínimo (Alpha-Minimum Limiter)
VCO	=	Oscilador Controlado a Tensão (Voltage Controlled Oscillator)
G(s)	=	Ganho da função de transferência

As variáveis a seguir se forem seguidas da letra “r”, referem-se a variáveis do retificador e, se forem seguidas da letra “i”, referem-se ao inversor.

$E$	=	Tensão CA (fase–fase) do Secundário do Transformador Ideal do Modelo do Transformador Conversor
$I_{ca}$	=	Corrente CA no Primário do Transformador Conversor
$I_d$	=	Corrente da Linha CC
$P_d$	=	Potência Ativa Transmitida pelo Elo CCAT
$Q_d$	=	Potência Reativa Consumida pelo Elo CCAT
$R_c$	=	Resistência de Comutação
$V_{ca}$	=	Tensão CA (fase–fase) do Primário do Transformador do Conversor
$V_d$	=	Tensão (média) CC do Conversor
$X_c$	=	Reatância de Dispersão do Transformador Conversor
$\alpha$	=	Ângulo de Disparo do Conversor
$\alpha_{max}$	=	Ângulo Máximo de Disparo do Conversor
$\alpha_{min}$	=	Ângulo Mínimo de Disparo do Conversor
$\gamma$	=	Ângulo de Extinção do Conversor
$\mu$	=	Ângulo de Comutação entre duas Válvulas
$I_0$	=	Ordem de corrente gerada pelo Controle de Bipolo
$\Delta\gamma$ (CEC)	=	Sinal adicional proveniente do CEC
$\gamma_{min}$	=	Ângulo mínimo de extinção do conversor

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Histórico .....	1
1.2	Motivação .....	4
1.3	Objetivo .....	9
1.4	Estrutura do Texto .....	9
<b>2</b>	<b>Conceitos Básicos sobre Elos em CCAT.....</b>	<b>11</b>
2.1	Principais Componentes de um Sistema CCAT .....	11
2.2	Equações dos Conversores.....	16
2.3	Característica Básica de Operação.....	21
2.4	Controle de Pontes Conversoras .....	23
<b>3</b>	<b>Modelo do Elo CCAT .....</b>	<b>31</b>
3.1	Introdução ao Comportamento Dinâmico dos Conversores .....	31
3.2	Hierarquia do Controle de Elos CCAT .....	32
3.3	Principais Componentes de um Sistema de Controle .....	35
3.4	Modelos de VCO Desenvolvidos .....	51
3.5	Conclusões do Capítulo 3 .....	55
<b>4</b>	<b>Análise do Desempenho Dinâmico do Elo CCAT.....</b>	<b>56</b>
4.1	Sistema CA/CC Analisado.....	56
4.2	Considerações Gerais Acerca dos Modelos de Elo CCAT Utilizados.....	60
4.3	Modelo 01 .....	61
4.4	Modelo 02.....	74
4.5	Modelo 03.....	86
4.6	Conclusões do Capítulo 4 .....	89
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>90</b>
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>92</b>
	<b>Apêndice A .....</b>	<b>94</b>
	Dados do Sistema Analisado .....	94
	<b>Apêndice B .....</b>	<b>100</b>
	Validação do Modelo Desenvolvido Frente ao Modelo “Built-in” do Programa ANATEM do CEPEL .....	100
	<b>Apêndice C .....</b>	<b>105</b>
	Cálculo do SCR .....	105
	<b>Apêndice D .....</b>	<b>108</b>
	Modelos de Elo CCAT Desenvolvidos.....	108

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas em CCAT têm sido integrados, com sucesso, a sistemas de transmissão em corrente alternada por mais de 40 anos. Devido à desregulamentação mundial dos sistemas de transmissão, esta tecnologia está se tornando cada vez mais importante para o futuro, devido ao controle rápido e efetivo de fluxo de potência entre sistemas distintos e ao bom desempenho do seu sistema de controle. Novos desenvolvimentos em tecnologia CCAT nos últimos anos permitiram soluções mais econômicas com benefícios técnicos adicionais. Este trabalho traça um panorama de descrição dos elementos de controle dos conversores implementados em projetos de CCAT. Adicionalmente, também são discutidas modificações na modelagem destes sistemas de controle e a sua influência no futuro dos sistemas CCAT.

### 1.1 HISTÓRICO

Com a chegada das lâmpadas elétricas nas residências e fábricas no final do século XIX, na Europa e na Ásia, a demanda por energia elétrica cresceu demasiadamente e os engenheiros precisavam encontrar rapidamente formas eficientes de geração e transmissão. Os pioneiros destas novas tecnologias já haviam feito alguns progressos tornando possível a transmissão de energia por uns poucos quilômetros. No entanto, dentro de pouco tempo a resposta para o crescimento da demanda foi encontrada: energia hidrelétrica.

Quase imediatamente, o interesse se voltou para encontrar formas de transmitir esta energia elétrica “barata” aos consumidores através de longas distâncias. Primeiramente em corrente contínua, depois em corrente alternada. As primeiras subestações da Europa e dos EUA supriam a demanda de energia elétrica em Corrente Contínua e baixa tensão.

No entanto, os sistemas de transmissão utilizados eram extremamente ineficientes. Esta ineficiência era ocasionada pela perda, nos cabos condutores, de grande parte da potência gerada. O sistema de transmissão em corrente alternada oferecia então eficiência muito melhor, uma vez que a energia podia ser facilmente transformada para tensões mais elevadas, com perdas muito menores.

## INTRODUÇÃO

---

Em 1893, a partir do início efetivo da utilização prática de sistemas em corrente alternada polifásicos em alta tensão, se tornou possível a transmissão de grandes blocos de potência através de longas distâncias e a transmissão em corrente contínua perdeu espaço. Entretanto, os engenheiros projetistas dos sistemas de transmissão CC nunca desistiram completamente da idéia do uso da corrente contínua.

Várias tentativas ainda foram feitas de forma a construir um sistema de transmissão CC em alta tensão. Um deles, implementado por Thury, contemplava geradores de corrente contínua ligados em série, uma linha de transmissão CC e, no terminal receptor, motores de corrente contínua também ligados em série. Tudo no mesmo circuito de transmissão. Esta tentativa apresentou bons resultados, porém não se mostrou comercialmente viável.

O sistema de transmissão em CCAT era então largamente utilizado, com a geração sendo possível a distâncias cada vez maiores em relação aos centros consumidores. Foram construídas linhas de transmissão aéreas longas onde a potência era transmitida a tensões cada vez maiores. Cabos submarinos foram desenvolvidos.

No entanto, em razão das aplicações em longa distância que começavam a surgir, os sistemas de transmissão existentes em corrente alternada passaram então a revelar os problemas característicos deste tipo de transmissão. Especificamente, problemas relacionados ao trânsito de potência reativa (controle de tensão) e à questão da estabilidade angular. Como resultado, os engenheiros de planejamento começaram, uma vez mais, a pensar na possibilidade de novas aplicações da transmissão em corrente contínua.

O principal motivo que impediu, desta vez, a afirmação da transmissão em corrente contínua em alta tensão foi a indisponibilidade de válvulas confiáveis e econômicas para a conversão CA / CC e vice-versa. As válvulas a arco de mercúrio ofereciam desta forma, e por um longo tempo, a mais promissora linha de pesquisa. A possibilidade de desenvolvimento de válvulas para tensões mais altas foi continuamente investigada e isto implicava no estudo de novos desenvolvimentos nos quais somente uma quantidade limitada de experiência técnica poderia ser aplicada.

Enquanto as máquinas elétricas e transformadores podiam ser projetados com muita precisão devido à ajuda das leis físicas matematicamente formuladas, o projeto

das válvulas a arco de mercúrio dependiam enormemente de conhecimentos adquiridos empiricamente.

Até mesmo quando os sistemas de transmissão em CCAT provaram que eram tecnicamente viáveis, permaneceu durante muito tempo a dúvida se eles poderiam competir economicamente com os sistemas em CAAT no mercado.

O primeiro link comercial em CCAT foi construído na Suécia em 1945, com 50 km. A partir daí, os fabricantes intensificaram o desenvolvimento de válvulas a arco de mercúrio, cabos CC para alta tensão, bem como iniciaram o desenvolvimento de projetos de outros componentes das estações conversoras, tais como: transformadores, reatores, chaves controladas e equipamentos de proteção e controle.

Desenvolvimentos contínuos nas válvulas a arco de mercúrio asseguraram um nível de confiabilidade tal que resultou em alguns projetos em CCAT estarem ainda em operação após 35 anos.

Os sistemas CCAT baseados em válvulas a arco de mercúrio percorreram um longo caminho em um curto período de tempo. No entanto, era uma tecnologia que ainda apresentava algumas fraquezas. Uma delas era a dificuldade de prever o próprio comportamento das válvulas. Como elas nem sempre poderiam absorver a tensão reversa, a ocorrência de arcos reversos era freqüente. Além disso, as válvulas requeriam manutenção regular. A necessidade de uma válvula que evitasse estes obstáculos era premente.

A invenção do tiristor em 1957 presenteou a indústria com uma gama enorme de possibilidades e a transmissão em CCAT logo passou a ser vista como uma promissora área de aplicação. Uma nova era estava para começar.

Com o advento das válvulas a tiristor foi possível simplificar as estações conversoras. Desde então os semicondutores têm sido amplamente utilizados nos sistemas em CCAT.

O consórcio ASEA-PROMON iniciou em 1979 a construção da interligação em CCAT de Itaipu, no Brasil. A interligação, com 6300 MW era considerada a maior interligação em CCAT (em potência e em comprimento) até então implementada. O projeto foi colocado em operação em vários estágios entre 1984 e 1987. O grau de

complexidade técnica do sistema de transmissão em CCAT de Itaipu representou um desafio considerável e pode ser considerado como o início da era moderna dos sistemas em CCAT.

## **1.2 MOTIVAÇÃO**

A validade dos estudos de simulação digital, realizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS e pelas empresas que atuam no setor, está diretamente relacionada à qualidade dos modelos e dados utilizados na representação dos diversos componentes do sistema. Em função de sua dimensão, localização e características de controle, o elo CCAT que transmite parte da potência dos geradores de 50 Hz da usina de Itaipu, tem requerido um cuidado especial sob o aspecto de modelagem em programas de estabilidade eletromecânica. Por este motivo, desde a fase de planejamento do sistema de transmissão em Corrente Contínua, os modelos dinâmicos para representação dos componentes desse sistema vêm sendo continuamente aperfeiçoados [1]. O grau de detalhamento destes modelos aumenta em função da necessidade dos grupos de estudos em analisar modos especiais de operação ou reproduzir emergências próximas ao elo CCAT que possam afetar o desempenho dinâmico do sistema elétrico. Em geral, estes modelos têm sido validados com base em resultados dos testes de comissionamento, resultados de análises de ocorrências ou de testes específicos no Simulador de Sistemas Elétricos existente em FURNAS.

Apesar dos esforços para melhorar a representação do sistema de transmissão em Corrente Contínua, em função das limitações inerentes de uma modelagem monofásica em programas de estabilidade eletromecânica, com inevitáveis simplificações na representação de alguns controles, nas simulações de alguns eventos corre-se o risco de não se conseguir reproduzir de forma adequada o seu comportamento. Entre as limitações existentes nos modelos de elo CCAT atuais pode-se destacar, a representação do “Voltage Controlled Oscillator – VCO”.

Diversos trabalhos acadêmicos já apresentaram modelos não-lineares de elos CCAT para a representação em programas de estabilidade eletromecânica convencionais [1,2], modelos lineares para estudos da estabilidade a pequenas perturbações [3] e projeto de controladores utilizando técnicas de controle ótimo [4].

Aik e Andersson [5] analisam o problema de estabilidade angular e de tensão a partir da determinação de índices de sensibilidade de tensão e de potência para três diferentes configurações de sistema CCAT e considerando diferentes características de carga. Definem também as características mais desfavoráveis no que diz respeito à degradação dos limites de estabilidade de tensão e de estabilidade. Associados aos índices acima referidos são definidos outros índices de sensibilidade de carga ativa (ALCI) e que permitem estimar limites para o efeito da característica de carga sobre a margem de estabilidade do sistema. Análise de resultados de simulação no tempo confirmaram os efeitos, determinados analiticamente a partir dos índices referidos, de mudanças na característica de carga sobre a estabilidade do sistema.

A referência [6] descreve um modelo matemático para a representação de sistemas de transmissão CCAT com incorporação da dinâmica dos controles dos conversores e da linha de corrente contínua. Dados disponíveis para a representação do sistema CA/CC de Itaipu são utilizados nos diversos casos de simulação descritos, com o objetivo de verificar o grau de influência dos parâmetros envolvidos.

A referência [7] ressalta a necessidade de pesquisa para firmar o conceito de estabilidade de tensão em redes elétricas CA contendo sistemas de transmissão em corrente contínua. Apresenta, então, metodologia para avaliação analítica das condições para ocorrência do fenômeno referido, de características não lineares, tanto considerando modelos básicos quanto modelos mais elaborados do sistema em corrente contínua. As seguintes informações resultam da aplicação da metodologia de análise: os parâmetros do sistema elétrico e de controle do elo CC que influenciam o comportamento não linear; se uma possível instabilidade oscilatória no sistema CCAT surge ou não como resultado do fenômeno de colapso de tensão; a relação entre as condições de regime permanente e de regime dinâmico que resulta em colapso de tensão de característica não oscilatória.

Jovcic e outros definiram em [8] um novo procedimento de modelagem trifásica de sistemas CC/CA em alta tensão com objetivo de permitir análise sob pequenos desvios das interações entre os sistemas de corrente contínua e de corrente alternada e de avaliar problemas potenciais associados às interações entre estes sistemas. Três subsistemas são explicitados na modelagem: o sistema CC, o sistema CA e o sistema de controle de disparo, este representado também em um referencial trifásico, para permitir

maior detalhamento de modelagem. Uma representação de referência é utilizada como sistema teste. Os resultados obtidos da simulação dos modelos obtidos mostraram boa concordância quando comparados com resultados obtidos usando os programas PSCAD/EMTDC no que diz respeito a todas as variáveis do sistema CC e do sistema CA.

A referência [9] apresenta metodologia para análise da estabilidade de sistemas CC/CA incorporando efeitos dinâmicos na modelagem do sistema CCAT. Com base nesta abordagem, o trabalho procura enfatizar os efeitos da exclusão desta dinâmica a partir da comparação com resultados de simulação obtidos com modelos de representação quasi-estática do sistema CCAT. O impacto de efeitos de representações comumente adotadas em livros e outras referências, como o modelo equivalente de Thevenin para fonte de tensão constante, pode ser avaliado.

Andersson e Smed [10] analisam o efeito de amortecimento das oscilações de baixa frequência dos sistemas CA/CC resultante da aplicação de sinais de modulação de potências ativa e de potência reativa aplicados sobre os controle de operação dos elos de transmissão em corrente contínua. Uma das conclusões resultantes da análise é que a modulação de potência é eficiente quando aplicada a uma pequena distância elétrica de uma das máquinas sob oscilação. Uma outra é que a modulação de potência reativa, por sua vez, é mais eficiente quando existe fluxo de potência ativa bem definido através do sistema e a modulação é aplicada em ponto próximo ao centro elétrico entre as máquinas sob oscilação. O impacto das restrições impostas pelas equações CCAT é analisado e é determinado quando a modulação de potência reativa resultando implicitamente do controle de gama constante pode ser prejudicial para o amortecimento.

Taylor e Hammad em relatório especial [11] de um Grupo de Trabalho do IEEE sobre controles especiais (ou suplementares) para estabilidade discutem a aplicação destes controles a sistemas de transmissão CCAT com o objetivo de promover melhoria no desempenho dinâmico dos sistemas elétricos de potência, uma vez que a controlabilidade de um elo CCAT é frequentemente citada como uma importante vantagem dos sistemas em corrente contínua. Esta controlabilidade pode ser de grande valor na melhoria do desempenho dinâmico de sistemas de potência de grande porte. Para alcançar estas vantagens, os sistemas de controle devem responder de forma apropriada para diversos distúrbios e condições de sistema, sem interação danosa com outros

controles de alto desempenho.

Adicionalmente, sistemas em CCAT podem contribuir para o colapso de tensão durante oscilações do sistema. Por exemplo, a demanda de reativos de um inversor, no modo de controle de ângulo de extinção constante, aumenta durante reduções no perfil de tensão do lado CA. O uso comum de capacitores shunt e filtros para o suprimento de potência reativa dos conversores podem também contribuir para a tendência ao colapso.

O trabalho descreve resultados de casos de simulação em que, para os elos CC existentes, foram utilizados controles para melhoria do desempenho dinâmico nos aspectos de regulação de potência reativa, de controle dinâmico da tensão CA nos terminais do elo, de amortecimento de oscilações de frequência com o conseqüente aumento da estabilidade transitória através da modulação da potência CC e, finalmente, de ação dos controles especiais durante condições de falta.

A regulação de potência reativa é implementada de forma que os terminais CC mantêm um determinado fluxo de potência reativa sob qualquer condição de carregamento do elo. O fluxo de potência reativa também pode ser utilizado para regular a tensão do terminal CA. Isto se dá pela combinação da capacidade de regulação de reativos dos conversores CC aliados aos filtros manobráveis de acordo com os níveis de carregamento CC.

O controle dinâmico da tensão CA em suas diferentes estratégias de controle pode mudar consideravelmente o desempenho de um elo CC o qual, por sua vez, pode influenciar sobremaneira o desempenho do sistema global em corrente alternada. Este tipo de controle previne a instabilidade de tensão pela operação com um ângulo gama maior que o mínimo.

No caso do elo CCAT de Itaipu, a modulação do gama inclui um ganho e um filtro passa faixa conectado em série e uma lógica “liga – desliga” que leva sua saída a zero quando o inversor assume o controle de corrente, ou quando a tensão CA no terminal do inversor cai abaixo de 0,70 pu. A saída do regulador, adicionada ao sinal do ângulo de extinção, é limitada entre 0 e 13 ° de forma que ele só contribui no semi-ciclo positivo das oscilações de tensão. É do conhecimento do autor da presente dissertação de mestrado que, entretanto, a aplicação deste sinal de modulação do ângulo gama se encontra atualmente desativada, uma vez que os ajustes implementados estavam

previstos para ação sobre modos eletromecânicos que não aparecem na configuração atual do sistema interligado brasileiro.

De um modo geral, para amortecimento das oscilações eletromecânicas locais e inter-área, controles suplementares podem ser utilizados para melhorar o desempenho transitório do elo CC e o desempenho dinâmico do sistema CA interligado.

Nos controles especiais que atuam para tensões muito baixas causadas por curto-circuitos, a medição de tensão é congelada em seu valor pré-falta por 2 segundos. Isto garante que a ordem de corrente CC não irá sofrer acréscimo durante o tempo necessário para o restabelecimento da tensão.

No elo CC de Itaipu, devido à baixa potência de curto-circuito no lado do inversor, o limitador de ordem de corrente dependente da tensão (VDCOL) se torna um elemento de controle essencial. Os ajustes na ordem de corrente dependem do comportamento transitório de ambos os sistemas CC e CA.

Hammad [12] demonstra que em esquemas de conversão CA/CC e de transmissão CCAT operando em paralelo com sistemas de transmissão em corrente alternada existe a possibilidade de ocorrência de problemas de instabilidade angular e de instabilidade de tensão, de forma que a tendência à instabilidade se mostra tanto maior quanto maior, relativamente, for a capacidade de transmissão do sistema CA.

É introduzido um novo conceito combinando os efeitos de estabilidade transitória de tensão de ângulo dos sistemas CC e CA em paralelo. Como base neste conceito é mostrado que quando o elo CC opera com controles tradicionais no modo potência constante, ele não contribui para aumento do conjugado sincronizante necessário para a operação estável do sistema CA no seguimento às perturbações, podendo, inclusive, aumentar o risco de instabilidade.

Em razão da reduzida capacidade de sobrecarga de curta e longa duração dos conversores CA/CC, não se deve aplicar modulação de potência ativa para estabilização de um sistema CA em paralelo utilizando as estratégias de controle convencionais. Desta forma, é mais conveniente a utilização de suporte de potência reativa de atuação rápida nos terminais do elo CC, de modo que o conceito permite desenvolver estratégias robustas para controlar a operação dinâmica dos sistemas CC e CA em paralelo. Com

tais estratégias, o elo CC pode participar positivamente da reprogramação instantânea da potência injetada de acordo com as condições distintas de sistema, particularmente durante condições de distúrbio.

### **1.3 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é apresentar a descrição dos principais controles do modelo de elo CCAT disponível na versão V09-08/99 do ANATEM e testar a influência de diferentes representações para o VCO, principalmente em situações de grande variação no nível de curto-circuito no lado inversor decorrente de emergências múltiplas próximas ao elo CC. Pretende-se também verificar a influência de algumas simplificações no controle do elo CCAT, de forma a observar se podem afetar significativamente os resultados dos estudos dinâmicos. Este trabalho tomou como referência para comparação o Sistema de Transmissão em CC de FURNAS implementado no ANATEM e previamente validado para algumas emergências no Simulador de Sistema Elétricos.

### **1.4 ESTRUTURA DO TEXTO**

Para cobrir todos os tópicos apresentados, o relatório do trabalho de tese foi dividido em cinco capítulos e três apêndices.

O capítulo 1 apresenta um breve histórico do desenvolvimento da tecnologia em transmissão em corrente contínua. Também são apresentados os principais aspectos da modelagem dos controles do elo já desenvolvidos e implementados, bem como as estratégias de utilização para o amortecimento de oscilações no sistema CA associado.

No capítulo 2 faz-se uma descrição dos conceitos básicos sobre elos CC com os seus principais componentes e características, destacando-se os pontos de maior relevância para os estudos de estabilidade.

No capítulo 3 é apresentado o modelo do elo CCAT desenvolvido na presente dissertação de mestrado, com considerações acerca de cada componente.

No capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações conduzidas

incluindo as análises de desempenho dinâmico.

O capítulo 5 contém as conclusões do trabalho. Também são apresentadas sugestões para futuros desenvolvimentos.

Finalmente, as referências bibliográficas utilizadas são apresentadas.

O apêndice A apresenta os dados utilizados no sistema analisado. O apêndice B, por sua vez, apresenta a validação do modelo completo de elo CCAT desenvolvido frente ao modelo “built-in” do programa ANATEM do CEPEL. O apêndice C descreve a relação de curto-circuito, SCR – “Short Circuit Ratio” e o Apêndice D apresenta a modelagem do elo CCAT segundo a sintaxe do programa ANATEM do CEPEL.

## 2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ELOS EM CCAT

As idéias e conceitos básicos apresentados neste capítulo já foram amplamente discutidos na literatura [13, 14, 15].

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos sobre elos CC, bem como são descritos os principais controles associados ao comportamento dinâmico dos conversores.

### 2.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA CCAT

A Figura 2.1 apresenta a configuração típica de um elo de corrente contínua. O modelo apresentado é monopolar e estão indicados somente os elementos relevantes na análise de estabilidade.

As barras do sistema CA onde estão conectados os conversores CA/CC são conhecidas como barras de interface ou mais comumente, como barras CA dos conversores.

Os filtros “shunt” associados às conversoras apresentam a função primordial de evitar que as correntes harmônicas geradas pelos conversores sejam propagadas para o sistema CA. Podem, adicionalmente, contribuir efetivamente para o suprimento de potência reativa necessária para a operação dos conversores.

Os transformadores conversores têm a função de compatibilizar a tensão do sistema CA com a tensão CA necessária para a correta operação da ponte CA/CC. A tensão CC, por sua vez, pode ser controlada através da variação dos seus tapes, em conjunto com a ação de ajuste do ângulo de disparo das válvulas conversoras.

A válvula conversora é constituída por uma ponte de Graetz que, em outras palavras é uma ponte trifásica de onda completa de 6 pulsos. De forma a minimizar a injeção de harmônicos no sistema CA, faz-se uma associação série de pontes de 6 pulsos, formando uma ponte de 12 pulsos. Com o mesmo objetivo, as ligações dos enrolamentos secundários dos transformadores são efetuadas de forma a defasar de  $30^\circ$  a tensão CA de uma ponte de 6 pulsos em relação à outra.

O reator de alisamento tem o objetivo de minimizar a "ondulação" na corrente da linha CC, de forma a, simultaneamente, reduzir a ondulação na tensão CC após o reator. O valor médio da tensão CC pode ser considerado o mesmo, antes ou após o reator.

A presença das indutâncias longitudinais características da transmissão CA ou de transformadores/geradores nos lados de corrente alternada dos conversores evita que as comutações de corrente de uma para a outra válvula nos mesmos se faça de forma excessivamente rápida. O período de tempo que uma válvula utiliza no processo de comutação pode ser medido através do ângulo de comutação ( $\mu_r$ ). Este ângulo no retificador, em conjunto com o ângulo de atraso de disparo ( $\alpha$ ) contribuem na definição do ângulo de fator de potência e no consumo de reativo deste conversor. Da mesma forma, o fator de potência e a exigência de potência reativa por parte do conversor, operando no modo inversor, são determinados pelo ângulo de atraso de comutação ( $\mu_i$ ) e pelo ângulo de avanço de extinção ( $\gamma$ ). A absorção de potência reativa pode ser controlada pela limitação nos ângulos máximos de disparo do retificador e de extinção do inversor.

As formas de onda da corrente e da tensão (fase-neutro) do lado CA de um conversor de 6 pulsos são indicadas na Figura 2.2.

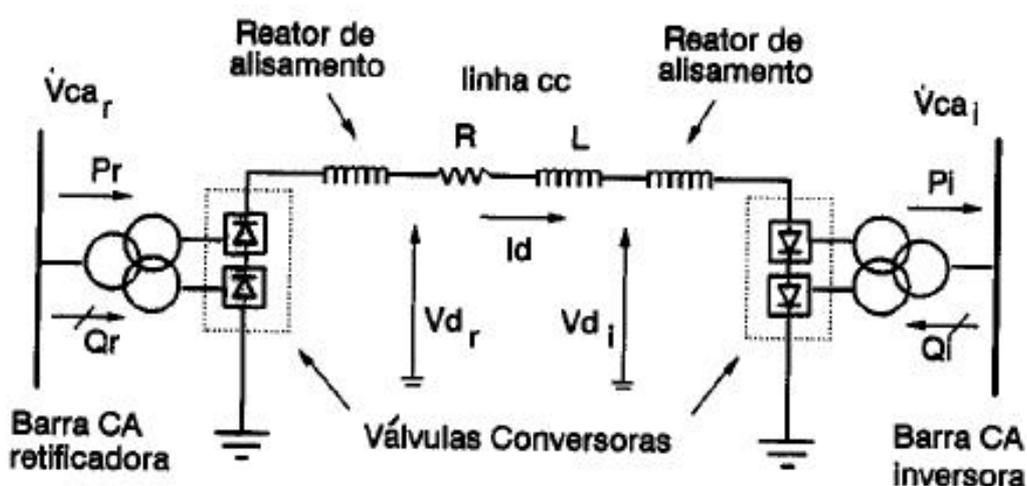
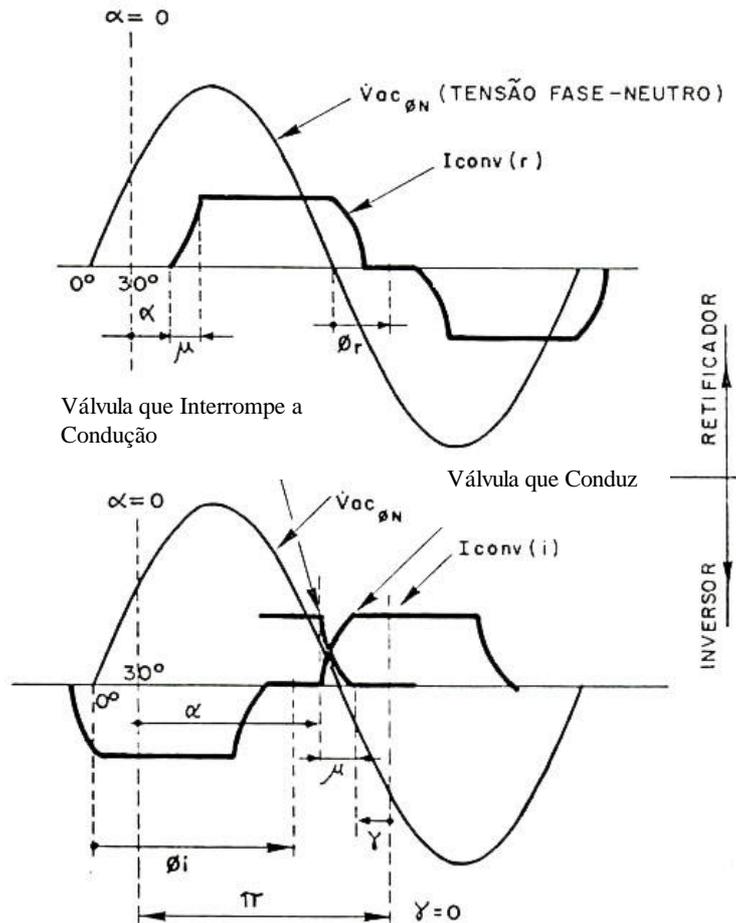


Figura 2.1 – Diagrama Unifilar da Configuração Típica de um Elo CC

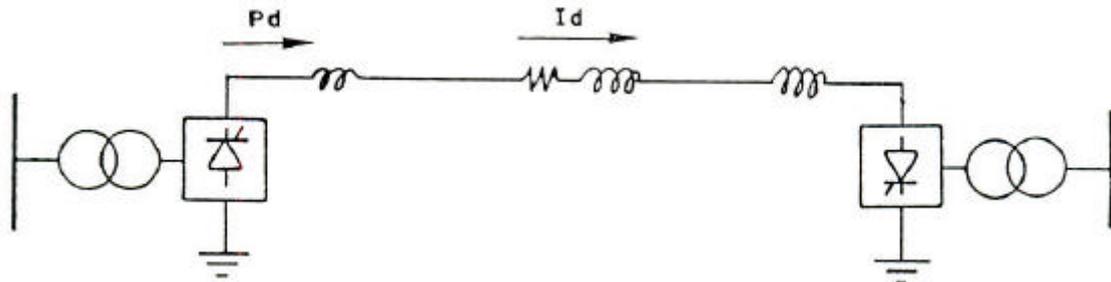


**Figura 2.2** – Formas de Onda da Tensão e Corrente CA dos Conversores

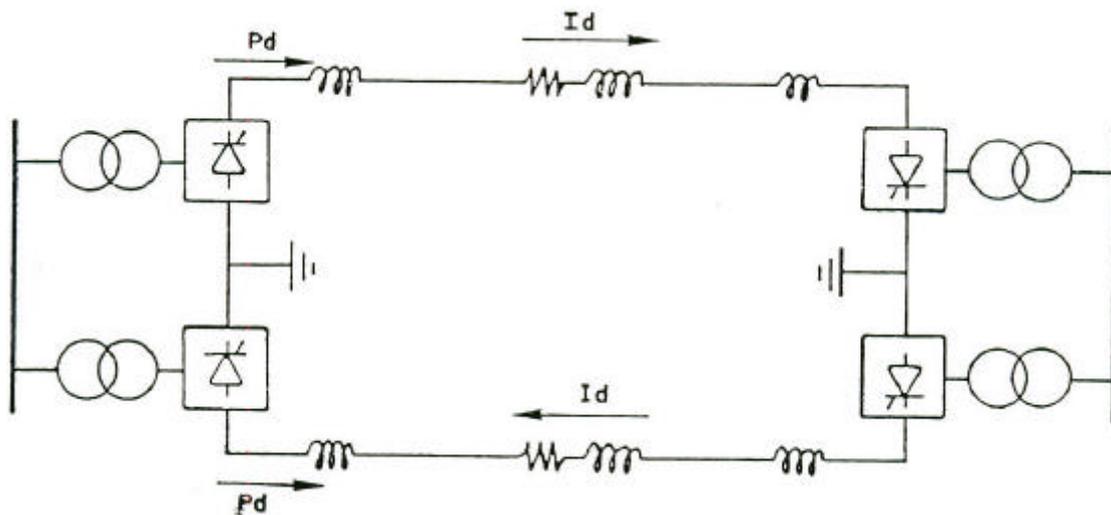
As configurações possíveis para a transmissão ponto-a-ponto em CCAT são a monopolar ou a bipolar. O esquema básico de transmissão monopolar é apresentado na Figura 2.3 e utiliza apenas um condutor como linha de transmissão, com o circuito elétrico sendo completado através do solo. Pode ser citado como desvantagem deste esquema de transmissão a possível presença de correntes elevadas através do solo, o que pode acelerar sobremaneira o processo de corrosão de pé de torre, tubulações e outros equipamentos situados ao longo da transmissão, entre outros efeitos.

O esquema básico de transmissão bipolar é apresentado, por sua vez, na Figura

2.4. A transmissão é realizada por dois condutores, não havendo, em condições ideais equilibradas de regime permanente, corrente sendo transmitida pelo solo. Este esquema é equivalente à composição de dois pólos de transmissão.



**Figura 2.3** – Diagrama do Esquema de Transmissão Monopolar



**Figura 2.4** – Diagrama do Esquema de Transmissão Bipolar

Os conversores de um elo CCAT também podem ser constituídos por uma associação série de pontes de 12 pulsos. Esta associação possibilita a obtenção de níveis de tensão mais elevados na linha CC, porém, o efeito mais importante é o de redução no conteúdo harmônico das correntes injetadas no sistema de transmissão CA. Em um estudo de estabilidade não há necessidade de representar individualmente os conversores. Supondo existir uma uniformidade de componentes e de controles, pode ser

utilizado um único conversor equivalente no lugar do conjunto [2].

O conversor equivalente é constituído também por um transformador equivalente, resultante da composição paralela dos transformadores individuais. Apesar da reatância de curto-circuito do transformador equivalente ser “n” vezes menor que a de cada transformador, sendo “n” o número de transformadores originais, esta reatância em pu é numericamente igual a da configuração individualizada, quando ambas são expressas em suas respectivas bases nominais de potência [2].

Levando-se em conta a simetria dos dois pólos componentes de um bipolo, em estudos de estabilidade também pode ser utilizado um monopolo equivalente em lugar de um sistema bipolar [2]. Este monopolo equivalente é uma extensão do conversor equivalente e pode ser representado conforme é ilustrado pela Figura 2.5, a seguir:

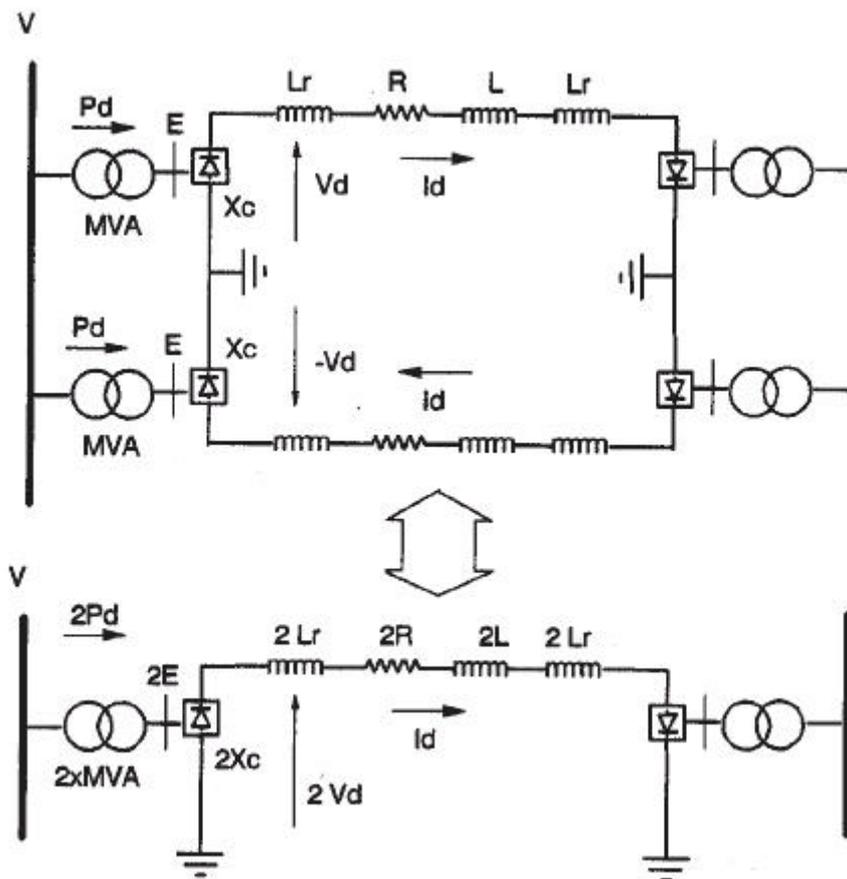


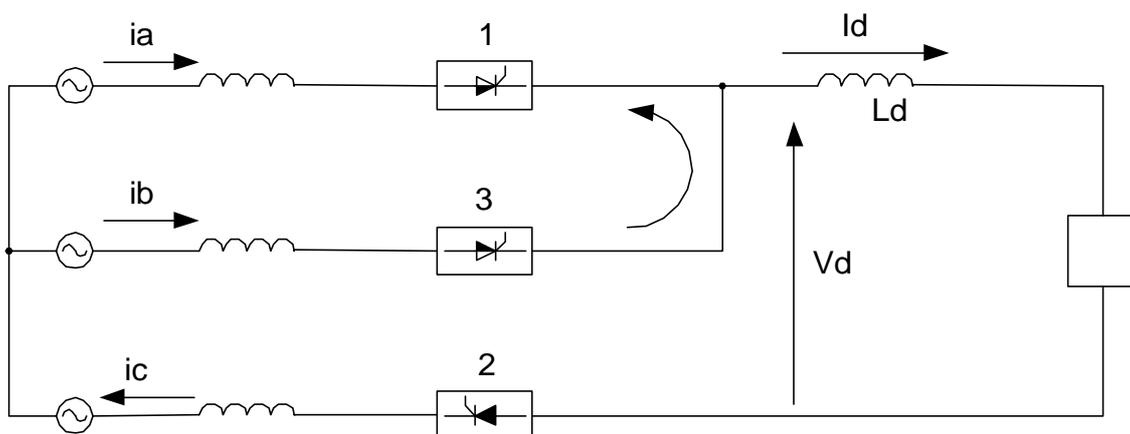
Figura 2.5 – Diagrama do Monopolo Equivalente

## 2.2 EQUAÇÕES DOS CONVERSORES

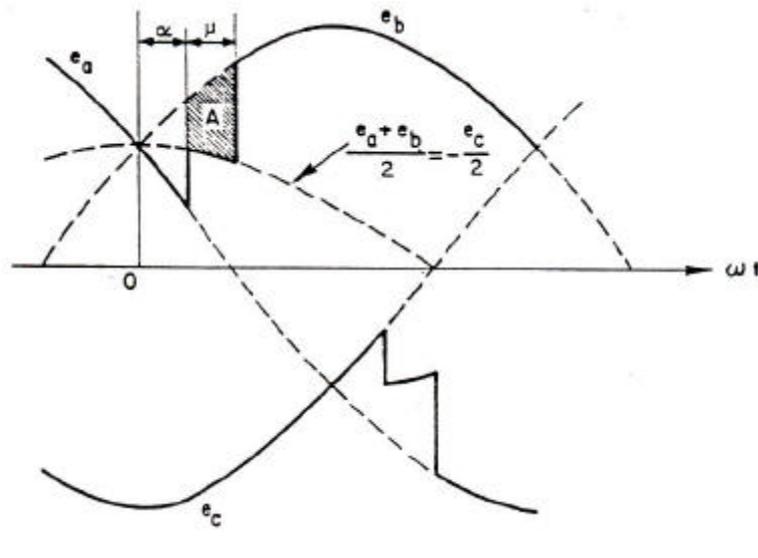
O desenvolvimento das equações de regime permanente para os conversores do elo CC pode ser encontrado em vasta literatura [13, 18 e 19], assim como em outras teses de mestrado, publicadas nesta instituição (COPPE/UFRJ) [1, 2, 3 e 4]. Desta forma, as equações serão apresentadas sumariamente.

### 2.2.1 RETIFICADOR

O circuito da Figura 2.6 representa a ponte, durante a comutação de corrente entre as válvulas 1 e 3, estando a válvula 2 conduzindo. Pode-se notar que durante a comutação há a ocorrência de um curto-circuito entre as fases que estão comutando, de forma que a tensão resultante do lado CC medida no referencial do neutro do secundário do transformador do conversor é igual à média aritmética das tensões das fases envolvidas na comutação. O efeito da comutação é reduzir a tensão média da ponte, conforme mostra a Figura 2.7, através da área “A” [4].



**Figura 2.6** – Circuito de Comutação durante a Condução Simultânea das Válvulas 1 e 3



**Figura 2.7** – Efeitos da Comutação

Integrando-se a forma da onda da tensão CC na saída do conversor, chega-se à expressão (exata) da tensão média CC ( $V_{d_r}$ ):

$$V_{d_r} = \frac{3\sqrt{2} R_{esp} V_{ac_r}}{\pi} \cdot \frac{\cos(\alpha) + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (2.1)$$

Onde  $R_{esp}$  é identificada como a relação de espiras entre o primário e o secundário e  $V_{ac_r}$  é a tensão CA do lado do retificador.

Esta equação é válida para a conversora operando em regime permanente com condução alternada de duas e três válvulas, ou seja, para ângulos de comutação inferiores a 60 graus.

Por outro lado, pode-se escrever a equação (2.1) em função da reatância de comutação e da corrente retificada, ou seja:

$$V_{d_r} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot R_{esp} V_{ac_r} \cos(\alpha) - \frac{3}{\pi} \cdot X_{c_r} I_{dr} \quad (2.2)$$

Esta é a chamada equação característica do retificador. Na dedução desta equação supõe-se que não existe "ondulação" na corrente CC ( $I_d$ ). A reatância  $X_{c_r}$  é identificada como reatância do transformador conversor,

Por uma questão de simplificação, pode-se definir a relação:

$$E_r = R_{\text{esp}} V_{ac_r} \quad (2.2-a)$$

Explicitando-se o ângulo de comutação  $\mu$  nas equações (2.1) e (2.2), pode-se obter a expressão para o ângulo de comutação:

$$\mu = \cos^{-1} \left( \cos \alpha - \frac{2X_{c_r} I_{dr}}{\sqrt{2} E_r} \right) - \alpha \quad (2.3)$$

Uma expressão útil para a análise do fenômeno da comutação entre os conversores é dada por

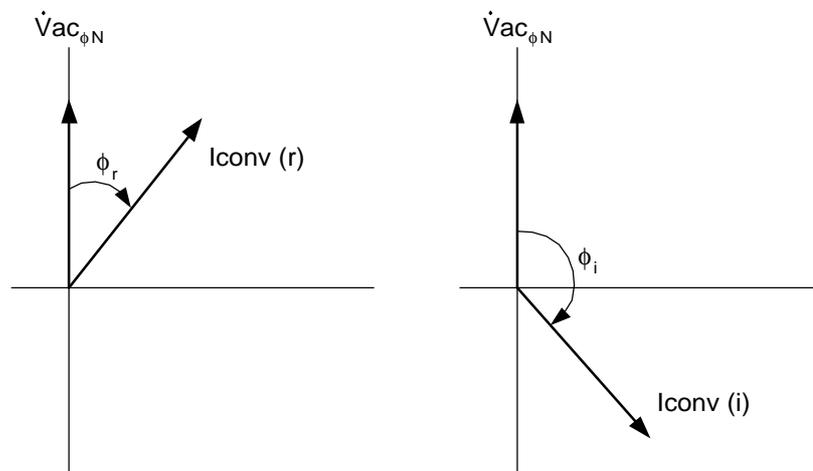
$$\cos(\alpha + \mu) = \cos(\alpha) - \frac{2 X_{c_r} I_d}{\sqrt{2} E_r} \quad (2.3-a)$$

Do ponto de vista do sistema CA, é necessário determinar a injeção ou absorção de potência ativa e reativa pelo conversor CA/CC. Desta forma, tem-se que:

A corrente CC, é dada por:

$$I_{d_r} = \frac{E_r}{\sqrt{2} X_{c_r}} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (2.4)$$

A Figura 2.8 mostra o diagrama fasorial da tensão  $V_{ac_{\phi-N}}$  e das correntes nos conversores. São apresentados os ângulos  $\phi_r$  (entre a tensão  $V_{ac_r}$  e a corrente no retificador) e  $\phi_i$  (entre a tensão  $V_{ac_i}$  e a corrente no inversor)



**Figura 2.8** – Diagrama Fasorial dos Conversores

Uma aproximação válida para a determinação do fator de potência para o lado do sistema CA pode ser efetuada igualando-se as potências CC e CA no conversor, o que resulta em:

$$\cos \phi_r = \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)] \quad (2.5)$$

Desta forma, a potência reativa consumida pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$Q_{\text{ret}} = P d_r \cdot \text{tg} \phi_r \quad (2.6)$$

### 2.2.2 INVERSOR

Considerando que a ponte conversora permite apenas corrente unidirecional, a ponte conversora operando no modo inversor deve ter a polaridade de seus terminais CC invertidas quando forem ligadas à linha de corrente contínua mono ou bipolar.

Todas as equações para o retificador também são válidas para o inversor desde que se substitua  $\alpha$  por  $\gamma$  e se inverta o sinal da expressão obtida. Como, em adição, o retificador e o inversor têm a mesma referência de potencial (terra) e se procede a inversão física de polaridade dos terminais CC deste conversor, a expressão da tensão média CC volta a ter o mesmo sinal da equação (2.1).

$$V d_i = \frac{3\sqrt{2} E_i \cdot \cos(\mathbf{g}) + \cos(\mathbf{g} + \mathbf{m})}{\mathbf{p}} \quad (2.7)$$

É mais conveniente para análise da operação do inversor que as equações para o inversor sejam expressas em função do ângulo de extinção gama ( $\gamma$ ). Pela Figura 2.2, pode-se depreender que:

$$\alpha + \mu = \pi - \gamma \quad (2.8)$$

A partir desta relação, outras duas podem ser deduzidas, quais sejam:

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos(\pi - \gamma) = -\cos(\gamma) \quad (2.9)$$

$$\cos \alpha = \cos[\pi - (\gamma + \mu)] = -\cos(\gamma + \mu) \quad (2.10)$$

Aplicando as equações (2.9) e (2.10) na equação (2.3-a), tem-se que:

$$\cos(\gamma + \mu) = \cos(\gamma) - \frac{2 X_{c_i} Id}{\sqrt{2} E_i} \quad (2.10-a)$$

Substituindo ainda as equações (2.9) e (2.10) na equação (2.7), a tensão média CC no inversor é agora dada por:

$$Vd_i = \frac{3\sqrt{2} E_i}{P} \cdot \frac{\cos(\mathbf{g}) + \cos(\mathbf{g} + \mathbf{m})}{2} \quad (2.11)$$

Pela análise das equações acima pode-se observar que a forma geral é a mesma, tanto para o retificador quanto para o inversor. A diferença é que na expressão da tensão CC do retificador é utilizado o ângulo de disparo alfa, ao passo que na expressão da tensão CC do inversor o ângulo utilizado é o de extinção gama.

A equação (2.11) também pode ser reescrita em função de  $Id_i$  e  $X_{c_i}$ . Desta forma, a tensão média CC para o inversor também pode ser dada por:

$$Vd_i = \left( \frac{3\sqrt{2}}{P} \cdot E_i \cos(\mathbf{b}) + \frac{3}{P} \cdot X_{c_i} Id_i \right) \quad (2.12)$$

Onde o ângulo  $\beta$ , que é denominado ângulo de avanço de disparo, é definido por:

$$\beta = \gamma + \mu \quad (2.13)$$

A corrente CC no inversor será então dada por:

$$Id_i = \frac{E_i}{\sqrt{2} X_{c_i}} [\cos \gamma - \cos(\gamma + \mu)] \quad (2.14)$$

O fator de potência para o lado CA do inversor é dado por:

$$\cos \phi_i = \frac{1}{2} [\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu)] \quad (2.15)$$

A potência reativa consumida pela ponte inversora será:

$$Q_{inv} = Pd_i \cdot \text{tg}\phi_i \quad (2.16)$$

As potências ativas consumida pelo retificador e fornecida pelo inversor, em função da tensão média e da corrente na linha CC, podem ser descritas como:

$$Pd_r = V_{dr} \cdot I_{dr} \quad (2.17)$$

$$Pd_i = V_{di} \cdot I_{di} \quad (2.18)$$

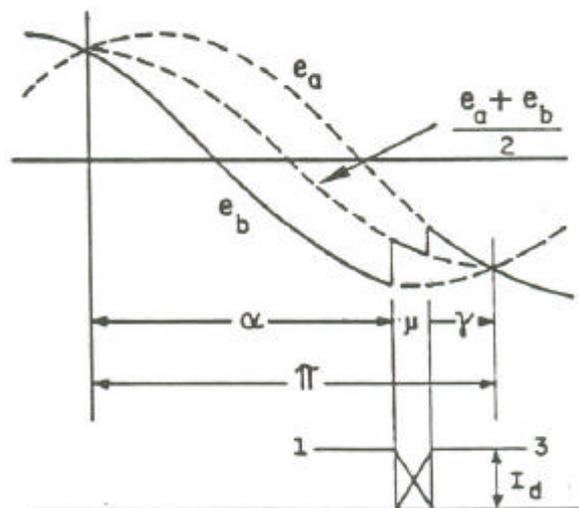
Com o elo CCAT operando em regime permanente, a corrente  $I_d$  é dada por:

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d} \quad (2.19)$$

Onde  $V_{dr}$  e  $V_{di}$  são obtidos pelas equações (2.1) e (2.7) e  $R_d$  é a resistência da linha CC.

### 2.3 CARACTERÍSTICA BÁSICA DE OPERAÇÃO

Na Figura 2.9, está representada a variação da tensão média CC, em função do ângulo de disparo  $\alpha$ . Cabe ressaltar que, o efeito do aumento do ângulo de disparo é o de reduzir o valor médio da tensão CC, levando-a a zero quando  $\alpha$  for igual a  $90^\circ$  quando o conversor opera a circuito aberto. Nestas condições, quando o ângulo de disparo for maior que  $90^\circ$ , o valor médio da tensão CC se tornará negativo, condição necessária para a operação como inversor.



**Figura 2.9** – Detalhe da Comutação do Conversor para Operação como Inversor

Pela análise da Figura 2.9 resulta a seguinte relação:

$$\alpha + \mu + \gamma = 180^\circ \quad (2.20)$$

Não por acaso, é a mesma relação apresentada em (2.8).

O retificador, com apoio do controle de  $\alpha$ , converte potência CA em CC, transmitindo corrente pela linha, para o terminal inversor. Este opera sempre com ângulos de disparo maiores que  $90^\circ$ , o que resulta numa tensão de operação ( $V_{di}$ ) negativa. Como os tiristores só permitem condução de corrente em um único sentido, o significado físico de se forçar corrente num terminal com tensão negativa e que haverá reversão de potência, ou seja, conversão de potência CC para CA, uma vez que a corrente circulará na ponte em sentido contrário à tensão CC retificada do conversor operando no modo inversor.

Num sistema de transmissão em CC, a corrente na linha depende da diferença de tensão CC entre os dois terminais conversores retificador e inversor. Estas tensões, por sua vez, dependem das tensões CA, reatâncias dos transformadores dos conversores (reatâncias de comutação), posição dos tapes e ângulos de disparo ( $\alpha$ ) das válvulas, como indicado nas equações (2.2) e (2.7) [4]. As tensões referidas são quase iguais em razão da queda de tensão resistiva e pequena ao longo de cada um dos pólos da transmissão CC e da corrente CC, esta controlada pelo sistema de controle de corrente constante. Este controle de corrente pode ser realizado em qualquer dos conversores, mas normalmente está ativo no conversor operando no modo retificador. As indutâncias dos reatores de alisamento também contribuem para o efetivo controle da corrente CC, reduzindo suas variações e, portanto, permitindo mais tempo para a ação dos controladores de corrente constante dos conversores.

Em operação normal, tanto o ângulo de disparo do conversor operando no modo retificador quanto o ângulo de extinção do conversor operando no modo inversor são fixados nos valores menores possíveis, resultando em amplitudes o mais elevadas possíveis para a tensão CC e, em consequência em redução nos níveis de consumo de potência reativa no lado CA de ambos os conversores.

Considerando que as tensões CA impostas pelos sistemas de corrente alternada ligados aos conversores variam em decorrência de qualquer perturbação em um destes

sistemas, as únicas variáveis que possibilitam controle efetivo do fluxo de potência (ou corrente) através do elo CCAT são os taps dos transformadores e os ângulos de disparo das válvulas. Os taps de transformadores são de atuação muito lenta (algo em torno de 10 segundos). Este é o motivo pelo qual os taps são considerados fixos em estudos de estabilidade [2].

Existe um valor mínimo para o ângulo de extinção ( $\gamma$ ), de forma que os tiristores do conversor operando no modo inversor assegure comutação perfeita. Este ângulo  $\gamma_{\min}$ , corresponde ao intervalo de tempo necessário para ocorrer a recuperação da capacidade de bloqueio da válvula que está deixando de conduzir. Caso a capacidade de interromper corrente no sentido direto não esteja restabelecida, a válvula retomará a condução, por um período maior que  $120^\circ$ . Esta condição caracteriza uma falha de comutação.

O retificador opera, de uma forma geral, controlando a corrente na linha CC em um valor pré-fixado, enquanto que o inversor, que é responsável pela manutenção do nível de tensão CC na transmissão de potência, pode operar, por exemplo, no modo ângulo de extinção constante.

A possibilidade de controlar rapidamente a corrente transmitida pelo elo, e conseqüentemente a potência, permite ao sistema CCAT contribuir de maneira eficaz para a manutenção da estabilidade transitória do sistema CA.

## **2.4 CONTROLE DE PONTES CONVERSORAS**

A filosofia de controle adotada atualmente baseia-se, normalmente, no método da margem de corrente que compreende basicamente dois modos de operação, o normal e o reduzido. No modo normal de operação, o inversor é controlado para manter seu ângulo de extinção ( $\gamma$ ) no mínimo valor necessário para uma comutação segura. Basicamente a tensão da linha é ajustada pelo inversor, sendo este ajuste efetuado pelos comutadores sob-carga dos transformadores da conversora do inversor, uma vez que  $\gamma$  se manterá em  $\gamma_{\min}$ .

A corrente no elo é controlada pelo retificador, através de um sistema de controle de corrente em malha fechada. Neste tipo de controle, a corrente de linha é

comparada com uma corrente de referência, a corrente de ordem, e quando houver uma diferença entre corrente de linha e de ordem, este erro de corrente será amplificado e agirá como excitação para o controle de ângulo de disparo, ajustando o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de maneira que a tensão da ponte retificadora atinja o valor necessário para manter a corrente desejada na operação.

Enquanto não se atingir os limites de ângulo de disparo mínimo ou máximo esta filosofia de controle atribui ao retificador o controle de corrente. Para quedas acentuadas de tensão do lado do retificador, o limite inferior é alcançado com facilidade e o controle de corrente passa a ser realizado pelo inversor através da elevação do ângulo de extinção  $\gamma$ .

Uma vez que é desejável uma geração de harmônicos mínima e um baixo consumo de reativos, também na ponte retificadora os taps dos transformadores atuam no sentido de manter o ângulo de disparo em torno de um valor ótimo de operação.

A característica estática mais utilizada para visualizar a maneira pela qual retificador e inversor atuam interligados é a que fornece no eixo das ordenadas a tensão ( $V_d$ ), e no eixo das abscissas a corrente ( $I_d$ ). Cabe ressaltar que faz-se necessário que a tensão e corrente estejam referenciadas a um mesmo ponto na linha CC.

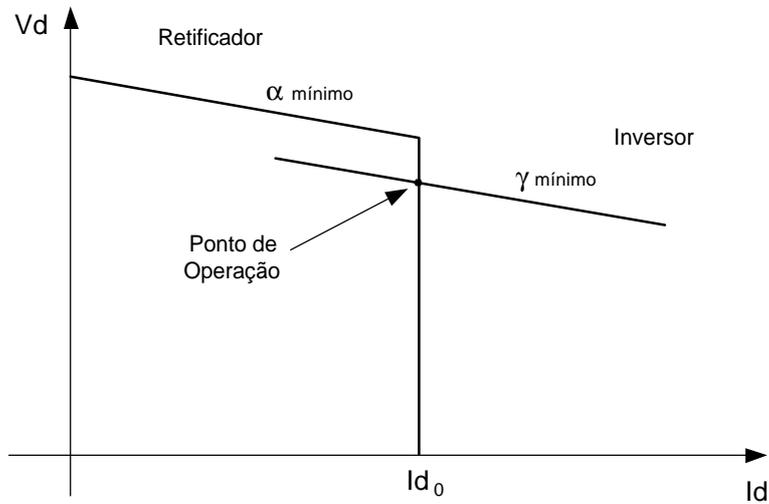
A característica estática  $V_d$ - $I_d$  é um instrumento útil para análise de regime permanente do elo CCAT. Este gráfico expressa todos os pontos possíveis para a operação do elo CCAT em regime. A sua construção baseia-se na aplicação das equações características (2.2) e (2.12), em conjunto com a atuação dos controles dos conversores.

Por conveniência, escolhe-se um mesmo ponto para o levantamento das duas características estáticas do retificador e do inversor. Pode-se adotar, por exemplo, a barra CC do conversor inversor como referência comum. Por esta razão, incorpora-se a resistência de linha CC ( $R_d$ ) à equação do retificador (2.2), que passa a ser:

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot E_r \cos(\alpha) - \left(\frac{3}{\pi} \cdot X_{cr} + R_d\right) I_{dr} \quad (2.21)$$

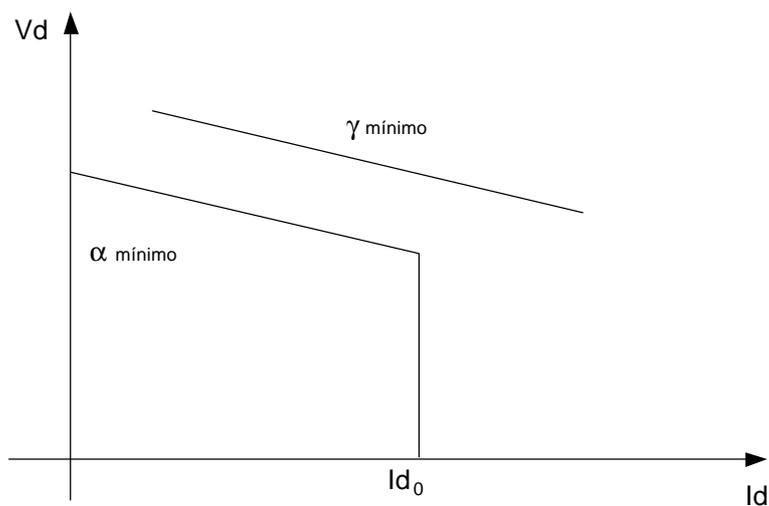
A Figura 2.10 mostra uma característica estática simplificada, considerando a

existência de  $\alpha$  e  $\gamma$  mínimos. O ponto de operação normal representado na figura é a interseção dos segmentos de reta.



**Figura 2.10** – Característica Estática de Operação

Quando a tensão CA do lado inversor subitamente atinge valores maiores que a tensão CA do lado retificador, o controle do retificador atua no sentido de diminuir o ângulo de disparo  $\alpha$  e de manter a corrente de ordem. No entanto, caso o ângulo  $\alpha$  atinja seu valor mínimo e a tensão CC do inversor continue maior do que a do retificador, a corrente, e portanto a potência transmitida, cairá a zero, pois não haverá ponto de operação possível. A Figura 2.11 exemplifica esta condição.

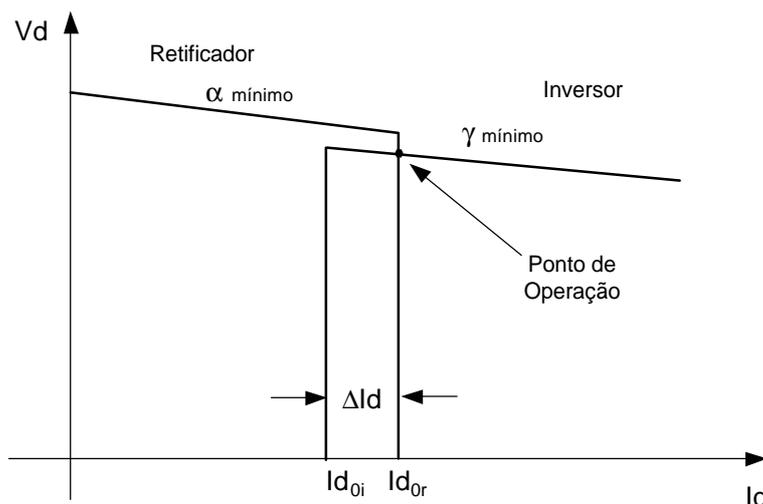


**Figura 2.11** – Condição em que Não Existe Ponto de Operação

De maneira a evitar esta condição, o inversor é equipado com um controlador de

corrente idêntico ao do retificador. No entanto, o controle do inversor tem a sua corrente de ordem ajustada para um valor mais baixo, de forma que, na operação normal, este controlador não atua. A diferença entre as ordens de corrente no retificador e inversor é denominada margem de corrente e situa-se normalmente em torno de 10% da corrente nominal da linha.

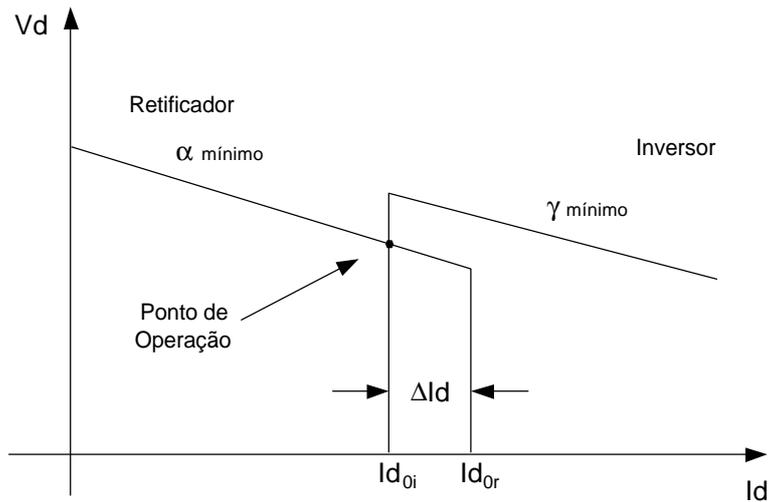
Figura 2.12 mostra a característica estática para o modo de operação normal.



**Figura 2.12** – Característica Estática de Operação – Modo Normal

Em determinadas condições desfavoráveis do sistema, o ângulo de disparo  $\alpha$  do retificador pode ser levado ao valor mínimo pelo controle. Isto indica que há necessidade de se aumentar ainda mais a tensão CC do retificador para manter a corrente constante. Quando o ângulo alfa do retificador fica preso no valor mínimo, a resposta natural do elo CCAT é ter a sua corrente diminuída. Ao cair abaixo do valor de ordem de corrente do inversor, o controle deste atuará no ângulo de disparo do inversor e, conseqüentemente no respectivo ângulo de extinção ( $\gamma$ ). A tensão CC será diminuída, através do aumento de gama, mantendo assim a diferença de potencial necessária para a transmissão desejada.

Neste novo modo de operação do elo CCAT, conhecido como modo de operação de tensão reduzida, tem-se o inversor controlando a corrente enquanto o retificador é mantido em seu ângulo mínimo de disparo ( $\alpha_{\min}$ ). A Figura 2.13 exemplifica este modo de operação na característica estática.



**Figura 2.13** – Característica Estática de Operação – Modo de Tensão Reduzida

A título de visualização, vamos considerar a soma da reatância de comutação do conversor, essencialmente a reatância do transformador, com a reatância equivalente do sistema CA visto pela conversora, de forma que:

$$X_c = X_t + X_s \quad (2.22)$$

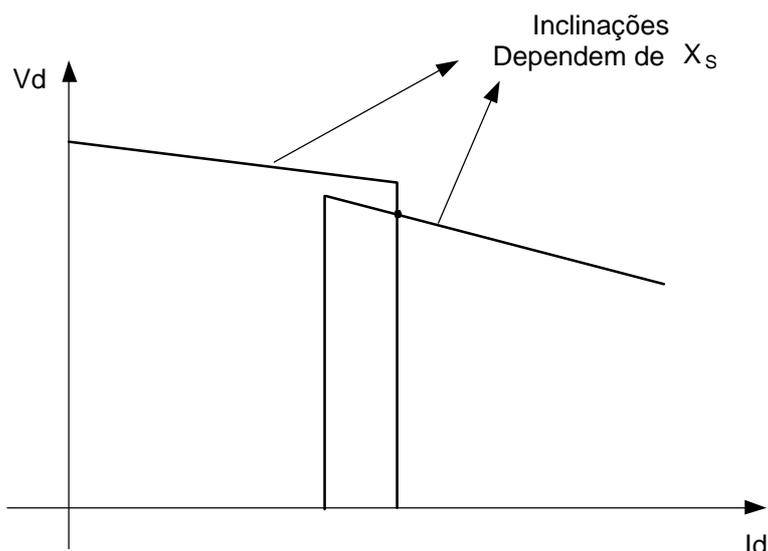
Onde:  $X_c$  → Reatância de Comutação

$X_t$  → Reatância do Transformador

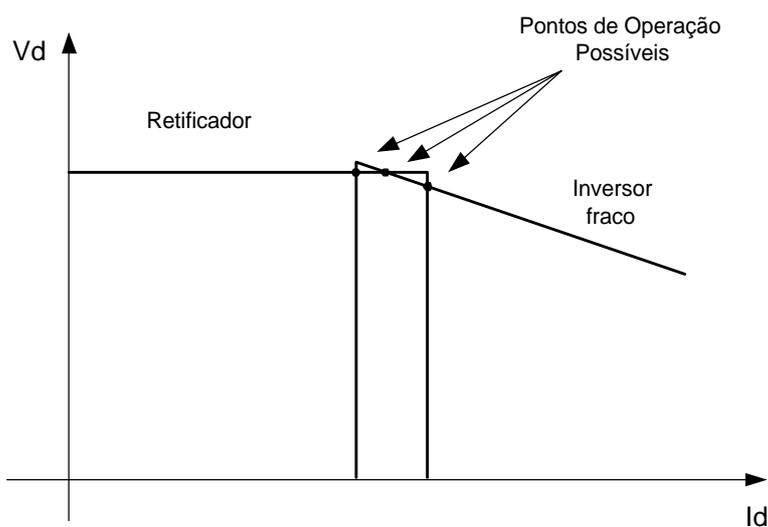
$X_s$  → Reatância equivalente do sistema CA

Nesta composição deve-se aplicar um fator de ponderação à reatância equivalente do sistema, de forma a se considerar que a queda de tensão no lado CA ocorre em função da corrente livre de harmônicos, ou seja, na frequência fundamental.

Uma vez que as inclinações nas características dos conversores dependem desta reatância, poderá ocorrer a situação em que o sistema CA do lado do inversor apresente um alto valor de  $X_s$ , caracterizando um sistema fraco. Desta forma, passam a existir três pontos de operação possíveis. A experiência adquirida na operação de elos CCAT mostrou que o sistema CC fica oscilando entre os três pontos de operação sem que se possa estabilizá-lo. As Figuras 2.14 e 2.15 exemplificam tal situação.



**Figura 2.14** – Dependência das Inclinações da Curva Característica com  $X_s$



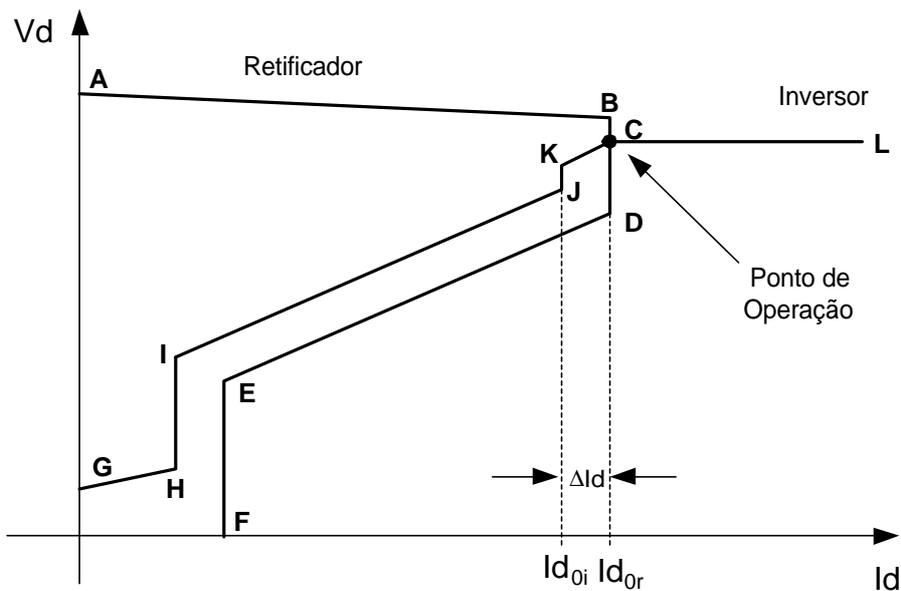
**Figura 2.15** – Condição da Instabilidade dos Três Pontos

As características estáticas apresentadas são passíveis de alterações constantes, uma vez que novos modos de controle são adicionados ao elo de acordo com a experiência acumulada. Novas implementações foram incorporadas ao controle, tais como o VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limiter), o CEC (Current Error Control), o AML (Alpha Min Limiter), etc., como será visto mais adiante. Apesar destas implementações não serem padronizadas, a característica estática de um controle real

tem basicamente a forma da Figura 2.16.

Cada segmento da característica estática completa é o resultado da ação de um determinado elemento de controle, cuja atuação está limitada a uma faixa de operação pré-definida.

Os principais elementos de controle que influenciam a característica estática serão objeto de análise detalhada, a ser descrita no próximo capítulo.



**Figura 2.16** – Característica Estática Completa

O Cruzamento do segmento BCD com o segmento CG caracteriza o Modo Normal de Operação, no qual o controle de corrente é assumido pelo retificador. O inversor mantém o ângulo de extinção  $\gamma$  no valor mínimo, representado pelo segmento CG. A corrente na linha CC não sofre alterações pelo controle do pólo. Em condições ideais, o ponto de operação do elo CCAT deve situar-se em torno do ponto C, próximo ao limite máximo da tensão CC [2].

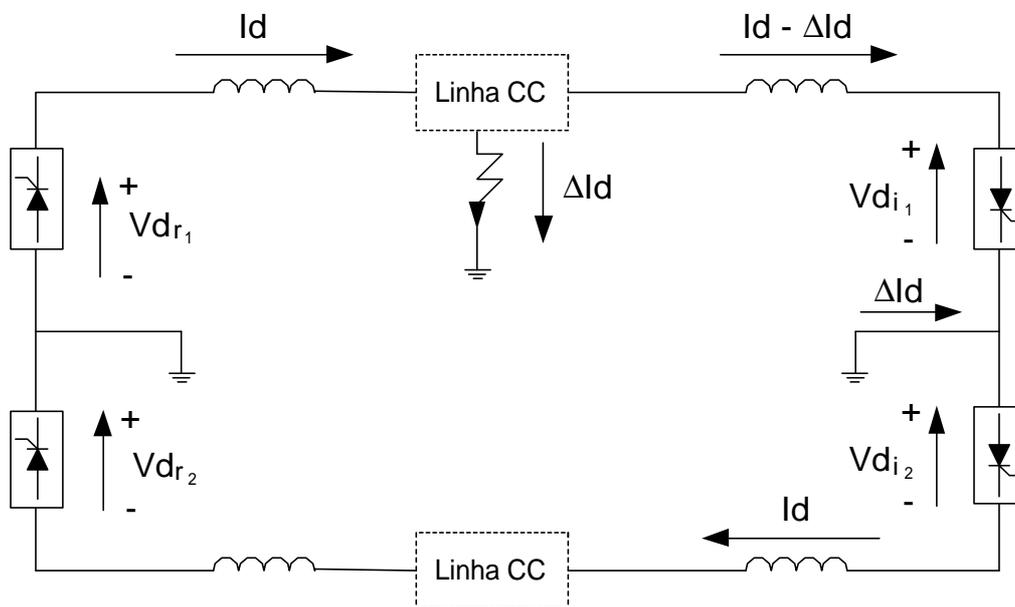
O Modo de Operação de Tensão Reduzida é representado pela interseção do segmento HI com o segmento AB. Este modo ocorre quando o ângulo de disparo do retificador fica preso em seu valor mínimo (segmento AB). Neste modo de operação o inversor passa a controlar a corrente do elo.

A ação do CEC (Current Error Control) é indicada pelo cruzamento do segmento AB com o segmento CH. Esta ação de controle atua no ângulo  $\alpha$  do retificador, que fica preso em seu valor mínimo e o inversor passa a controlar a corrente num valor tal que obedeça ao segmento CH. Nesta condição, a ordem de corrente passa a ser um valor entre  $I_{ord_r}$  e  $I_{ord_i}$ . Esta ação é realizada, no controle de pólo do inversor, através da modificação adequada do valor de  $\gamma_{min}$  de modo a alcançar a corrente desejada segundo o segmento CH. Este modo de operação é um estágio intermediário entre os dois anteriores, e foi proposto com intuito de se evitar a instabilidade de três pontos (ver Figura 2.15) [2].

### 3 MODELO DO ELO CCAT

#### 3.1 INTRODUÇÃO AO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS CONVERSORES

Nesta introdução, o comportamento dinâmico dos conversores será exemplificado através da análise da resposta do controle dos conversores a uma falta na linha CC. A Figura 3.1 mostra um dado sistema CC, constituído de um bipolo, operando em regime permanente, com corrente  $I_d$  nos pólos, quando da ocorrência de uma falta na linha CC.



**Figura 3.1** – Operação de um Sistema CC Constituído de um Bipolo

Quando da ocorrência de uma falta no pólo positivo da linha, a corrente de falta será  $\Delta I_d$ , conforme indica a Figura 3.1. O pólo negativo continuará operando e o retorno de corrente deste pólo passa a ser pelo solo, o que é uma das vantagens do arranjo bipolar pois não haverá interrupção de potência no outro pólo.

O retificador do pólo positivo percebe a falta na linha devido ao aumento relativamente mais rápido da corrente, uma vez que agora o retificador passa a alimentar um curto-circuito de baixa resistência e não mais o inversor. O controle de corrente do retificador atuará no sentido de diminuir a tensão da ponte, de maneira a manter a corrente de ordem ( $I_{ord}$ ). Isto é feito aumentando-se o ângulo em direção a  $90^\circ$ . A

corrente pode atingir valores acima de 2 pu. Para reduzir a corrente ao valor de referência, o retificador, após um período transitório, estabiliza em um valor de tensão próximo a zero com uma corrente igual a  $I_{ord}$ , a corrente de ordem.

O inversor percebe a falta, pelo rápido decréscimo na sua corrente. O controlador de corrente do inversor passa então a funcionar, aumentando o ângulo de extinção ( $\gamma$ ) na tentativa de manter sua corrente de referência.

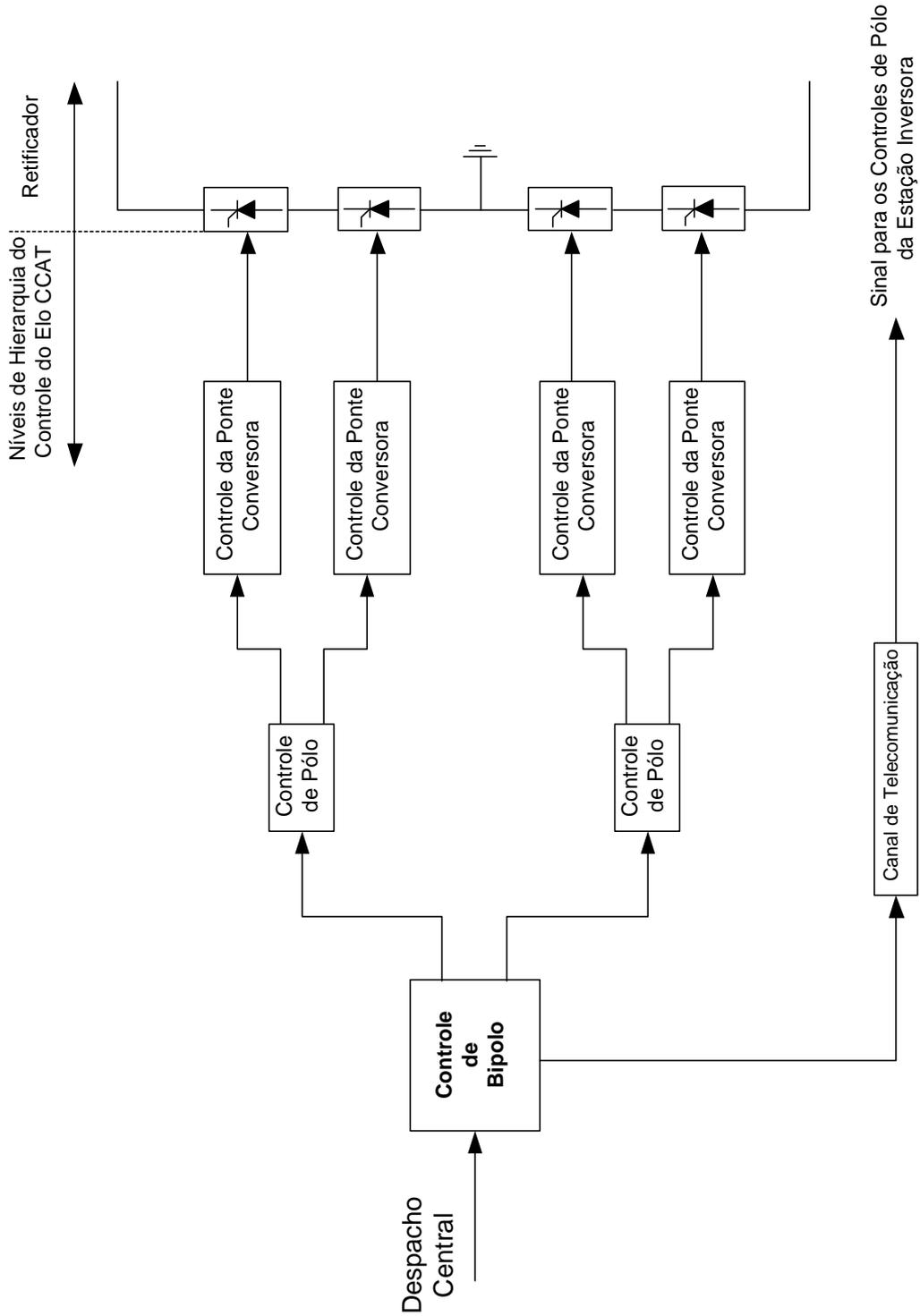
Este exemplo é útil no entendimento da ação de controle em um sistema constituído de um bipolo. Entretanto, esta ação de controle é apenas indicativa, uma vez que na prática alguns refinamentos são introduzidos no controle, de modo a contornar o problema de uma maneira muito mais eficaz.

Sabe-se que para o sistema CC, o retificador age como uma geração, ao passo que o inversor age como uma carga. Por outro lado, para o sistema CA o retificador age como uma carga, e o inversor como uma geração. Logo, o que ocorre na realidade no caso de uma falta linha-terra, é que o retificador é levado a inversão e, juntamente com o inversor, cuja excursão do ângulo de disparo será limitada a valores maiores que  $90^\circ$ , removem a energia da linha injetando-a nos sistemas CA. A corrente de falta é levada muito rapidamente a zero. Desta maneira, após um curto período necessário para desionização do sistema, o pólo poderá ser religado com sucesso.

### **3.2 HIERARQUIA DO CONTROLE DE ELOS CCAT**

O sistema de controle global de um elo CCAT envolve diversas malhas de controle. Devido à sua complexidade e diversidade, faz-se necessária uma coordenação de controle hierarquizada. A Figura 3.2 apresenta uma configuração hierárquica típica de controle de uma estação conversora operando como retificador em um sistema CCAT constituído de um bipolo.

No topo da cadeia hierárquica encontra-se o Controle de Bipolo ("Master Control") e que é responsável pela determinação e supervisão da potência transmitida no elo. É sua atribuição enviar a ordem de corrente calculada ( $I_{ord}$ ) para as duas estações terminais conversoras, retificador e inversor. Estas, por sua vez, tratam a ordem



**Figura 3.2** – Configuração Hierárquica Típica de uma Estação Conversora que opera no modo Retificador

recebida nos seus respectivos Controles de Pólo, verificando se houve alguma restrição, ou seja, se algum limite foi ultrapassado. A seguir, o controle de pólo gera a informação relativa ao instante de disparo adequado para que a ordem de corrente desejada seja alcançada. Esta informação, na forma de um sinal de tensão, é dirigida aos controles das pontes conversoras, responsáveis diretos pelo disparo das válvulas.

Um sistema eficiente de controle do elo CCAT deve perseguir os seguintes objetivos:

- Limitar a máxima corrente CC, para proteção das válvulas;
- Utilizar a maior tensão CC possível;
- Minimizar o consumo de potência reativa;
- Minimizar o numero de situações possíveis para a ocorrência de falha de comutação;
- Atuar como controle auxiliar do sistema CA externo, com intuito de melhorar a estabilidade e operação deste sistema através da contribuição ao controle carga-freqüência, e da participação no amortecimento de oscilações eletromecânicas.

Em condições normais de operação o elo CCAT opera em um modo de controle que tem por objetivo primordial:

- Manter a corrente  $I_d$  constante no retificador;
- Manter o ângulo de extinção ( $\gamma$ ) constante no inversor.

Foi adotado neste trabalho de tese o Método da Margem de Corrente como filosofia de controle. Conforme descrito no capítulo 2, este método consiste em ajustar a ordem de corrente do inversor para um valor menor que a do retificador. A diferença entre elas,  $\Delta I_d$ , é chamada margem de corrente e, em geral corresponde a uma faixa de 10 a 15 % do valor da corrente nominal do elo CCAT.

### 3.3 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE CONTROLE

Neste subitem serão descritos em detalhes os principais componentes de um sistema de controle de elos CCAT seguindo a hierarquia apresentada no subitem anterior. Será também analisada a contribuição de cada componente no desempenho global do sistema de controle.

#### 3.3.1 CONTROLE DE BIPOLO

A função primordial do Controle de Bipolo, que é mais conhecido como "Master Control", é a de produzir a ordem de corrente ( $I_{ord}$ ) aos Controles de Pólo das estações terminais. Existem duas formas distintas de controle do bipolo, quais sejam: controle de potência constante ou controle de corrente constante.

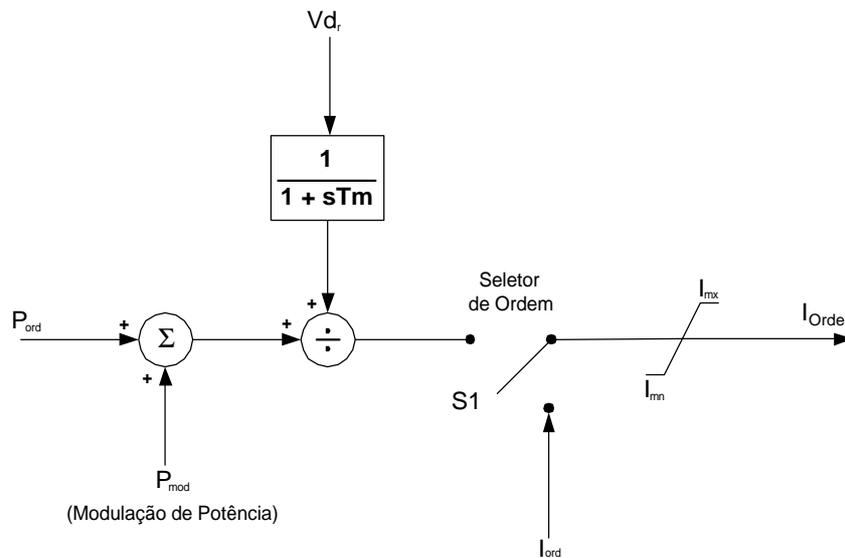
Do ponto de vista de operação do sistema global, é mais interessante o controle da potência transmitida pelo elo CCAT do que de sua corrente. O controle em potência constante é realizado no Controle de Bipolo através do cálculo da corrente de ordem computando-se a potência de ordem recebida do Despacho Central e a tensão CC medida em um dos conversores do elo.

Desta forma, o valor da ordem de corrente,  $I_{ord}$ , não é um valor estático, pois está sujeito a variações impostas pelo controle de potência constante, advindas da modificação da potência de ordem e/ou oscilações da tensão CC.

O controle do bipolo permite a seleção entre os dois modos de operação: corrente ou potência constante, conforme é apresentado no diagrama de blocos da Figura 3.3.

Para fins de modelagem do efeito da característica de controle de corrente constante, dentro do modo de potência constante, utiliza-se um bloco atrasador, do tipo  $(1/(1+sT))$ , para refletir o pequeno atraso no processo de medição da tensão CC.

Para que o modo de potência constante não ocasione uma ordem de corrente acima do tolerável pelo elo CCAT quando de uma eventual queda transitória na tensão CC, um limitador de mínimo na medição da tensão CC é implementado.



**Figura 3.3** – Diagrama de Blocos Típico do Controle do Bipolo

Na saída do controle do bipolo também é considerado um limitador de máximo, de forma a evitar sobrecargas no elo CCAT.

O sinal de controle proveniente do bipolo requer um cuidado especial quando de sua transmissão aos controles de pólo, de forma a evitar o cruzamento das ordens de corrente efetivamente aplicadas ao retificador e ao inversor, na eventualidade de uma falha no sistema de telecomunicação. Esta falha resultaria em perda da margem de corrente, levando a uma condição em que não há pontos de operação possíveis. Este problema é resolvido através de uma lógica de confirmação de recebimento de sinal por parte dos controles do pólo, antes da liberação da ação de controle.

### 3.3.1.1 Modulação de Potência

Neste subitem será apresentada a filosofia básica de atuação da modulação de potência, que é implementada no controle do bipolo, com o objetivo de melhorar o amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas CA/CC.

Esta modulação é realizada por uma malha de controle suplementar que deve ser

implementada de forma a preservar a margem de corrente entre as ordens de corrente do retificador e do inversor. O grande benefício da modulação de potência é o aumento da capacidade de transferência de potência do sistema CA/CC, em razão de uma melhoria do limite de estabilidade dinâmica.

A modulação de potência pode ser conduzida com dois aspectos distintos, quais sejam: a modulação por pequenas perturbações e grandes perturbações.

A modulação por pequenas perturbações envolve  $\pm 3\%$  do valor nominal da potência e pode ser realizada sem a preocupação de perda de margem de corrente, uma vez que seu valor é 10% da ordem. Esta modulação está permanentemente ativa, e sua ação visa principalmente corrigir problemas típicos de pequena amplitude, tal como o amortecimento das oscilações eletromecânicas na frequência natural do sistema em regime normal de operação.

Entretanto, como o objetivo primordial deste trabalho de tese é analisar o desempenho do sistema CA/CC sob grandes perturbações, a modulação a pequenos sinais não será considerada.

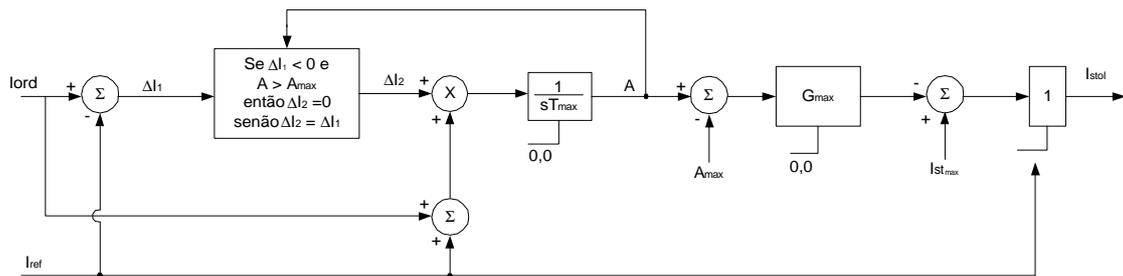
A modulação de potência a grandes perturbações, por sua vez, faz-se necessária quando um sistema CA/CC sofre um forte impacto, como por exemplo um curto-circuito seguido de sua eliminação com a retirada do elemento sob defeito. Sob estas condições, o sistema poderá sofrer oscilações de grande amplitude e que, eventualmente, podem provocar a perda de estabilidade da geração através do sistema CA, principalmente se este sistema estiver operando próximo de seu limite de estabilidade.

O sistema CC se recupera tão logo as tensões CA se recomponham, de forma que sua potência pode ser modulada no sentido de minimizar os efeitos danosos do impacto sofrido pelo sistema CA. A modulação por pequenos sinais não seria suficientemente eficiente no amortecimento de oscilações desta grandeza. É necessária uma modulação por grandes sinais e que chegam a atingir 30% da potência nominal. Variações desta magnitude levam os componentes do sistema elétrico, bem como sistemas de controle, a situações de natureza altamente não-linear [2].

A modulação por grandes sinais exige o envio coordenado das ordens de corrente moduladas aos dois terminais, a fim de que seja evitada a perda da margem de corrente. Neste caso é imprescindível um sistema de telecomunicações eficiente e confiável.

### 3.3.1.2 STOL – Limitador de Sobrecarga de Curta Duração (Short Time Overload Limiter)

Além da capacidade de suportar sobrecargas em regime permanente dependendo da temperatura ambiente, as válvulas, reatores, transformadores, etc., também são projetados para suportar sobrecargas de curta duração. Para controlar essa sobrecarga é utilizado um controlador, definido como STOL (Short Time Overload Limiter), cuja diagrama de blocos é apresentado na Figura 3.4.

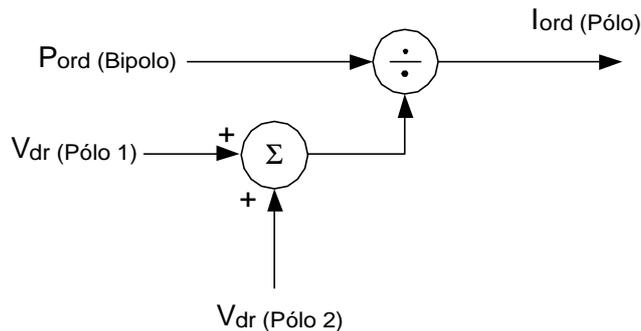


**Figura 3.4** – Diagrama de Blocos do STOL

A ação de controle do STOL é limitar a referência de corrente, quando o elo opera em controle de potência, através do monitoramento do aquecimento de válvulas e transformadores. Essa limitação é uma função do tempo em que a corrente no elo CCAT permanece acima do valor nominal. Este controle tem como dados de entrada uma referência de corrente nominal, a área correspondente ao aquecimento máximo admissível dos equipamentos ( $A_{max}$ ), o ganho do limitador ( $G_{max}$ ), a constante de tempo do integrador ( $T_{max}$ ) e a máxima corrente de curta duração permitida ( $I_{st_{MAX}}$ ).

A Figura 3.5 apresenta um diagrama funcional simplificado de como é calculada a ordem de corrente, estando o Elo CC no modo de operação “Controle de Potência Síncrona”. Nesta forma de controle, a ordem de corrente de um pólo ( $I_{ord}$ ) é calculada através da divisão da ordem de potência do bipolo ( $P_{ord}$ ) definida, pelo valor filtrado da

soma das tensões dos pólos de um mesmo bipolo.



**Figura 3.5** - Cálculo da Ordem de Corrente - Operação Síncrona

Neste modo de operação, quando da perda de um pólo, o outro pólo do mesmo bipolo assume instantaneamente a potência do pólo bloqueado até o limite de sua capacidade máxima de potência. No programa ANATEM do CEPTEL, a transferência de potência deve ser simulada manualmente. Nos casos em que esta transferência resultar em uma sobrecarga de corrente no pólo, o controle STOL reduz automaticamente a corrente CC até o valor da corrente nominal.

### 3.3.1.3 Congelamento da Medição de Tensão CC

O Elo CCAT opera normalmente no modo de controle de potência, em que a ordem de corrente é calculada em função da tensão CC medida no lado do retificador e filtrada por um filtro de primeira ordem. No caso de Itaipu, a constante de tempo é de 500 ms.

Durante quedas transitórias de tensão CC em que a taxa de variação da tensão caracterize uma falta CC, uma falha de comutação ou uma falta CA próxima dos terminais do elo CCAT, a medição de tensão utilizada para o cálculo da ordem de corrente é congelada. Desta forma, o elo CCAT se comporta com se estivesse virtualmente em controle de corrente durante um período de aproximadamente dois segundos após a eliminação da falta e, após este período, o elo volta automaticamente a se comportar como em controle de potência

### 3.3.2 CONTROLE DO PÓLO

Apos receber a ordem de corrente ( $I_{ord}$ ) do Controle de Bipolo, os Controles de Pólo, tanto do retificador quanto do inversor, processam este sinal a fim de gerar um sinal de tensão proporcional ao erro de corrente. Este sinal de tensão, também conhecido como tensão de controle,  $U_c$ , é enviado em seguida aos Controles das Pontes Conversoras.

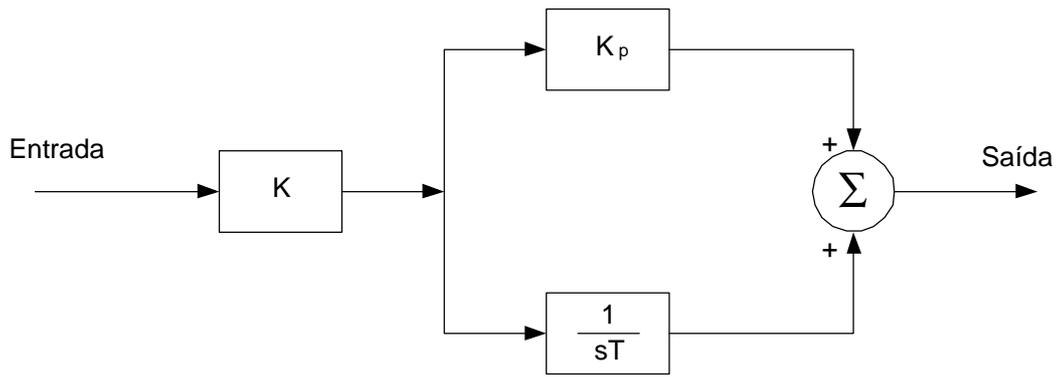
Este conjunto pode ser dividido em dois blocos, quais sejam: o CCC e o VDCOL. A estrutura básica deste conjunto é a mesma para ambos os conversores, com algumas diferenças sutis.

#### 3.3.2.1 CCC – Controle de Corrente Constante (*Constant Current Control*)

O CCC é o elemento central de todo o sistema de controle do elo CCAT. Sua função é de controlar a corrente transmitida pelo elo CCAT de tal forma que se mantenha igual à ordem de corrente.

O CCC é um regulador de corrente cujo sinal de entrada é dado pelo erro de corrente existente entre a ordem de corrente na retificadora,  $I_{ord}$ , e a corrente medida na linha CC,  $I_d$ . Um sinal de controle,  $U_c$ , é gerado pelo amplificador de erro da corrente é enviado aos controles das pontes conversoras, onde o ângulo de disparo das válvulas de tiristores é alterado de modo a eliminar o erro de corrente [3].

A função de transferência do CCC deve possuir as características dinâmicas necessárias para um bom desempenho do sistema de controle. Atualmente são utilizadas funções de transferência do tipo PI (Proporcional-Integral). A Figura 3.6 apresenta a estrutura do CCC.



**Figura 3.6** – Diagrama de Blocos do CCC

A função de transferência global deste controlador é dada por:

$$\frac{\text{Saída}}{\text{Entrada}} = K \cdot \left[ K_p + \frac{1}{sT} \right] \quad (3.1)$$

Desenvolvendo o segundo termo da expressão, obtemos:

$$K \cdot K_p + \frac{K}{sT} \Rightarrow \frac{sTK \cdot K_p + K}{sT}$$

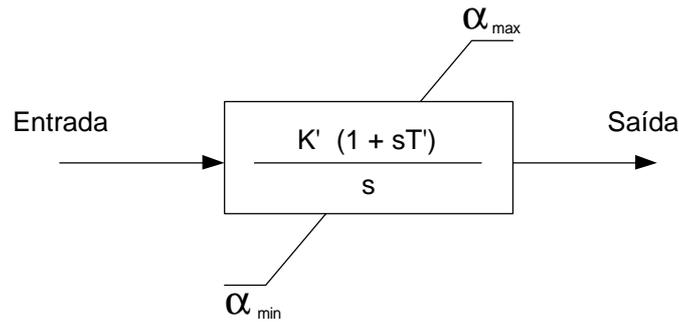
Considerando que:  $K' = \frac{K}{T}$  e  $T' = K_p \cdot T$ , a função de transferência pode ser

reescrita como:

$$\frac{K' (sTK_p) + K'}{s} \Rightarrow \frac{K' (1 + sTK_p)}{s} \text{ ou seja,}$$

$$\frac{\text{Saída}}{\text{Entrada}} = \frac{K' (1 + sT')}{s} \quad (3.2)$$

Levando-se em consideração a existência de limites mínimo e máximo no CCC, sua função de transferência completa é apresentada na Figura 3.7.



**Figura 3.7** – Função de Transferência do CCC

O regulador de corrente existe tanto no retificador quanto no inversor. No entanto, em modo normal de operação, apenas o retificador deve atuar. O regulador de corrente do inversor, por sua vez, fica inibido através da atuação da saída do CCC no valor de  $\alpha_{\max}$ , o que equivale a um ângulo mínimo de extinção ( $\gamma_{\min}$ ). Isto ocorre porque o inversor recebe como sinal de erro de corrente o valor  $I_{ord_i} - I_d$ , onde:  $I_{ord_i}$  é igual a  $I_{ord_r} - \Delta I_d$  (margem de corrente).

Como o retificador, em condições normais, controla a corrente da linha ( $I_d$ ) mantendo-a em  $I_{ord_r}$ , o erro de corrente no inversor será de  $-\Delta I_d$ . Este erro constante causaria uma resposta indefinidamente crescente num controlador do tipo integral. Desta forma, o CCC do inversor tentaria aumentar o alfa, o que significa dizer uma redução do ângulo de extinção  $\gamma$ , com o intuito de aumentar a tensão CC. Em razão da presença do limite máximo neste controlador, sua saída fica limitada em  $\alpha_{\max}$ .

Duas características importantes a serem destacadas em relação às diferenças entre os reguladores CCC representados no retificador e no inversor são:

- O limite de  $\alpha_{\max}$  imposto ao CCC do inversor é um valor dinâmico, ao passo que o do retificador é estático. Isto se deve à necessidade de se manter o ângulo de extinção ( $\gamma$ ) do inversor no mínimo ( $\gamma_{\min}$ ), implicando numa reavaliação de  $\alpha_{\max}$  a cada instante;
- Os limites inferiores do CCC ( $\alpha_{\min}$ ) de ambos os conversores, retificador e inversor, são a princípio estáticos. O  $\alpha_{\min}$  do retificador pode variar se o controlador AML (Limitador de Alfa Mínimo) estiver ativo.

Faz-se necessário então que, para a manutenção de  $\gamma_{\min}$  constante, o ângulo  $\alpha_{\max}$  deve ser recalculado ao longo da simulação em razão das variações da tensão CA e da corrente CC.

Outra consideração importante acerca dos limites do CCC deve ser salientada: os limites podem ser aplicados de duas formas distintas: interno e externo.

Chama-se de limite externo quando se permite ao integrador do CCC levar a sua saída a valores além deste limite, para, após passar por um bloco limitador externo, ter esta saída limitada.

No caso do limite interno, sua aplicação é realizada diretamente na saída do integrador. Este procedimento resulta numa resposta dinâmica mais rápida, principalmente nas ocasiões de inversão do sentido de variação do sinal de entrada, visto que, neste caso, seria necessário fazer uma integração negativa para trazer o valor de saída novamente abaixo do limite ultrapassado [2]. A utilização de limites internos é a prática mais comum.

### *3.3.2.2 VDCOL – Limitador da Ordem de Corrente Dependente da Tensão (Voltage Dependent Current Order Limiter)*

O VDCOL é um limitador que altera a ordem de corrente quando ocorre uma redução da tensão CC, para evitar o colapso de tensão CA na recuperação de faltas CC ou CA.

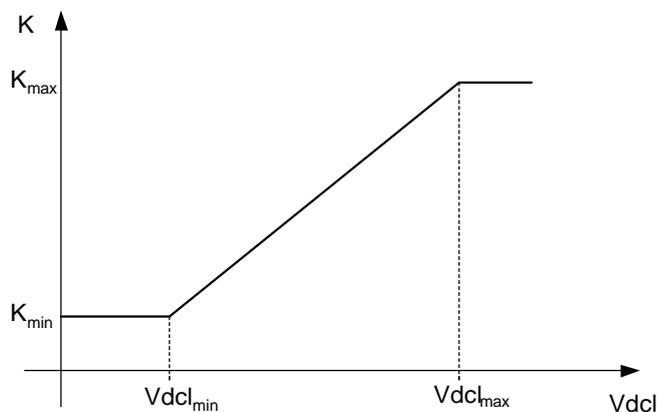
O VDCOL é basicamente um tabela ajustada para uma região de operação considerada anormal. A entrada da tabela é o valor de tensão CC,  $V_{dcl}$ , medido em cada estação conversora. É então definido um fator multiplicador  $K_r$  e  $K_i$ , para o retificador e inversor, respectivamente. O fator é então aplicado à corrente de ordem advinda do controle do bipolo ( $I_{ord_r}$  e  $I_{ord_i}$ ), resultando em uma nova ordem de corrente a ser controlada pelo CCC.

No entanto, o VDCOL tem uma atuação bem definida para grandes distúrbios do sistema. Para situações de decréscimo ou elevação gradual na tensão medida, faz-se necessário um cuidado adicional a fim de limitar a sua atuação.

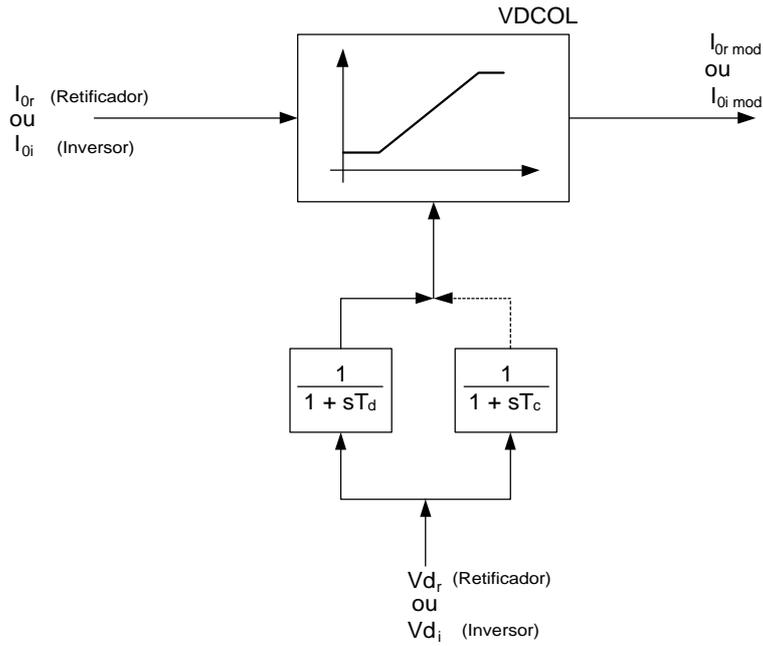
A tensão decrescente é um indicativo de alguma condição anormal do sistema. Desta forma, é necessária uma resposta rápida do VDCOL para evitar maiores consequências para o sistema CCAT. Isto é obtido fazendo-se a constante de tempo  $T_d$  pequena.

Na situação em que a tensão CC se apresenta crescente, tem-se uma indicação de que o sistema está se recuperando de uma falta. É necessário limitar a taxa de crescimento da corrente de forma a evitar uma possível falha de comutação no inversor. Isto é realizado introduzindo-se um atraso adicional no circuito de medição da tensão, cuja constante de tempo  $T_c$  é ajustada para um valor aproximadamente 10 vezes maior que a constante de tempo  $T_d$ . A Figura 3.8 apresenta o diagrama de blocos do VDCOL incluindo o tratamento dado à tensão Vd (Figura 3.9).

Visto que o inversor se comporta como uma geração para o sistema CA a ele associado, é importante que os efeitos decorrentes das variações de potência ativa e reativa (oscilações eletromecânicas e de tensão, respectivamente) do inversor sobre o sistema sejam considerados de forma adequada nos ajustes dos parâmetros do VDCOL. Em outras palavras, faz-se necessário um ajuste específico para cada sistema CA.



**Figura 3.8** – Função do VDCOL



**Figura 3.9** – Diagrama de Blocos do VDCOL

### 3.3.3 CONTROLE DA PONTE CONVERSORA

O Controle da Conversora recebe do Controle do Pólo o sinal de tensão de controle,  $U_c$ , resultante do processamento do sinal de erro de corrente pelo CCC. Este sinal é então enviado ao VCO (Voltage Controlled Oscillator) que produz os pulsos de disparo que são então distribuídos às válvulas componentes da ponte conversora. Os instantes de liberação destes pulsos determinam o ângulo de disparo da válvula, cujo valor foi definido pelos níveis hierarquicamente superiores do controle.

O Controle da Conversora é também responsável pela limitação dos ângulos de disparo. Para o retificador, a princípio, os limites de alfa,  $\alpha_{min}$  e  $\alpha_{max}$ , são estáticos. No entanto, quando da ocorrência de defeitos no sistema,  $\alpha_{min}$  pode sofrer modificações. Para o inversor o limite de  $\alpha_{min}$  é estático. No entanto,  $\alpha_{max}$  do inversor é função de  $I_d$  e  $V_{ac_i}$ , conforme expressão deduzida da equação (2.10-a):

$$\alpha_{max \text{ inversor}} = \cos^{-1} \left( \frac{2 \cdot R_{c_i} \cdot I_d}{\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot E_i} \cos \gamma_{min} \right) \quad (3.3)$$

A aplicação do limite mínimo  $\alpha_{min}$  é realizado submetendo-se a um seletor de

máximo o sinal de  $U_c$  proveniente do CCC, e um sinal de tensão correspondente a  $\alpha_{\min}$ . Este seletor escolherá o maior entre os dois sinais.

Analogamente a aplicação do limite máximo  $\alpha_{\max}$  é realizado submetendo-se a um seletor de mínimo os sinais de  $U_c$ , proveniente do CCC, e um sinal de tensão correspondente a  $\alpha_{\max}$ . Este seletor permitirá a passagem do menor valor.

Assim, a tensão  $U_c$  é aplicada ao VCO apenas se satisfizer as restrições dos dois blocos limitadores acima. Do contrário um dos limites tomará o lugar de  $U_c$ .

### 3.3.3.1 VCO – Oscilador Controlado a Tensão (Voltage Controlled Oscillator)

O VCO é um oscilador cuja frequência é dependente do CCC e sua função é emitir um trem de pulsos para as válvulas conversoras de forma a manter o ângulo de disparo desejado.

Apesar deste controlador ter uma característica integral, ele está inserido em uma malha com realimentação proporcional. Sendo assim, a função de transferência da malha de controle pode ser dada por:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{K}{s}} \quad (3.4)$$

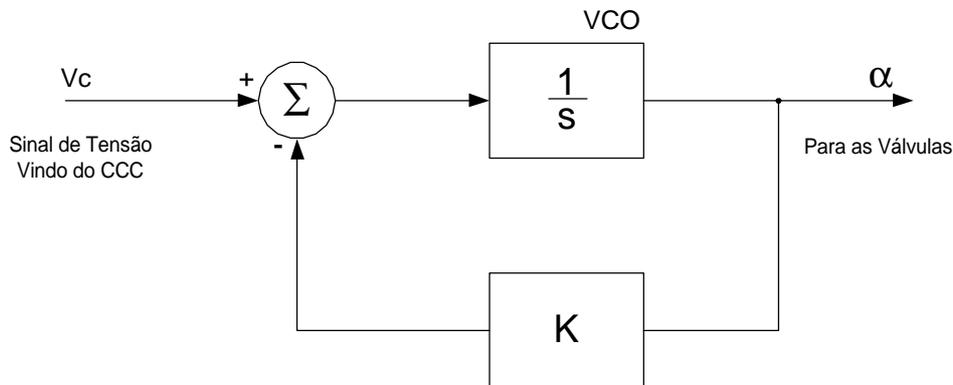
Colocando-se em evidência o termo  $\frac{1}{K}$ , a função de transferência em questão pode ser reescrita como:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K}}{1 + \left(\frac{1}{K}\right) \cdot s} \quad (3.5)$$

De uma maneira geral, a constante de tempo associada a este controlador é muito pequena. Isto significa que, frente à faixa de frequências envolvida nos fenômenos relativos à estabilidade, este bloco pode ser desprezado na maioria dos

casos.

A Figura 3.10 apresenta o diagrama de blocos típico do modelo de VCO



**Figura 3.10** – Diagrama de Blocos da Malha de Controle do VCO

### 3.3.3.2 CEC – Controle de Erro da Corrente (Current Error Control )

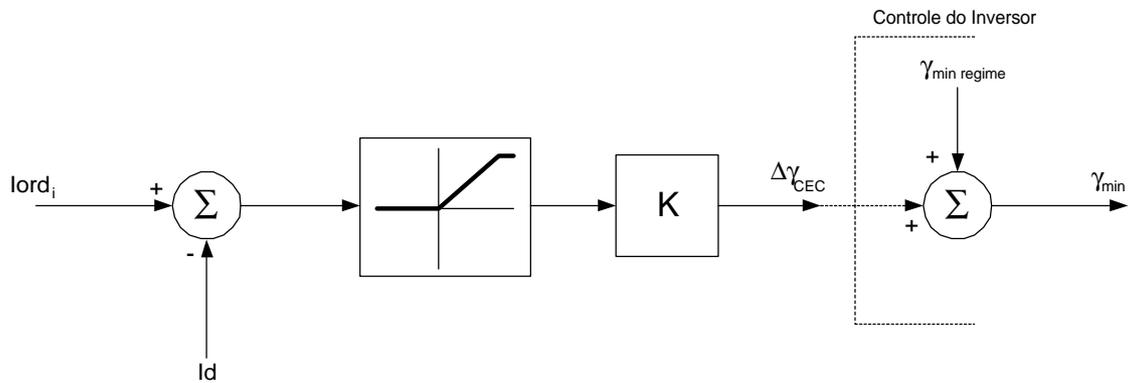
Conforme descrito no subitem 2.4, podem ocorrer situações em que o sistema CA do lado do inversor apresente um baixo valor de SCR – Short Circuit Ratio (ver Apêndice C), caracterizando um sistema fraco. Desta forma, passam a existir três pontos de operação possíveis sem que seja possível estabilizar o ponto de operação do elo CCAT. É a chamada Instabilidade dos Três Pontos (ver Figuras 2.14 e 2.15).

Uma medida para evitar a instabilidade dos três pontos seria alterar a característica estática de operação do inversor através de uma ação de controle que torne possível a operação do elo CC.

O CEC é um controlador que se propõe a modificar a característica do inversor através da inserção de uma região de transição, onde nem o retificador nem o inversor controlam a corrente. Quando a corrente estiver entre  $I_{ord_r}$  e  $I_{ord_i}$ , o controle altera ligeiramente o valor de  $\gamma$  de modo a encontrar um ponto de operação possível para o sistema.

O CEC, é responsável pelo trecho CK da característica estática mostrada na Figura 2.16. A ação de controle associada é realizada por um dispositivo inserido no controle de pólo do inversor. Sua ação de controle é gerada a partir do sinal de erro

entre a corrente de ordem,  $I_{ord_i}$ , proveniente do Controle de Bipolo, e a corrente medida na linha CC ( $I_d$ ). Destaca-se que  $I_{ord_i}$  ainda não sofreu decréscimo do valor da margem de corrente. Este erro gera um sinal proporcional de  $\Delta\gamma$  a ser adicionado a  $\gamma_{min}$ , conforme mostra a Figura 3.11.



**Figura 3.11** – Diagrama de Blocos do Modelo do CEC

Como o inversor opera, em condições de regime permanente, com  $\gamma_{min}$ , não se pode permitir excursões decrescentes de  $\gamma_{min}$ . Conseqüentemente,  $\Delta\gamma_{CEC}$  será sempre positivo. Para isto, utiliza-se um bloco limitador, que permite a passagem apenas de valores positivos do erro de corrente.

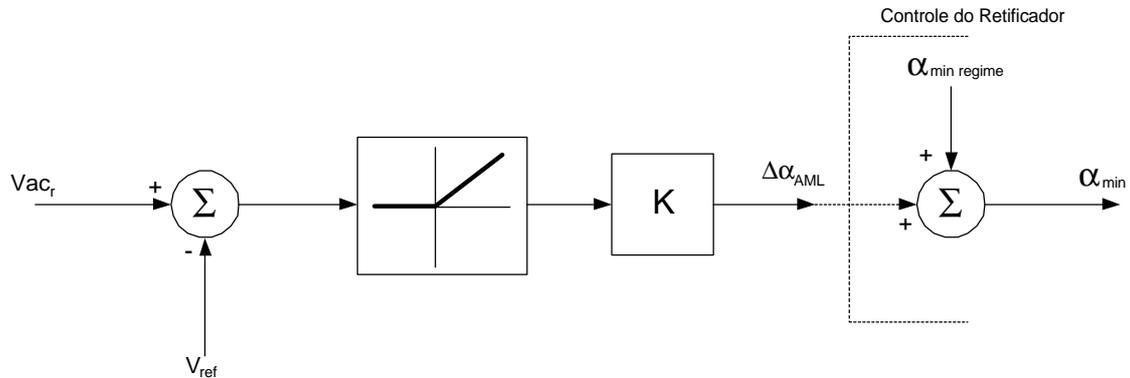
Também é necessário restringir a excursão máxima permitida para o ângulo  $\gamma$ . Desta forma, é introduzido no bloco um limite correspondente ao  $\Delta\gamma_{CEC}$  máximo.

### 3.3.3.3 AML – Limitador de Ângulo alfa mínimo (Alpha-Min Limiter)

O Regulador de alfa-mínimo ou Alpha-min Limiter Regulator é modelado apenas no Controle de Pólo do Retificador e atua somente em situações de falta CA do lado do retificador. A Figura 3.12 apresenta o diagrama de blocos correspondente ao AML.

A ação de controle associada a este regulador é dependente da tensão CA do lado do retificador. Quando esta tensão cair abaixo de um determinado valor de referência especificado, é gerado um erro de tensão que passa por um ganho e resulta em um sinal a ser adicionado ao  $\alpha_{min}$  normal de operação. O sinal proveniente desta

soma passa a ser o novo limite  $\alpha_{\min}$  adotado pelo regulador de corrente (CCC) do retificador.



**Figura 3.12** – Diagrama de Blocos do Modelo do AML

#### 3.3.3.4 Modulação de Gama

Neste subitem será apresentada a filosofia básica de atuação da modulação de gama, que é implementada no controle do inversor, com o objetivo de auxiliar a modulação de potência.

O princípio de funcionamento desta modulação baseia-se no fato de que uma variação de gama (do inversor) corresponde a uma variação do fator de potência. Desta forma, variando-se transitoriamente o consumo de reativos do conversor, pode-se controlar a tensão CA. Em suma, faz-se com que o inversor desempenhe o papel de um compensador estático.

O sinal de entrada para este controle é obtido da medição da tensão da barra CA do inversor ( $V_{ac_i}$ ). Este sinal é processado pelo bloco de controle, que gera um sinal,  $\Delta\gamma$ , que irá modular o valor de  $\gamma_{\min}$ . Esta modulação é permitida apenas no sentido crescente de  $\gamma_{\min}$ , ou seja,  $\Delta\gamma$  positivo.

A função de transferência utilizada deve ser do tipo de um filtro passa-faixa. Desta forma, este controle está dirigido para operar apenas na faixa de frequência problemática do sistema em particular. Em regime permanente, este controle deve permanecer inativo, assim como nas altas frequências, evitando-se uma possível interação instabilizante com os demais controles [2].

### 3.3.4 CONVERSORES CA/CC

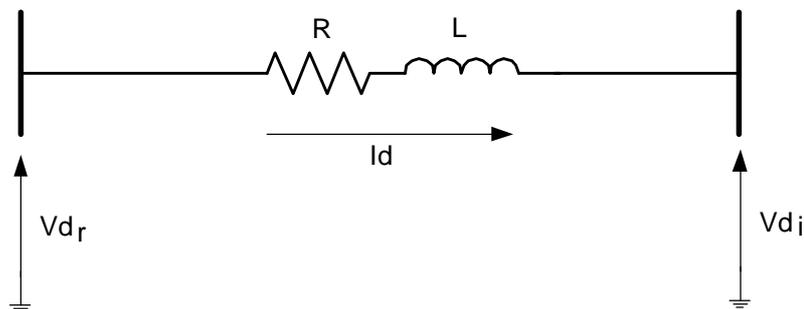
Não há necessidade de representar a dinâmica da estabilidade transitória dos conversores, uma vez que os tempos envolvidos nestes fenômenos são muito rápidos em relação ao intervalo de tempo das análises. Os conversores serão, portanto, representados por suas equações de regime permanente.

### 3.3.5 MODELO DA LINHA CC

Levando-se em consideração a faixa de frequências associadas aos fenômenos relativos à estabilidade eletromecânica, a modelagem comumente utilizada nos programas considera que a linha CC pode ser modelada apenas por um circuito R-L série, onde R é a resistência total da linha e L é a indutância total da linha acrescida da indutância dos reatores de alisamento [1 e 2].

A linha CC é submetida, nas suas extremidades, às tensões CC dos conversores, como mostra a Figura 3.13. Este circuito pode ser descrito pela seguinte equação diferencial:

$$Vd_r - Vd_i = R \cdot Id + L \frac{d Id}{dt} \quad (3.6)$$



Onde:

R = Resistência da Linha

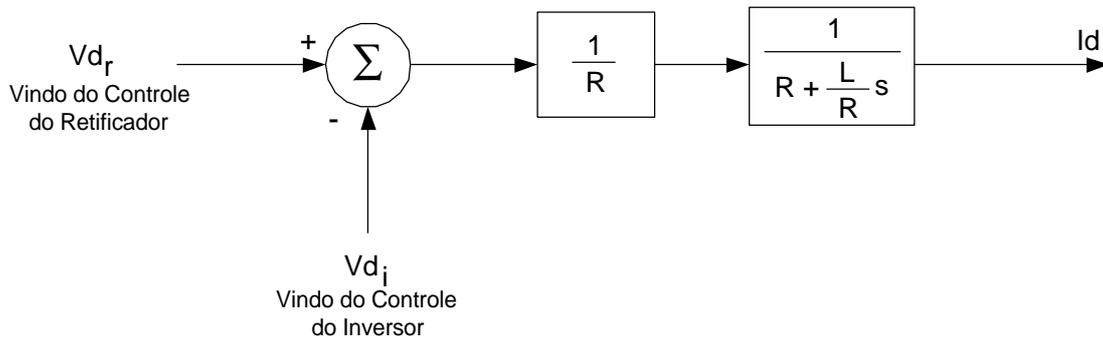
L = Indutância da Linha + Indutância dos reatores de Alisamento

**Figura 3.13** – Modelo da Linha CC

Aplicando a transformada de Laplace na equação (3.6), a função de transferência pode ser dada como:

$$G(s) = \frac{I_d}{(V_{d_r} - V_{d_i})} = \frac{1}{R(1 + s\frac{L}{R})} \quad (3.7)$$

O diagrama de blocos referente à esta função de transferência é apresentado pela Figura 3.14.



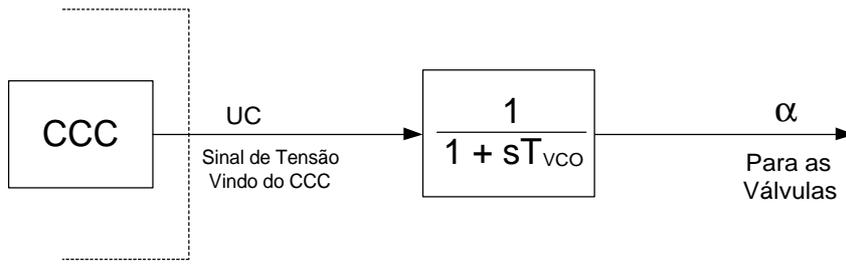
**Figura 3.14** – Diagrama de Blocos Correspondente ao Modelo da Linha CC

### 3.4 MODELOS DE VCO DESENVOLVIDOS

Neste subitem serão apresentados os diferentes modelos de VCO desenvolvidos neste trabalho de tese. Cada um dos modelos propostos é testado e analisado em detalhes no capítulo 4.

O primeiro modelo desenvolvido se refere ao utilizado nos primórdios da modelagem dos controles de elos CCAT. É constituído de um filtro de primeira ordem com constante de tempo muito pequena. O cálculo desta constante de tempo envolve o trem de pulsos gerado para as conversoras e a frequência do sistema CA. Para um sistema CA a 60 Hz, o valor de  $T_{VCO}$  é da ordem de  $1,4 \times 10^{-3}$ , o que faz com que possa ser desprezado em uma extensa gama de ocorrências possíveis em um sistema CA / CC, principalmente no que concerne à sistemas em que a potência de curto-circuito do lado do retificador não difere muito da potência de curto-circuito do lado do inversor.

A figura 3.15 apresenta o primeiro modelo de VCO considerado nas análises conduzidas neste trabalho. A este modelo, foi designado o nome *Modelo A de VCO*.

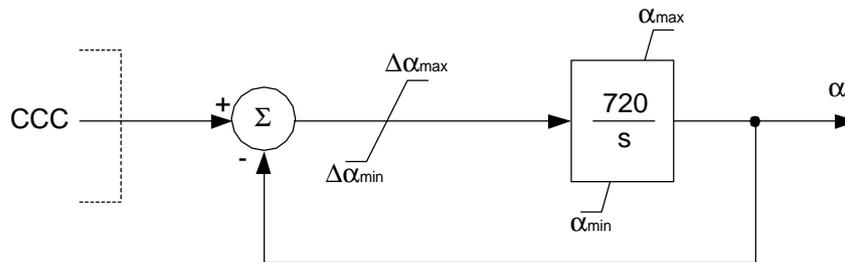


**Figura 3.15** – Diagrama de Blocos do Modelo A de VCO

O segundo modelo se refere ao modelo mais comumente utilizado em programas de estabilidade transitória. Este, contempla um desacoplamento parcial do controle de disparo do sistema CA evitando que distorções acentuadas, provocadas pelo sistema CA, sejam refletidas no desempenho do VCO.

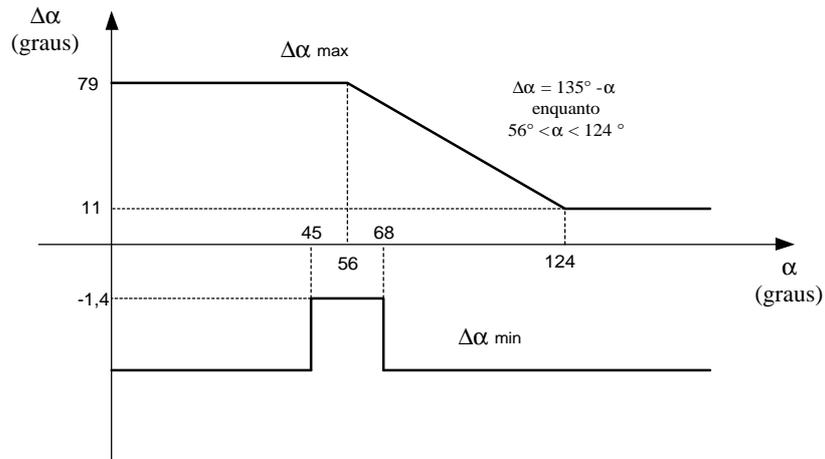
Neste modelo é introduzida a limitação da máxima variação do ângulo de disparo ( $\Delta\alpha$ ), o qual se espera limitar mudanças acentuadas no ângulo de disparo entre comutações consecutivas.

A Figura 3.16 apresenta o segundo modelo de VCO considerado nas análises conduzidas neste trabalho. A este modelo, foi designado o nome *Modelo B de VCO*.

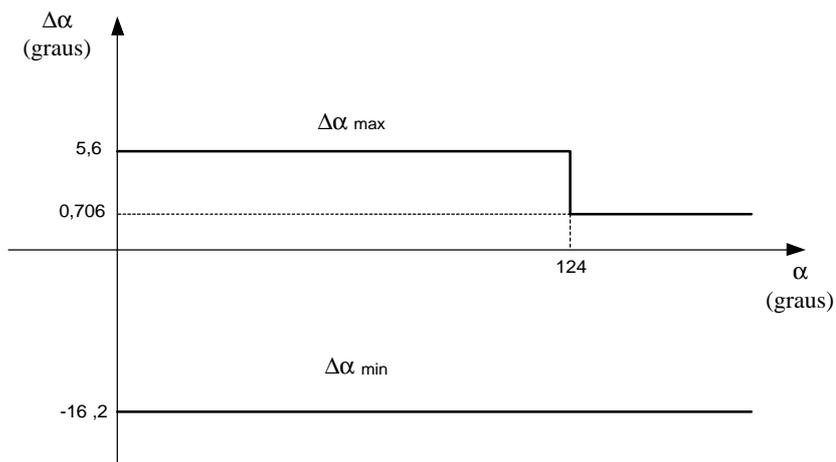


**Figura 3.16** – Diagrama de Blocos do Modelo B de VCO

Os limites  $\Delta\alpha_{max}$  e  $\Delta\alpha_{min}$  do retificador e do inversor são limites dinâmicos que são definidos através de funções específicas que dependem do sistema CA associado e do sistema de disparo considerado. Neste trabalho, foram adotados os mesmos limites representados no modelo de VCO de Itaipu. As Figuras 3.17 e 3.18 apresentam os limites de  $\Delta\alpha$  adotados para o modelo B de VCO, tanto no modelo do retificador quanto no modelo do inversor.



**Figura 3.17** – Limites de  $\Delta\alpha$  máximo e Mínimo Adotados para o Modelo de VCO do Retificador



**Figura 3.18** – Limites de  $\Delta\alpha$  Máximo e Mínimo Adotados para o Modelo de VCO do Inversor

Na prática, o valor calculado do ângulo de disparo  $\alpha$ , denominado neste trabalho como  $\alpha_{\text{calc}}$ , é determinado pela integração no tempo das variações entre disparos sucessivos. No entanto, o valor real do ângulo  $\alpha$  é obtido por medição e, neste trabalho é denominado  $\alpha_{\text{med}}$ . No entanto, a diferença entre estas duas variáveis pode ser usada para corrigir de forma sutil o controle de disparo.

De uma maneira geral, em sistemas CA considerados fracos (ver Apêndice C), distúrbios no sistema em corrente alternada provocam variações significativas na tensão



### **3.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 3**

Este capítulo apresentou uma introdução do comportamento dinâmico dos elos CCAT considerando a hierarquia típica de controle adotada atualmente em sistema de transmissão em corrente contínua. O modo de controle adotado é o Método da Margem de Corrente.

Também foram descritos os controles relevantes para a análise de estabilidade. A partir desta descrição é possível implementar, em programas de estabilidade transitória, os modelos de elo CCAT de acordo com o grau de complexidade desejado.

Pode-se concluir, neste capítulo que um sistema eficiente de controle de elos CCAT deve ter os seguintes objetivos: limitar a máxima corrente CC e utilizar a maior tensão CC possível, minimizar o consumo de potência reativa, minimizar as condições favoráveis às falhas de comutação.

Adicionalmente, o controle do elo pode atuar como controle auxiliar do sistema CA externo, com intuito de melhorar a estabilidade e operação deste sistema através da contribuição ao controle carga-freqüência, e da participação no amortecimento de oscilações eletromecânicas.

## **4 ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DO ELO CCAT**

A modelagem de um sistema de potência depende do tipo de estudo que se pretende realizar, uma vez que cada tipo de estudo requer um maior detalhamento na representação de uma parte específica do sistema.

Nas análises conduzidas neste trabalho, o enfoque principal foi a influência dos sistemas de controle na operação de um elo de transmissão CCAT. Desta forma, foi dada maior importância à representação destes sistemas de controle e dos componentes do sistema CC. A modelagem dos sistemas CA foi simplificada mantendo-se, no entanto, todos os aspectos importantes que influenciam a operação de um elo de corrente contínua.

Os sistemas de potência estão sujeitos a dois tipos distintos de perturbações:

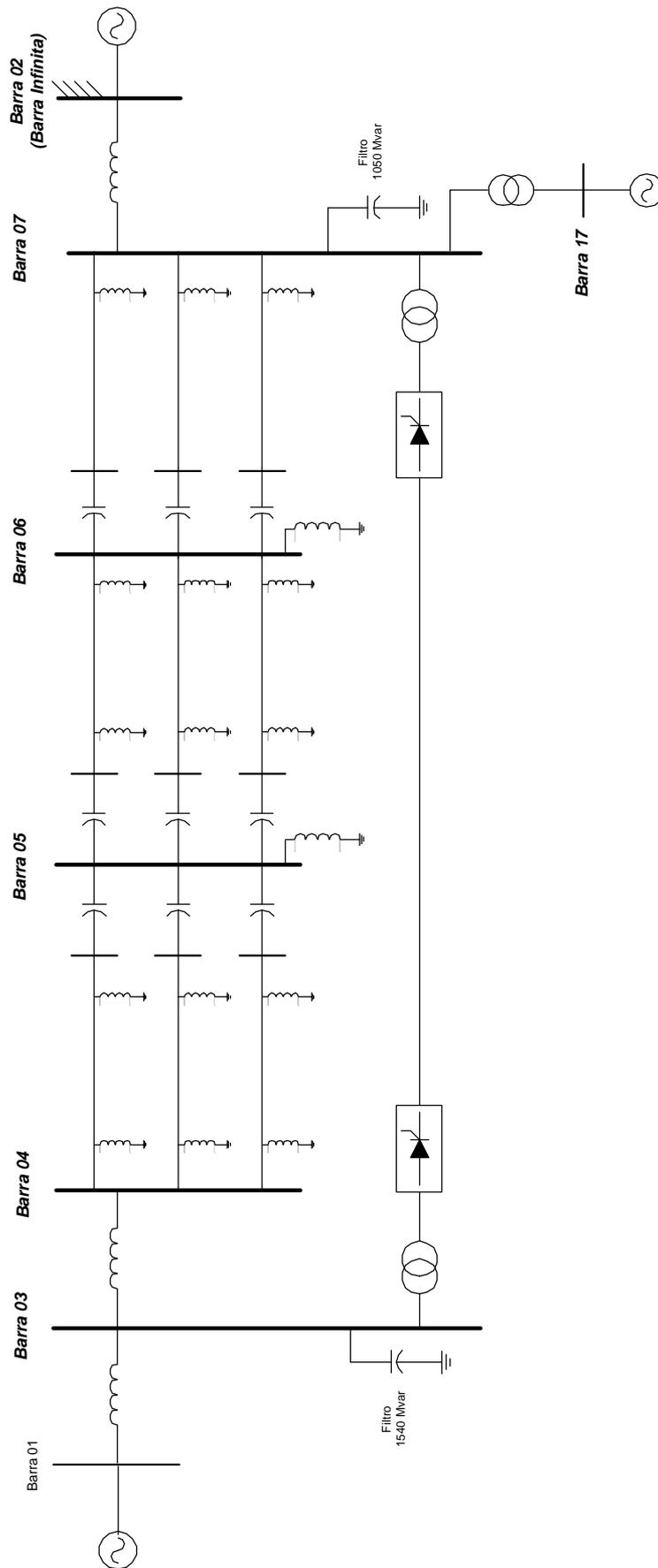
- Faltas (grandes perturbações)
- Pequenas alterações nas cargas e nos níveis de operação (pequenas perturbações)

Dado o escopo deste trabalho de tese, o enfoque principal contempla o desempenho do sistema CA/CC sob grandes perturbações, o que significa que a modulação a pequenos sinais não será considerada.

### **4.1 SISTEMA CA/CC ANALISADO**

O diagrama unifilar do sistema analisado é apresentado na Figura 4.1. Este sistema incorpora alguns elementos do sistema de transmissão de Itaipu, tais como geradores, dados de linhas de transmissão, compensadores síncronos e reatores “shunt”.

Todos os geradores e compensadores síncronos foram representados por um modelo de pólos salientes considerando os efeitos subtransitórios (3 enrolamentos de rotor) e dotados de sistemas de excitação de ação rápida.



**Figura 4.1** – Diagrama Unifilar do Sistema Analisado

O elo CCAT é constituído de um bipolo com despacho de 1400 MW por pólo. A geração da Barra 01 é constituída de 10 unidades geradoras de 737 MVA operando com fator de potência 0,968. Os três compensadores síncronos representados no sistema têm 300 MVA de capacidade cada. Os filtros de harmônicos são constituídos de bancos de capacitores totalizando 1540 e 1050 Mvar do lado do retificador e do inversor, respectivamente.

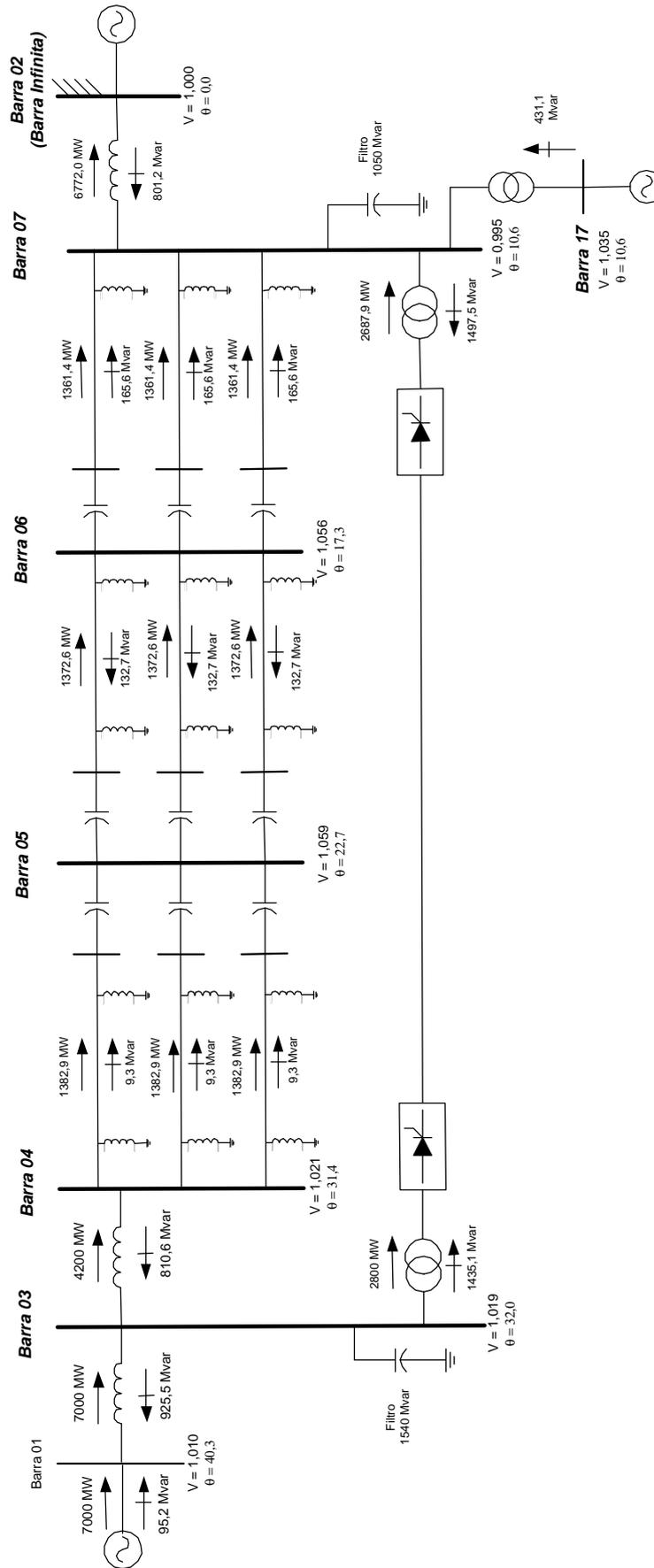
Na Figura 4.2 estão plotados o fluxo de potência, as tensões e ângulos dos barramentos CA para o caso base do sistema CA / CC analisado. O ajuste deste caso base foi conduzido de forma a alcançar um ponto de operação que não representasse uma condição extrema em regime permanente.

Os dados completos referentes à este sistema podem ser encontrados no Apêndice A.

#### ***4.1.1 PREMISSAS PARA ANÁLISE DO SISTEMA CA / CC SOB CONTINGÊNCIAS***

Neste trabalho de tese, o desempenho do sistema de controle do elo CCAT foi estudado através da simulação de diversas contingências no sistema. A análise seguiu as seguintes premissas:

- O principal critério para a estabilidade é que as máquinas mantenham-se em sincronismo durante a transição de uma condição operativa em regime permanente para outra, causada por uma perturbação de qualquer natureza;
- As emergências referentes à perda de elementos de transmissão, no sistema CA, corresponderam a contingências simples, com a aplicação de falta monofásica seguida de retirada do elemento sob defeito após 100 ms, que é o tempo de atuação da proteção mais o tempo da abertura do disjuntor.



**Figura 4.2 – Fluxo de Potência, Tensões e Ângulos das Barras - Caso Base**

Os modelos de elo são implementados tomando por referência o caso base apresentado na Figura 4.2. Nas análises conduzidas, foram simuladas diversas contingências nos sistemas CA e CC, quais sejam:

- Degrau na ordem de potência (ou corrente);
- Degrau em  $\gamma_{ref}$  (inversor).
- Curto-circuito monofásico na Barra 03 seguido de perda de elementos de transmissão entre a Barra 03 e a Barra 04;
- Curto-circuito monofásico na Barra 07 seguido de perda de elementos de transmissão entre a Barra 02 e a Barra 07;
- Curto-circuito monofásico na Barra 07 seguido de perda de três compensadores síncronos (300MVA cada);
- Curto-circuito franco na barra CC do lado do inversor do pólo 1;
- Curto no meio da linha CC;
- Bloqueio do pólo 1 do elo CCAT;

#### **4.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS ACERCA DOS MODELOS DE ELO CCAT UTILIZADOS**

Os modelos do elo CCAT foram desenvolvidos no intuito de descrever com relativa fidelidade o comportamento de um sistema real. Optou-se por não levar em consideração um grau de detalhamento exagerado tal que representassem efeitos que não afetam a estabilidade do sistema.

Procurou-se, portanto, uma representação que pudesse levar em consideração os efeitos relevantes à estabilidade eletromecânica do sistema.

Verificou-se a influência de algumas simplificações no controle do elo CCAT, de forma a observar o quanto podem afetar os resultados dos estudos dinâmicos.

A modelagem dinâmica da malha de controle do elo CCAT, num programa de

estabilidade eletromecânica, restringe-se basicamente às funções referentes aos controles de bipolo (Master Control) e pólo. O controle das pontes conversoras atua de forma muito rápida face à baixa frequência dos fenômenos envolvidos na estabilidade. O que torna para estes fenômenos, um controle de atuação instantânea [2]. O único elemento do Controle das Pontes Conversoras ser que merece representado dinamicamente numa análise de estabilidade é a malha composta pelo VCO (Voltage Controlled Oscillator).

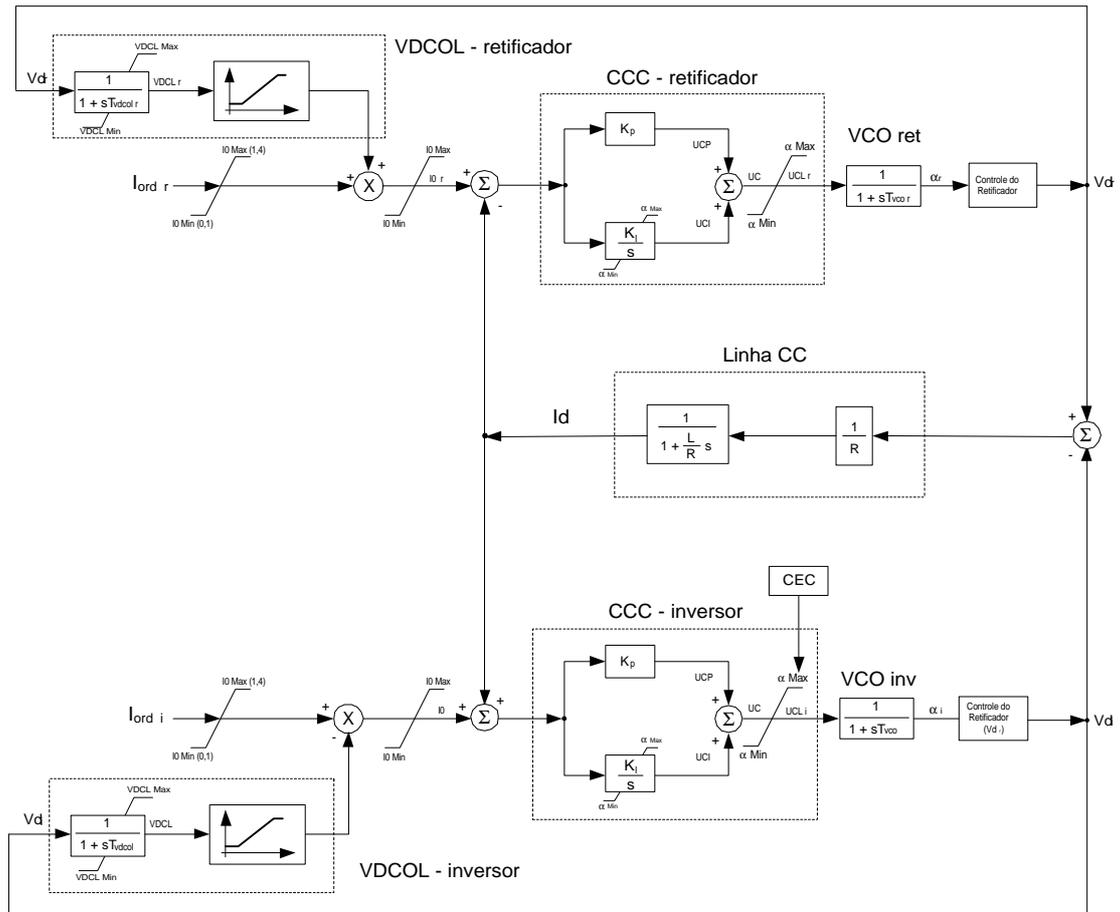
Foram desenvolvidos 3 modelos distintos para a representação do Elo CCAT. Cada um dos modelos desenvolvidos será descrito e analisado em detalhes nos subitens subsequentes. A validação destes modelos frente ao modelo “built-in” utilizado no programa ANATEM do CEPTEL, é objeto de análise específica apresentada no Apêndice B.

Cabe ressaltar que, por questões de simplificação, o limitador de alfa mínimo (AML) no retificador não foi representado.

### **4.3 MODELO 01**

O Modelo 01 de elos CCAT foi desenvolvido visando representar apenas os componentes essenciais do controle do elo, em outras palavras, o VDCOL, o CCC, VCO (Modelo A) e o CEC. A Figura 4.3 apresenta o diagrama completo do Modelo 01 de elo CCAT considerado. Adicionalmente, a Figura 4.40, mostra o detalhe do diagrama do CEC utilizado.

Cabe ressaltar que este modelo permite ao elo CCAT apenas o modo de operação assíncrono, ou seja, distúrbios ocorridos em um dos pólos, tais como: alterações na ordem de corrente e bloqueio de pólos, não serão detectados pelo outro pólo.

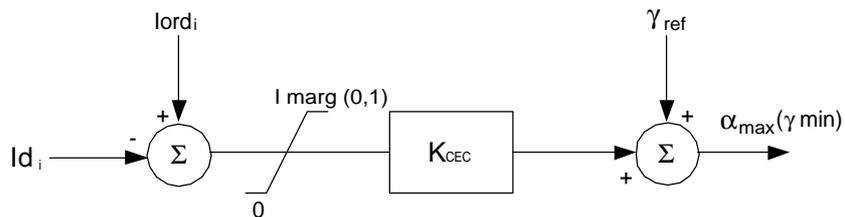


**Observação:** Tanto no inversor quanto no retificador, a constante de tempo não linear do VDCOL segue a seguinte lógica:

$$V_{dc} > VDCL \rightarrow T_{vdcol} = T_{up}$$

$$V_{dc} < VDCL \rightarrow T_{vdcol} = T_{down}$$

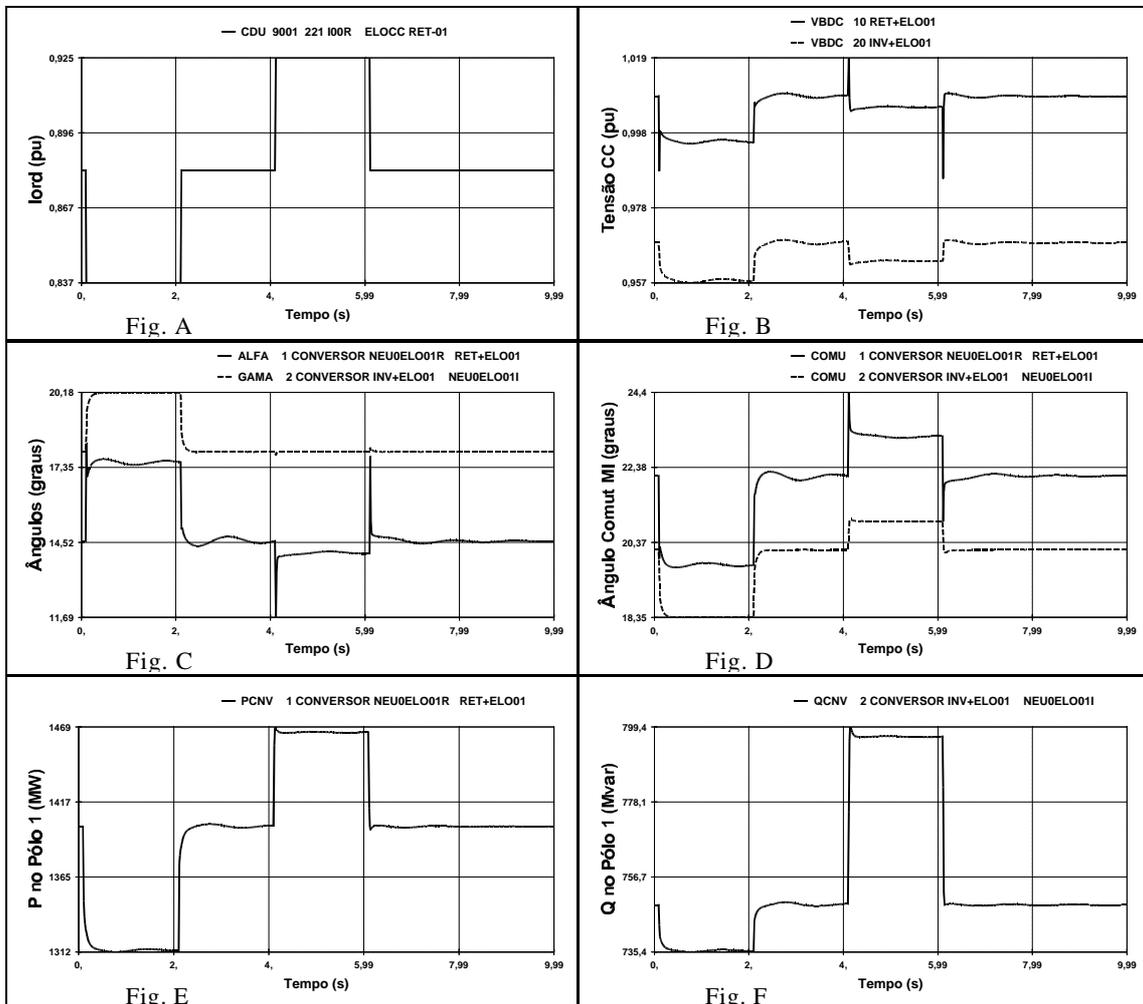
**Figura 4.3 - Diagrama completo do Modelo 01 do Elo CCAT**



**Figura 4.4 – Diagrama de Blocos do CEC**

**4.3.1 ANÁLISE DO ELO CCAT SOB CONTINGÊNCIAS - MODELO 1**

- Degrau na Ordem de Corrente



**Figura 4.5A** – Desempenho do Elo CCAT – Degrau na Ordem de Corrente

A Figura 4.5A mostra o desempenho do Modelo 01 quando da aplicação de um degrau de  $-5\%$  na corrente de ordem do retificador, durante 2 segundos. Após este período é aplicado um novo degrau de  $+5\%$  de forma que a ordem de corrente possa voltar ao seu valor inicial, conforme ilustra o gráfico referente a ordem de corrente no pólo 1 (Fig. A).

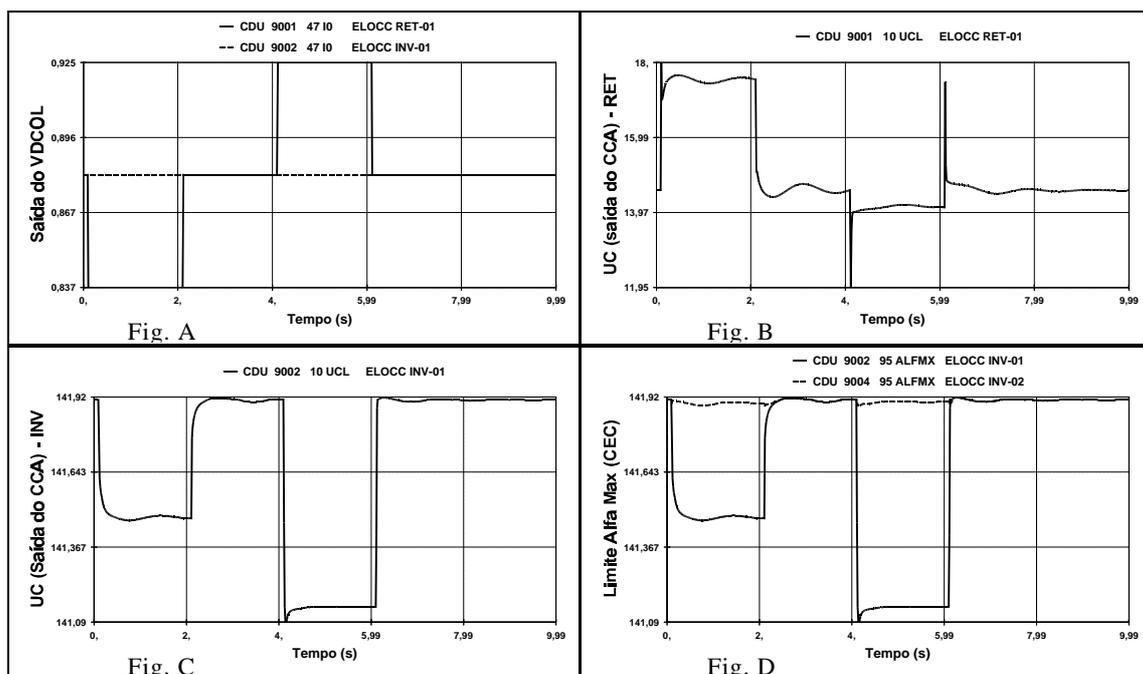
O sistema de controle de corrente do pólo 1 (Fig. C) detecta o erro entre a corrente de linha e de ordem ocasionada pela nova ordem de corrente e atua no sentido de aumentar o ângulo  $\alpha$  do retificador até o valor necessário para manter a nova ordem

de corrente desejada. O aumento do ângulo de disparo do retificador significa em outras palavras uma redução na tensão  $V_{d_r}$  (Fig. B). De forma a manter a ordem desejada, é necessário que o controle de corrente do inversor também atue no ângulo  $\alpha$  do inversor, de forma a reduzir a tensão  $V_{d_i}$ . Isto significa que o ângulo de extinção  $\gamma$  será levado a um valor acima do valor de  $\gamma_{\min}$ .

Como a nova ordem de corrente é menor do que a ordem original, nos dois segundos iniciais da simulação (Fig. A), a potência transmitida também será menor e, conseqüentemente o consumo de potência reativa.

Após o período inicial de dois segundos, num novo degrau é aplicado de forma que a corrente de ordem volte ao valor original. A atuação do controle é de forma a reduzir os respectivos ângulos  $\alpha$  das conversoras (Fig. C), aumentando assim as tensões  $V_{d_r}$  e  $V_{d_i}$  (Fig B).

No período seguinte, um novo degrau é aplicado à ordem de corrente, porém no sentido de aumentá-la. Após um período de dois segundos, a ordem de corrente é novamente trazida ao seu valor original. O comportamento do controle de corrente é o esperado, ou seja, atua no sentido de modificar os ângulos de disparo do retificador e de extinção do inversor, para que a nova ordem seja acomodada.



**Figura 4.5B** – Desempenho do Elo CCAT – Degrau na Ordem de Corrente

A Figura 4.5B mostra o desempenho dos demais controles implementados do Modelo 01, ou seja, o VDCOL e o CEC. No gráfico referente à saída do VDCOL (Fig. A), pode-se notar que, como a alteração na ordem de corrente foi aplicada apenas na ordem de corrente do retificador, o VDCOL do inversor não altera a ordem associada a este conversor, uma vez que esta permanece inalterada.

A ação de controle de CEC (Fig. D), por sua vez altera, a cada degrau imposto na ordem de corrente do retificador, o limite de  $\alpha_{\max}$  do controle de corrente do inversor de forma a permitir a excursão desejada do ângulo de extinção  $\gamma$ .

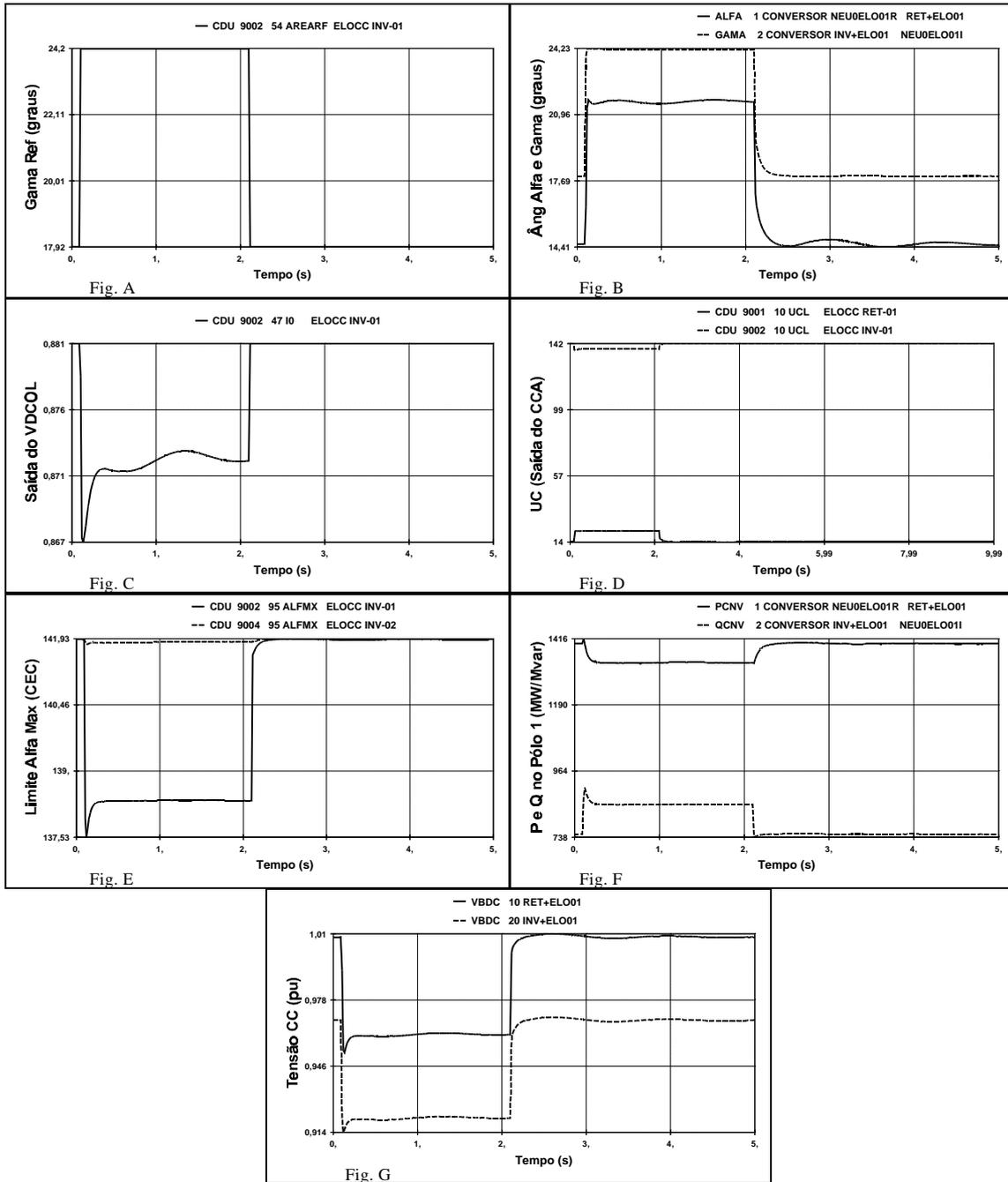
Como este modelo permite apenas o modo de operação assíncrono, pode-se observar pelo gráfico da saída do CEC que o inversor do pólo 2 não sofre uma ação de controle como a do pólo 1. Isto se dá devido ao fato de que a alteração na ordem de corrente do pólo 1 não é detectada pelo pólo 2.

- Degrau em  $\gamma_{\text{ref}}$

A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos quando da aplicação de um degrau positivo (+ 5%) no valor da referência do ângulo de extinção  $\gamma$  do inversor do pólo 1.

A alteração do valor da referência do ângulo  $\gamma$  do pólo 1 (Fig. A) ocasiona um aumento instantâneo no ângulo de extinção (Fig. B). Como consequência, há uma redução na tensão CC do lado do inversor (Fig G). Como a ordem de corrente dos pólo não foi alterada, e portanto precisa ser mantida, o ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ) também sofre um aumento. Em outras palavras a tensão CC no retificador também precisa ser reduzida para que a ordem de corrente seja mantida no valor especificado.

O novo valor de  $\gamma_{\text{ref}}$  é mantido por um período de dois segundos. Após este período, o valor de  $\gamma_{\text{ref}}$  é trazido de volta ao valor original através de um degrau negativo (Fig. A). As ações de controle associadas atuam alterando novamente os ângulos de disparo (retificador) e de extinção (inversor) (Fig.B)de maneira que as tensões CC retornem aos valores originais (Fig G).



**Figura 4.6** – Desempenho do Elo CCAT – Degrau  $\gamma_{ref}$

Com a queda na tensão CC do lado do inversor, o VDCOL desta estação conversora aplica o fator de correção correspondente (Fig.C). Isto significa que a ordem de corrente é ligeiramente reduzida. O VDCOL do retificador não atua devido ao fato da variação na tensão CC do retificador não ser suficiente para sensibilizar o respectivo controle.

A ação associada ao controle de corrente (Fig. D) atua conforme o esperado, ou seja, altera os ângulos de disparo e extinção para levar as tensões CC tanto do retificador quanto do inversor para os valores que permitam manter a ordem de corrente especificada.

Durante o degrau em  $\gamma_{ref}$ , o CEC atua no limite máximo do ângulo  $\alpha$  do controle de corrente do inversor de forma a permitir a excursão necessária do ângulo de extinção (Fig. E).

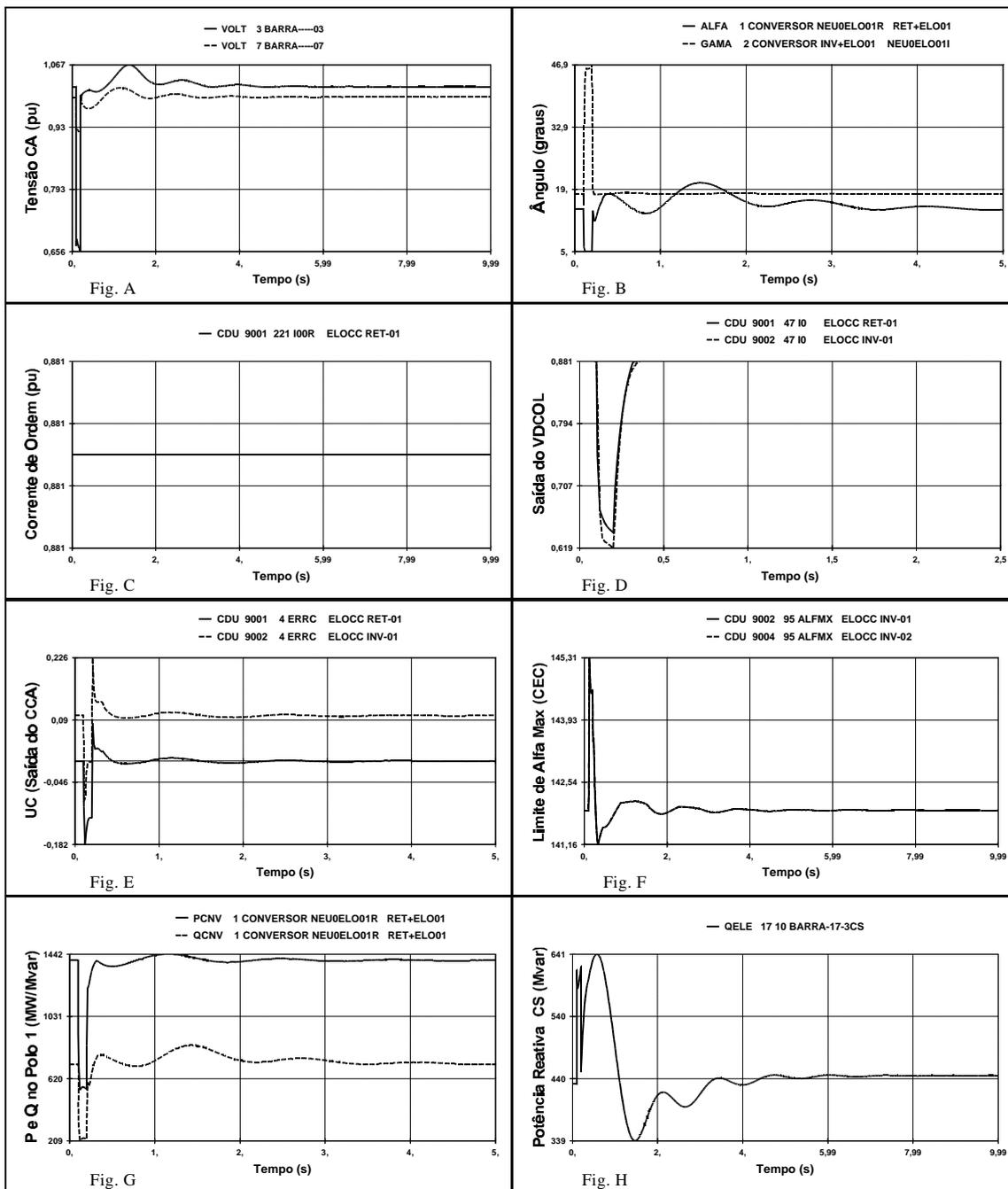
O motivo pelo qual não foi aplicado um degrau negativo no valor original da referência de gama é que as ações de controle associadas levariam a um ângulo  $\gamma$  inferior ao  $\gamma_{min}$ , uma vez que em regime normal de operação o inversor já opera bem próximo ao  $\gamma_{min}$ , com intuito de maximizar a tensão CC no lado do inversor (Fig. B).

- Curto-Circuito Monofásico Na Barra CA do Retificador (Barra – 03)

Sob este distúrbio, a tensão CC nos conversores sofre uma redução acentuada. Conseqüentemente, o ângulo de disparo alfa (do retificador) tem uma elevação tal que o inversor passa a assumir o controle da corrente de ordem (Fig B). A ação de controle do VDCOL de ambos os conversores atua de forma a reduzir a ordem de corrente, auxiliando na recuperação das tensões CC quando da eliminação da falta (Fig. D).

O controle de corrente (Fig. E) recebe o sinal de erro ocasionado pela redução nas tensões CC e gera o sinal para a alteração dos ângulos das conversoras. No caso do inversor, o ângulo de extinção é reduzido até o limite de  $\gamma_{min}$  durante o defeito. Para que a alteração no valor de  $\gamma$  seja possível, o CEC altera o limite máximo do ângulo  $\alpha$  (Fig. F). Quanto maior for o valor do ângulo  $\alpha$  do inversor, menor será o ângulo de extinção. Neste caso, é necessária uma grande variação do ângulo  $\alpha$  do inversor para que o ângulo  $\gamma$  possa ser reduzido tanto quanto o necessário para a operação do sistema.

A Figura 4.7 apresenta os resultados obtidos quando de um distúrbio ocasionado por um defeito monofásico na barra CA do retificador.



**Figura 4.7 – Desempenho do Elo CCAT – Falta Monofásica na Barra CA do Ret.**

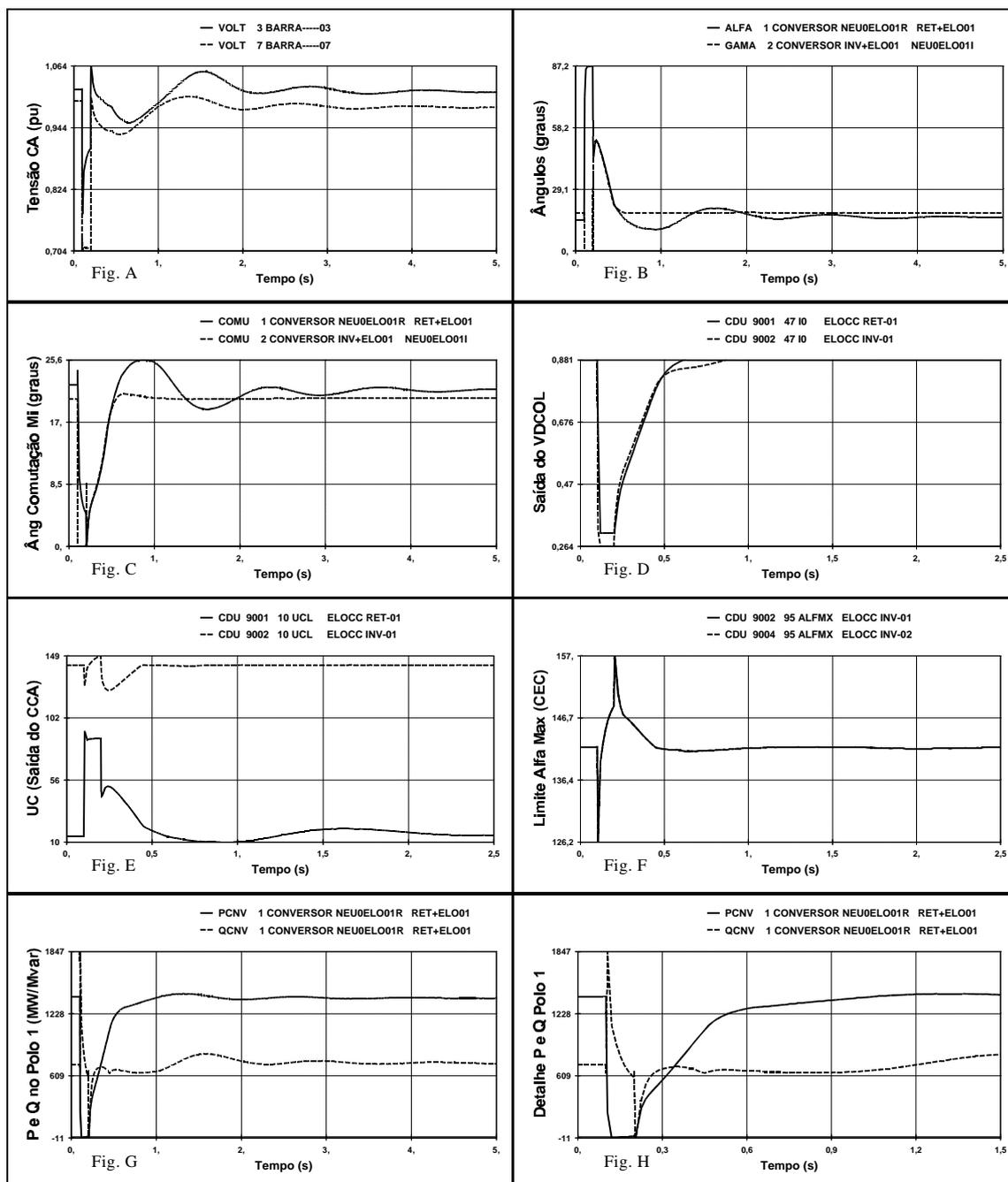
- Curto-Circuito Monofásico Na Barra CA do Inversor (Barra – 07)  
Seguido da Perda de 3 CS na Barra –17 (900MVA)

A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos quando de um distúrbio ocasionado por um defeito monofásico na barra CA do inversor seguido da perda de três compensadores síncronos no lado do inversor.

Esta contingência é considerada bastante severa para o desempenho do elo, uma vez que representa a perda total de uma fonte importante no suporte de potência reativa necessária à operação do inversor.

Durante o defeito, o ângulo  $\alpha$  do retificador é levado a quase  $90^\circ$ . O ângulo  $\gamma$  do inversor, por sua vez sofre uma redução na tentativa de manter a tensão CC (Fig. B). Esta condição extrema acarreta falha de comutação no elo CCAT enquanto o defeito não é eliminado. Quando de sua eliminação, o elo tenta se recuperar e prosseguir no processo de comutação de suas válvulas (Fig. C). No entanto, no instante imediatamente após a limpeza da falta, o elo sofre um bloqueio devido às tensões ainda não terem alcançado patamares que permitam a comutação segura (Fig. A). Tão logo exista tensão para a comutação, o elo desbloqueia e a comutação volta a ocorrer normalmente. Neste caso, o bloqueio ocorreu em 3 ms após a eliminação do defeito e o desbloqueio 1 ms após o bloqueio.

A ação dos controles do elo é a esperada, ou seja, o VDCOL (Fig. D) atua no sentido de reduzir a ordem de corrente para auxiliar na recuperação das tensões, o controle de corrente gera os sinais que propiciam as excursões necessárias dos ângulos de disparo e de extinção (Fig. B).



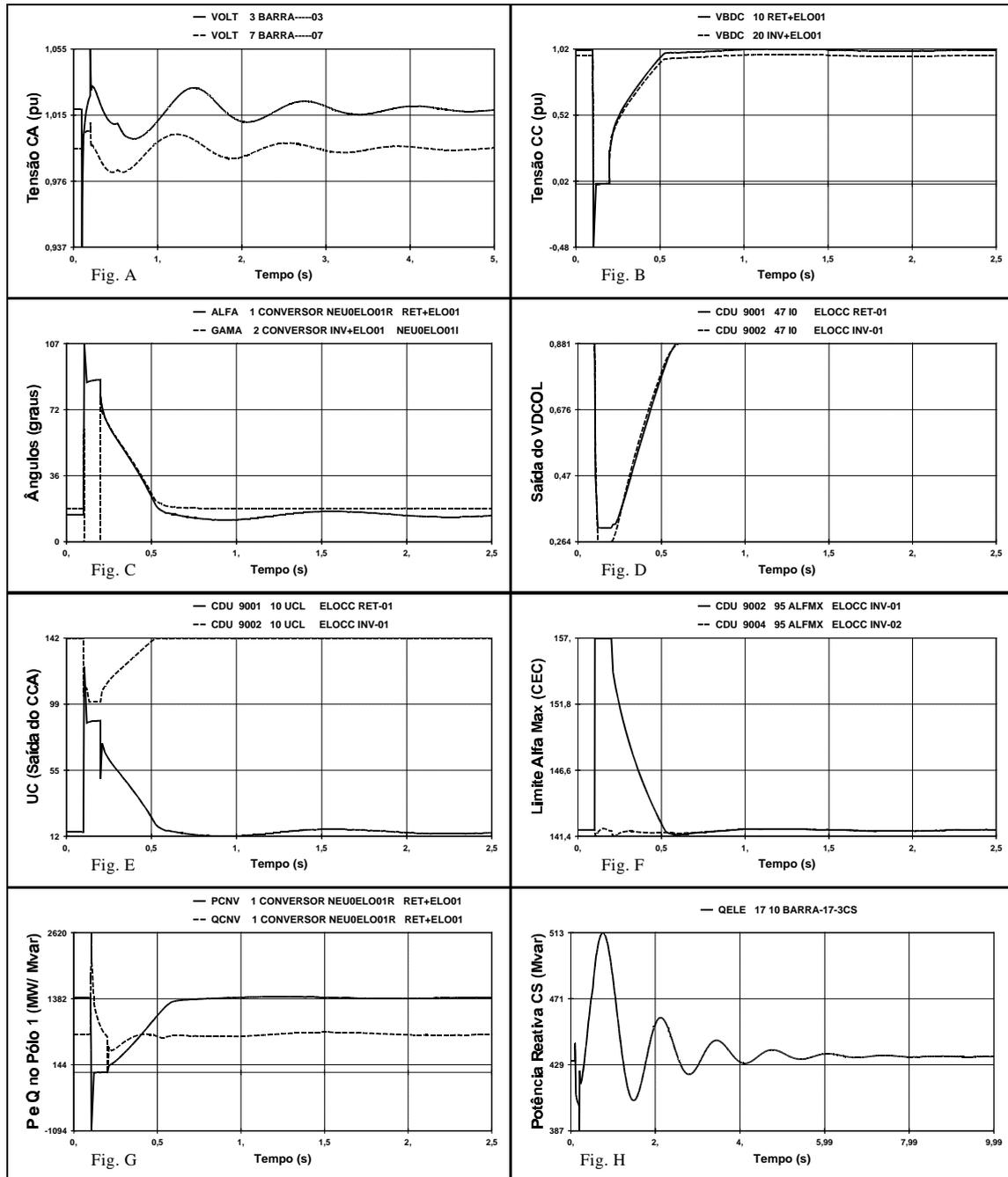
**Figura 4.8** – Desempenho do Elo CCAT – Falta Monofásica na Barra CA do Inv.

- Curto-Circuito Franco no Meio da Linha CC

Neste caso, um defeito franco foi aplicado no pólo 1 durante 100 ms. Após este período o defeito é eliminado, sem a retirada de operação de elementos do sistema.

Durante o defeito, o inversor do pólo 1 é bloqueado. A recuperação ocorre 1 ms

após a eliminação da falta. A Figura 4.9 apresenta os resultados obtidos.



**Figura 4.9** – Desempenho do Elo CCAT – Defeito Franco no meio da Linha CC

Pode-se notar que, durante o defeito e com o inversor bloqueado, a potência do retificador inverte o sentido transitoriamente, como pode ser visto através do gráfico de P e Q no retificador do pólo 1 (Fig. G). Isto, por si só, extingue o defeito na linha CC.

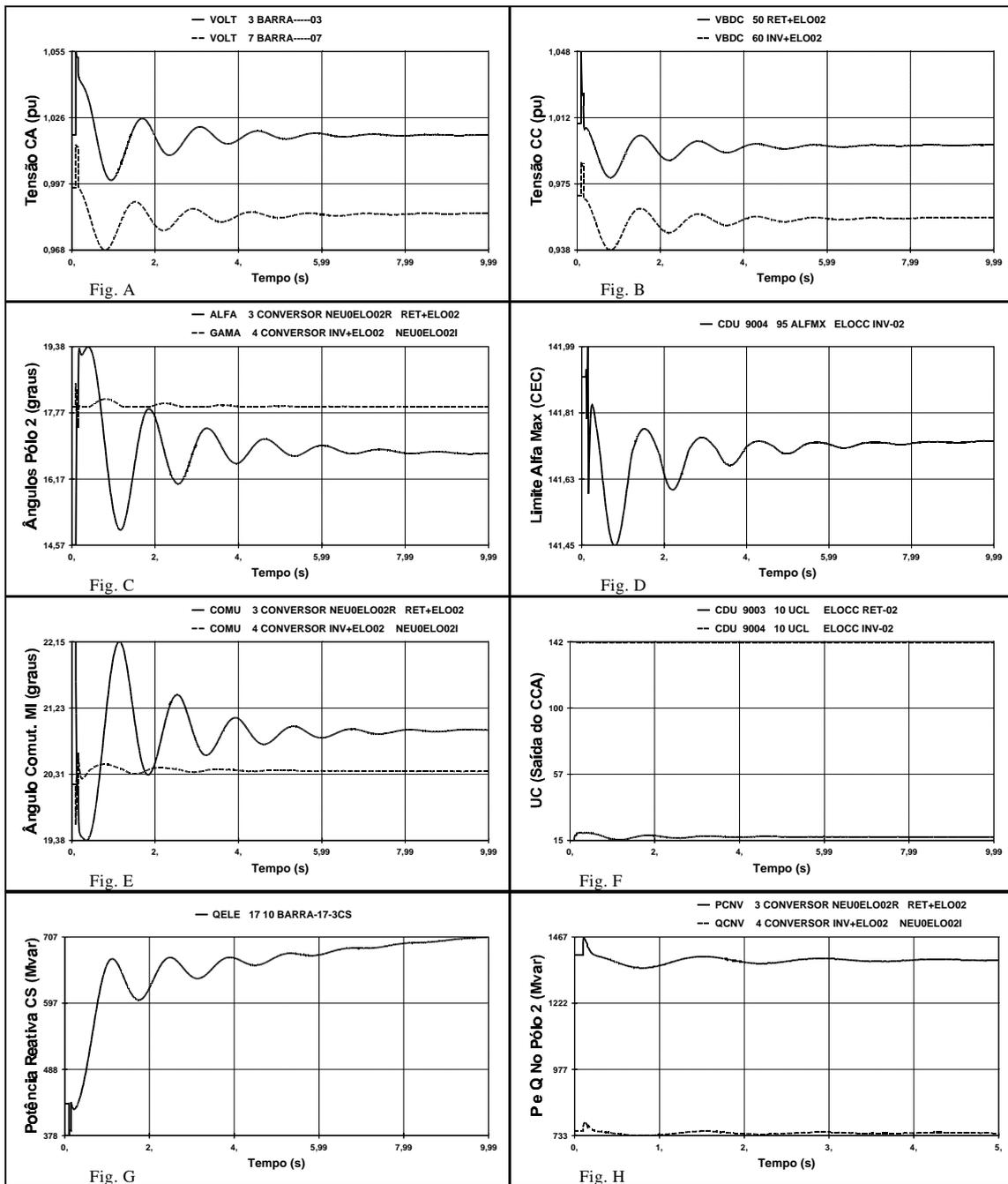
No modo de operação bipolar, a situação operativa do pólo 2 não é alterada de

forma significativa quando de um defeito na linha CC do pólo 1. Isto porque o retorno passa a ser pela terra. O gráfico da saída do CEC indica esta condição (Fig. F). Enquanto se faz necessária uma ação de controle que permita uma grande excursão angular do  $\gamma$  do inversor do pólo 1, no pólo 2 a ação de controle não é significativa.

- Bloqueio de um Pólo do Elo CCAT (Pólo 1)

Neste caso, o pólo 1 é bloqueado e não sofre ação de desbloqueio até o fim da simulação. A Figura 4.10 apresenta os resultados obtidos.

Como já foi descrito anteriormente, o Modelo 01 permite apenas o modo de operação assíncrona, o que significa em outras palavras, que nenhuma ação de controle será tomada pelo controle do pólo remanescente no sentido de assumir a ordem de corrente do pólo bloqueado. Sob esta condição, as ações de controle no pólo 2 são exclusivamente destinadas a adequar o sistema CC às variações no sistema CA ocasionadas pelo bloqueio do Pólo 1. As tensões nas barras CA do retificador e inversor sofrem uma alteração significativa (Fig. A), uma vez que a potência transmitida pelo pólo bloqueado é assumida pelo sistema em corrente alternada.



**Figura 4.10 – Desempenho do Elo CCAT – Bloqueio do Pólo 1**

#### 4.4 MODELO 02

O Modelo 02 foi desenvolvido visando uma representação mais completa do elo CCAT. Para tanto, além dos controles representados no Modelo 01, foram implementados controles adicionais, quais sejam:

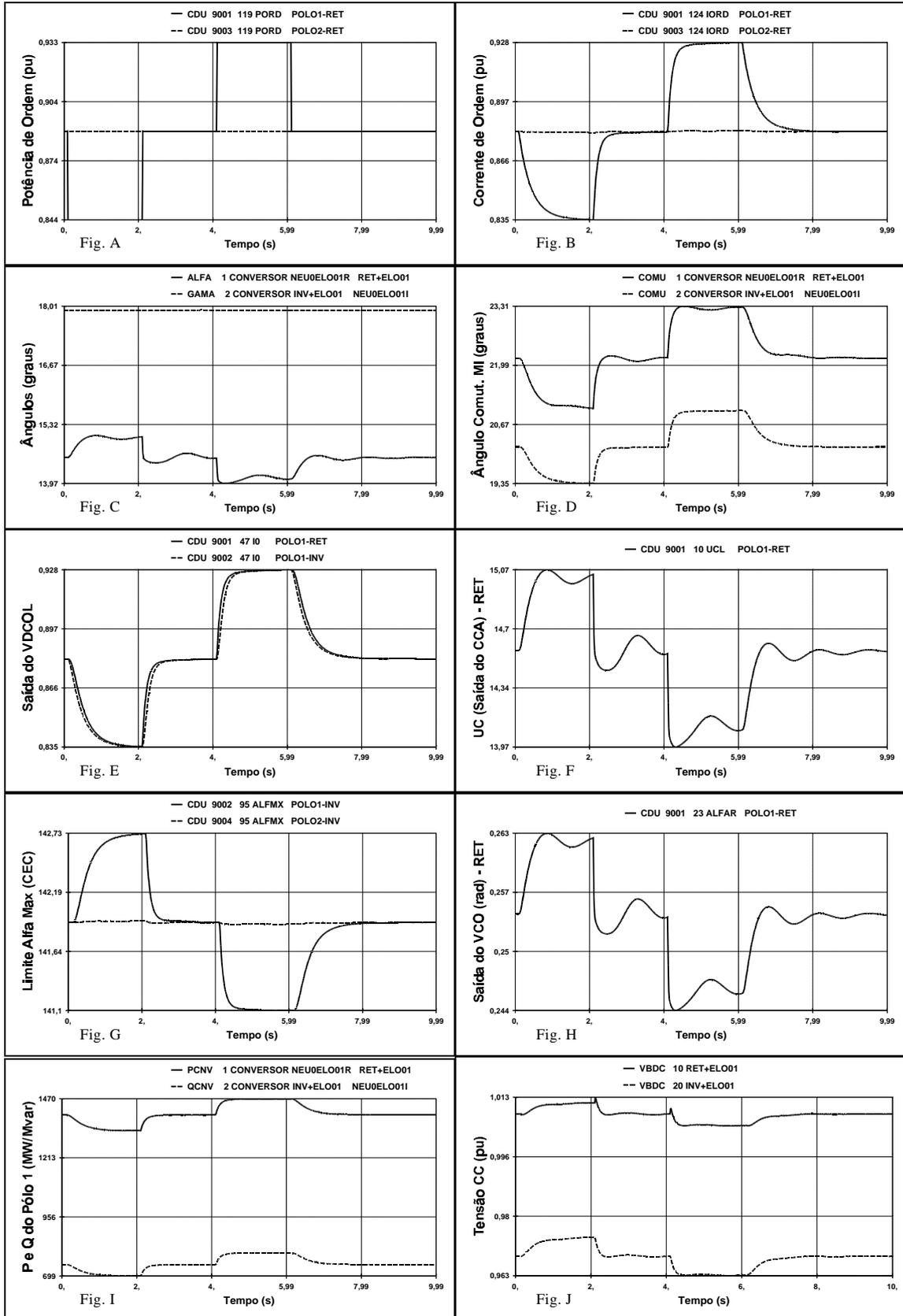
- Controle de potência, o qual permite a operação no modo Controle de Potência Síncrona, onde a ordem de corrente de um pólo é calculada através da divisão da ordem de potência do bipolo ( $P_{ord}$ ) pelo valor da soma das tensões dos pólos de um mesmo bipolo;
- O congelamento de medição de tensão CC durante condições de distúrbio, de maneira que o elo opere virtualmente em controle de corrente durante um período de aproximadamente dois segundos;
- Limitador de correntes de sobrecarga de curta duração (STOL) para os casos em que ocorram sobrecargas de corrente no pólo;
- O Modelo B de VCO que introduz os limites  $\Delta\alpha_{max}$  e  $\Delta\alpha_{min}$  na excursão dos ângulos  $\alpha$  do retificador e inversor.

A Figura 4.11 apresenta o diagrama completo do modelo de elo CCAT considerado.

A validação deste modelo frente ao modelo “built-in” utilizado no programa ANATEM do CEPEL e apresentada no Apêndice B.

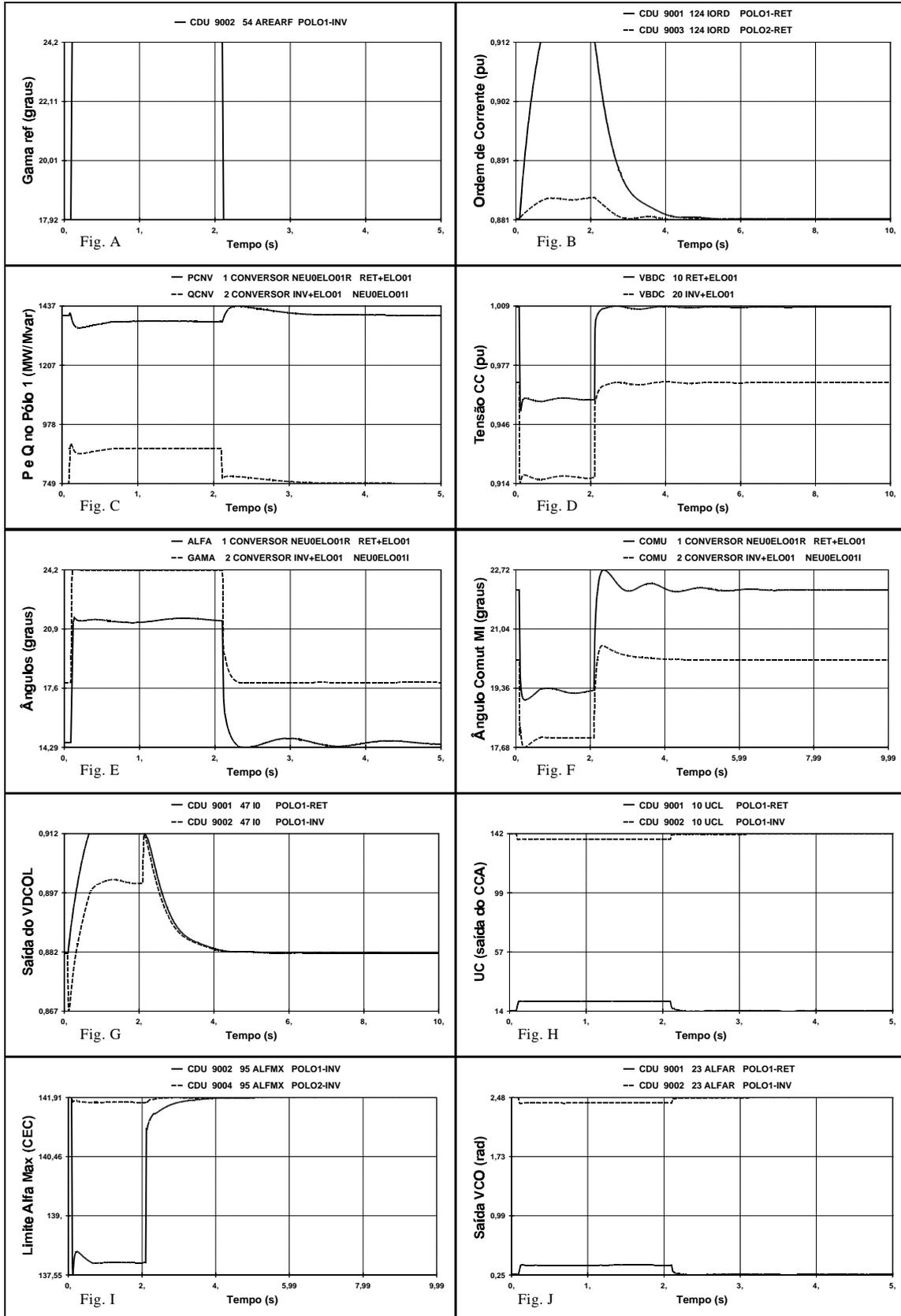


• Degrau na Ordem de Potência



**Figura 4.12** – Desempenho do Elo CCAT – Degrau na Ordem de Corrente

- Degrau em  $\gamma_{ref}$



**Figura 4.13 – Desempenho do Elo CCAT – Degrau  $\gamma_{ref}$**

Em ambos os distúrbios, a análise comparativa entre os gráficos referentes à saída do regulador de corrente e do VCO mostra que este último não gera ação de controle no sentido de alterar o ângulo de disparo  $\alpha$ . Em outras palavras, para estas condições apresentadas a representação do modelo de VCO, com ou sem detalhamento adicional, não influencia o desempenho dinâmico do elo CCAT e, portanto, poderia ser desprezada.

- Curto-Circuito Monofásico Na Barra CA do Retificador (Barra – 03)

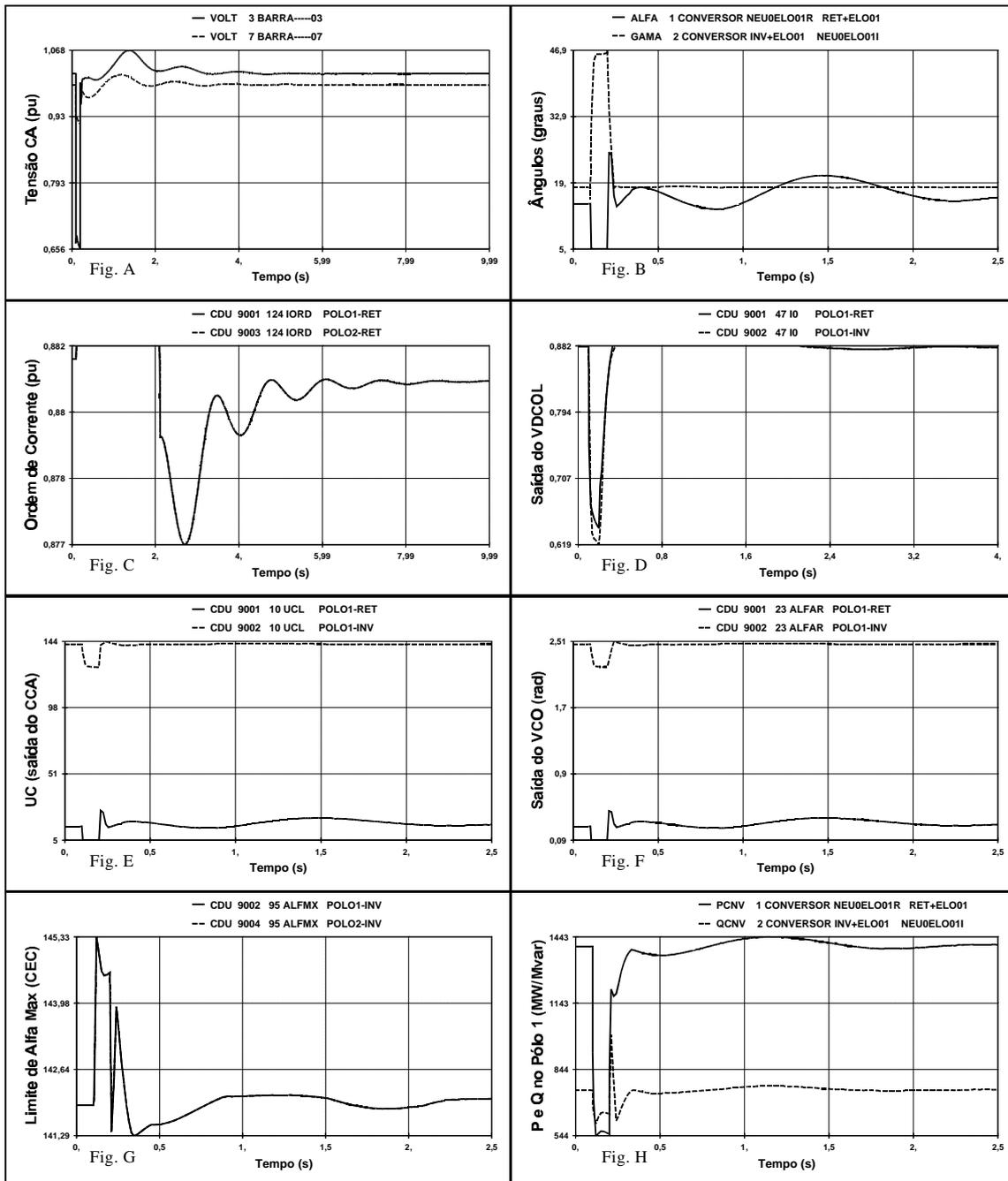
A Figura 4.14, a seguir, mostra o desempenho do elo CCAT quando da ocorrência de um defeito monofásico na barra CA do retificador.

Os gráficos indicam alguns aspectos relevantes no desempenho do elo, quais sejam:

A ordem de corrente dos pólos 1 e 2 do retificador é limitada a um valor correspondente à tensão CC medida e congelada pelo “Master Control” (Fig. C). Este congelamento permanece por aproximadamente dois segundos após a eliminação do defeito e é correto afirmar que, durante este tempo, o elo se mantém em controle de corrente de ordem.

O ângulo de disparo  $\alpha$  do retificador é levado ao seu valor mínimo pelo regulador de corrente, enquanto que o ângulo  $\alpha$  excursions até um valor em que a ordem de corrente possa ser mantida, ou seja, o inversor assume o controle de corrente em detrimento do retificador (Fig. B).

Cabe ressaltar que neste trabalho de tese, por questões de simplificação, não foi considerada a limitação do ângulo  $\alpha$  mínimo (AML) no controle de corrente do retificador (CCC). Portanto, este limite foi representado como um limite estático. No entanto, A ação de controle do AML não evitaria que a ordem de corrente fosse assumida pelo inversor pois, nesta contingência, seria necessário um ângulo  $\alpha$  no retificador, menor do que  $5^\circ$ .



**Figura 4.14** – Desempenho do Elo CCAT – Falta Monofásica na Barra CA do Ret.

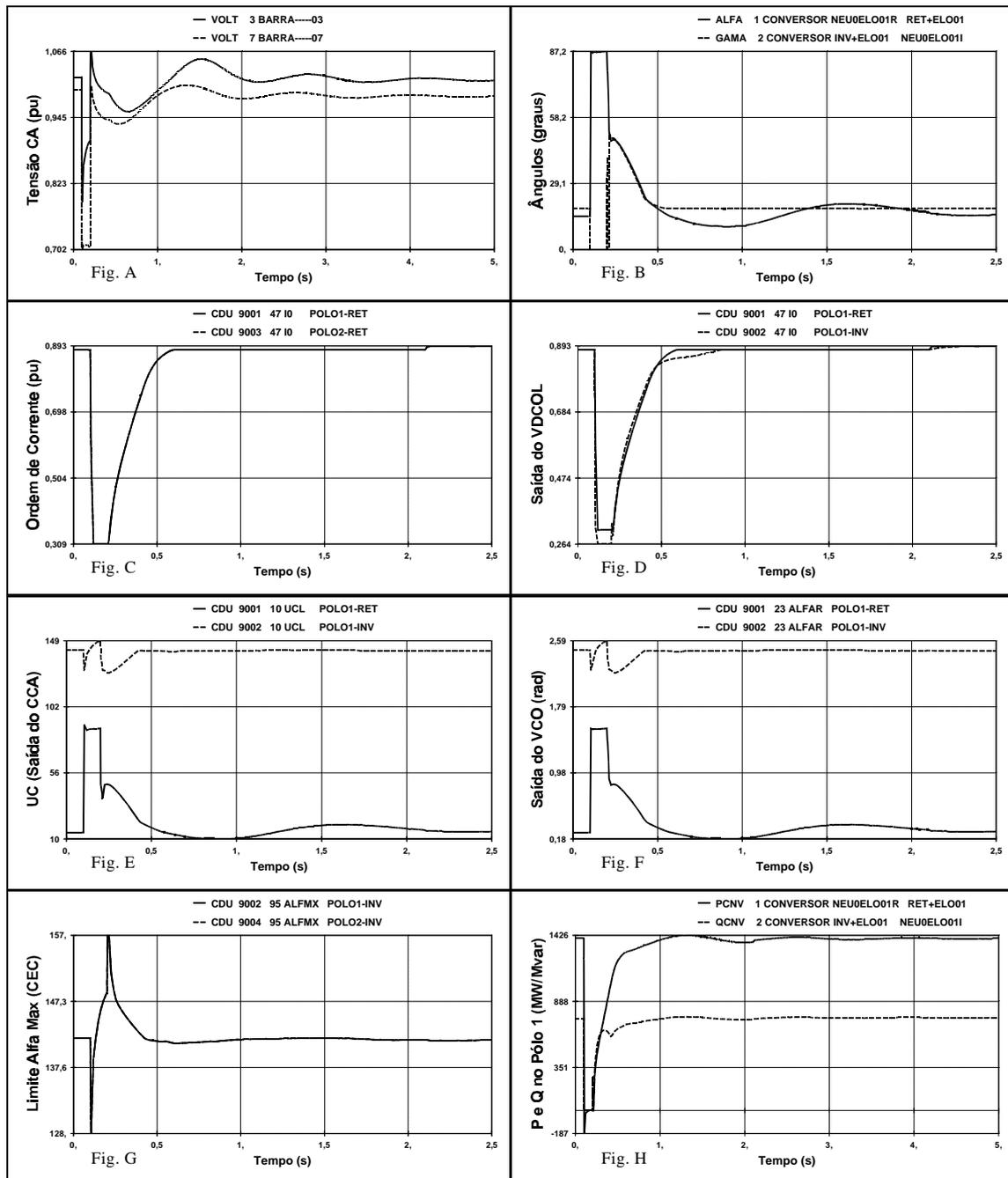
A ação de controle do VDCOL (Fig. D), tanto do retificador quanto do inversor, atua da forma esperada, isto é, detecta a queda nas tensões CC respectivas e reduz as ordens de corrente associadas a cada conversor. Durante o defeito cada VDCOL altera sua corrente de ordem a um valor correspondente ao  $v_{dcl}$  mínimo (tensão CC medida).

Através da comparação entre os gráficos de saída do CCC e do VCO (Figs. E e F, respectivamente), verifica-se que as condições impostas aos sistemas CA e CC por esta contingência não levam a uma ação de controle por parte do VCO, tanto do retificador, quanto do inversor.

- Curto-Circuito Monofásico Na Barra CA do Inversor (Barra – 07)  
Seguido da Perda de 3 CS na Barra –17 (900MVA)

Conforme foi descrito no Modelo 01, esta contingência é bastante severa para o sistema, uma vez que ela representa uma perda significativa no suporte de potência reativa do lado do inversor.

A Figura 4.15, a seguir, mostra o desempenho do elo CCAT quando da ocorrência desta contingência.



**Figura 4.15** – Desempenho do Elo CCAT – Falta Monofásica na Barra CA do Inv.

Durante o defeito na barra CA do inversor, ocorrem falhas de comutação sucessivas no elo CCAT. O ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ) atinge um valor próximo a  $90^\circ$  e o ângulo de extinção do inversor vai a zero graus (Fig. B). A potência no retificador chega a inverter, transitoriamente, o sentido de fluxo (Fig. H). Quando da eliminação do defeito, o elo se recupera e tenta prosseguir normalmente no processo de comutação. No entanto, devido às condições degradadas do sistema CA (Fig. A) do lado do inversor, ocorre o bloqueio dos dois pólos. Estes só são desbloqueados alguns milissegundos depois, quando as tensões CC das conversoras se encontram em condições mais favoráveis às comutações dos conversores.

A ação de controle do VDCOL, tanto do retificador quanto do inversor, atua da forma esperada, isto é, detectam a queda nas tensões CC respectivas e reduzem as ordens de corrente associadas a cada conversor (Fig. D).

A atuação do VDCOL do inversor merece atenção especial no que se refere à constante de tempo (não linear) para medição da tensão CC. Como o elo está se recuperando de uma falta e de uma falha de comutação após a eliminação do defeito. O VDCOL detecta esta condição e limita a taxa de crescimento da corrente através de um atraso adicional na medição da tensão CC, de maneira a evitar novas falhas de comutação no inversor.

Os demais controles atuam da forma esperada, ou seja, os reguladores de corrente (Fig. E) geram as ações de alteração dos ângulos de disparo e extinção, e o CEC atua no limite de  $\alpha_{\max}$  do regulador de corrente do inversor, de maneira a permitir a excursão necessária do ângulo  $\alpha$  (Fig. G).

Tomando por base o inversor, a comparação entre as saídas do regulador de corrente CCC e do VCO indica que há uma diferença entre o ângulo  $\alpha$ , calculado pelo regulador, e o medido (Fig. E e F, respectivamente). Segundo este modelo de VCO, o ângulo  $\alpha$  entre comutações sucessivas medido é da ordem de 0,5 % menor do que o ângulo  $\alpha$  calculado pelo CCC.

Embora a diferença não seja significativa, esta pode ser interpretada como uma indicação de quais condições de sistema podem levar à necessidade de implementação de modelos mais completos de VCO.

Mais especificamente, condições em que os distúrbios da rede CA (variações de tensão e ângulo na barra CA da conversora) são de tal magnitude que se refletem no controle do disparo das estações conversoras, tendo em vista que o controle de disparo e o sistema CA não são inteiramente desacoplados. Nesta simulação, a perda de 3 compensadores síncronos do lado do inversor acarreta o enfraquecimento do sistema CA associado.

- Curto-Circuito Franco no Meio da Linha CC

Neste caso, um defeito franco foi aplicado no pólo 1 durante 100 ms. Após este período o defeito é eliminado, sem a retirada de operação de elementos do sistema.

Durante o defeito, ocorre falha de comutação e o inversor do pólo 1 é bloqueado. A recuperação ocorre 6 ms após a eliminação da falta. A Figura 4.16 apresenta os resultados obtidos.

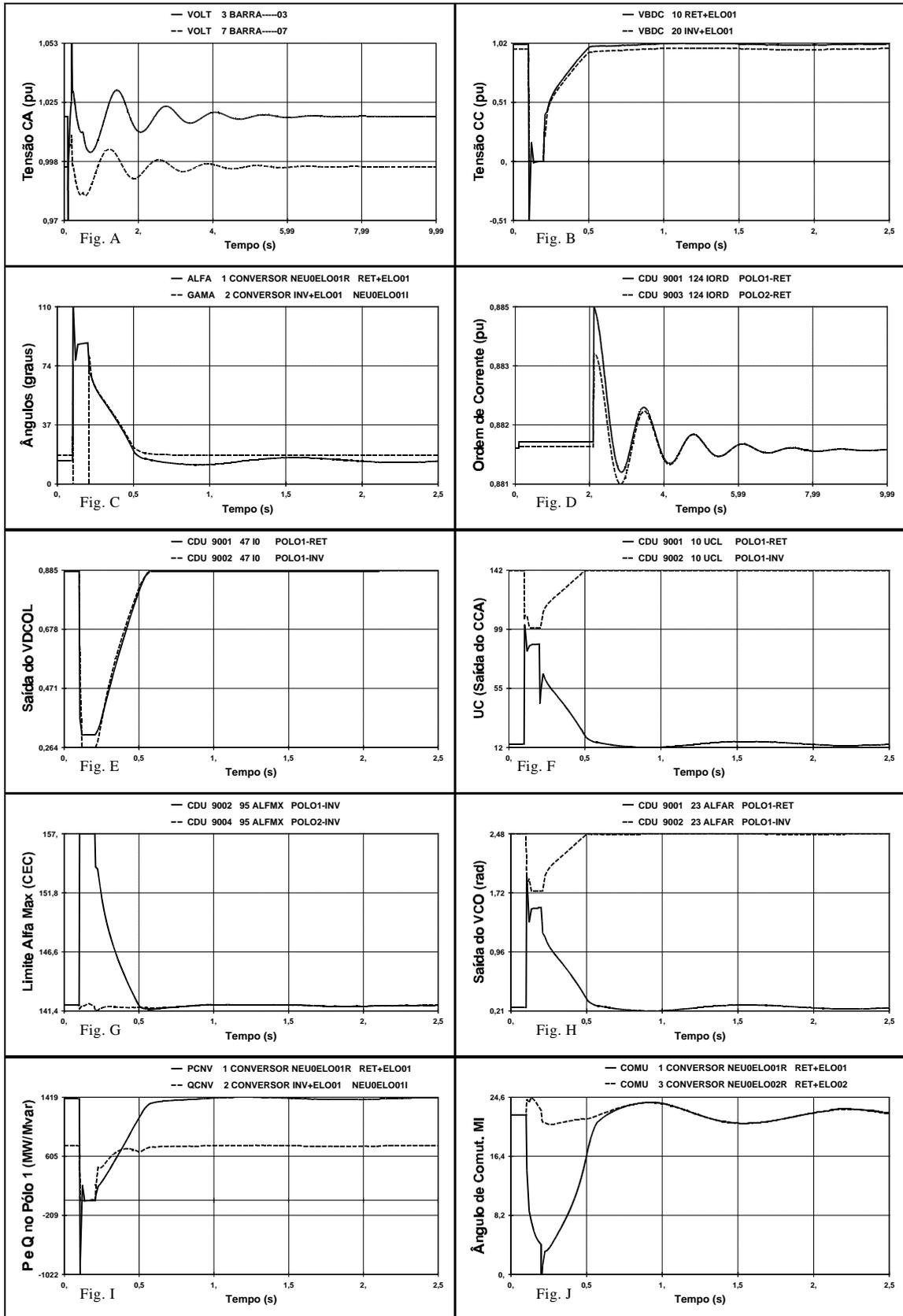
Durante o defeito, a medição da tensão CC é congelada e assim permanece por aproximadamente dois segundos após a eliminação do defeito. Quando da eliminação da falta, o pólo 1 se recupera e ambos os pólos operam em controle da ordem de corrente (Fig. D). Momentaneamente, é o inversor quem assume o controle de corrente.

Após a eliminação do defeito e, com a recuperação do pólo 1, os demais controles deste pólo atuam da forma esperada, ou seja, os reguladores de corrente (Fig. F) geram as ações de alteração dos ângulos de disparo e extinção (Fig. C), e o CEC atua no limite de  $\dot{a}_{\max}$  do regulador de corrente do inversor, de maneira a permitir a excursão necessária do ângulo  $\tilde{\alpha}$  (Fig. G).

Nos dois pólos, o VDCOL de ambos os conversores (Fig. E) detecta a queda nas tensões CC (Fig. B) respectivas e reduzem as ordens de corrente associadas a cada conversor (Fig. D). Uma vez que o pólo 1 está se recuperando de uma falta, o VDCOL dos conversores deste pólo também são responsáveis em limitar a taxa de crescimento da corrente de ordem de forma a evitar novas falhas de comutação.

Pode-se notar que, durante o defeito e com o inversor bloqueado, a potência do retificador inverte o sentido transitoriamente (Fig. I), como pode ser visto através do gráfico de P e Q no retificador do pólo 1.

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DO ELO CCAT**



**Figura 4.16 – Desempenho do Elo CCAT – Defeito Franco no meio da Linha CC**

No modo de operação bipolar, a situação operativa do pólo 2 não é alterada de forma significativa quando de um defeito na linha CC do pólo 1. O gráfico da saída do ângulo de comutação  $\delta$  indica a diferença na variação angular ocorrida nos dois pólos quando do defeito (Fig. J).

- Bloqueio de um Pólo do Elo CCAT (Pólo 1)

No modo de operação síncrono, quando do bloqueio de um dos pólos, o pólo remanescente assume a ordem de potência do pólo bloqueado até o limite da sua capacidade.

Cabe ressaltar que a transferência de ordem do pólo bloqueado para o pólo remanescente deve ser efetuada manualmente no programa ANATEM do CEPEL.

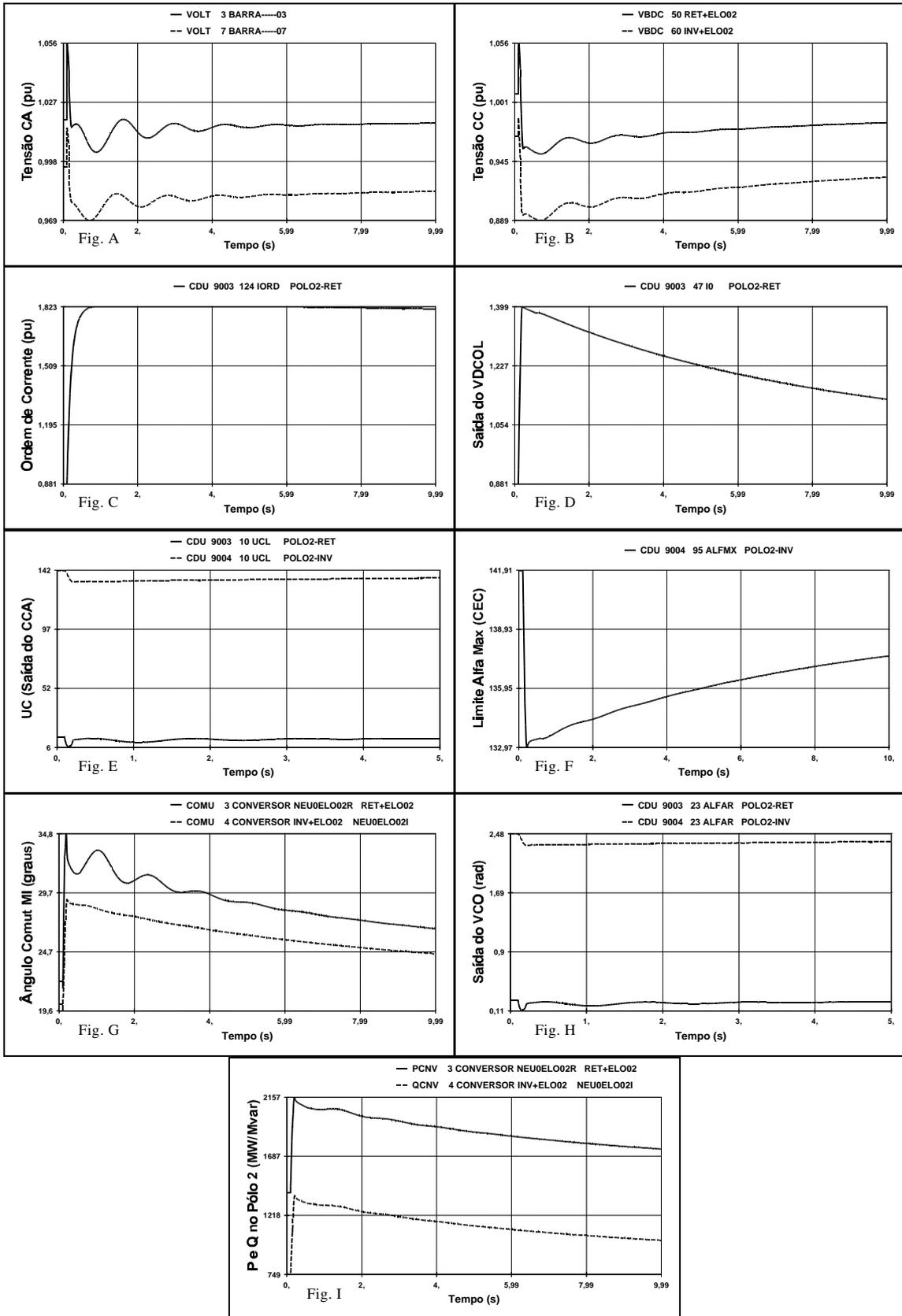
O gráfico referente à ordem de potência do pólo remanescente (pólo 2), mostra que este assume integralmente a ordem de potência do pólo bloqueado (Fig. I).

No entanto, a transferência total da ordem de potência do pólo 1 ocasiona um a sobrecarga no pólo 2, uma vez que este suporta uma sobrecarga de 40% do valor da corrente nominal. O limitador de sobrecarga de curta duração (STOL) atua no sentido de reduzir a nova ordem de corrente a um patamar admissível.

No entanto, a redução da potência transmitida pelo pólo remanescente deve ser conduzida de forma gradual, uma vez que uma redução acentuada pode, eventualmente, representar um impacto severo no sistema CA associado ao inversor. Portanto, a constante de tempo associada ao limitador de sobrecarga deve ser definida levando-se em consideração os efeitos da redução da potência transmitida pelo elo, no sistema em corrente alternada.

A Figura 4.17 apresenta o desempenho do elo CCAT quando do bloqueio do pólo 1.

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DO ELO CCAT**



**Figura 4.17 – Desempenho do Elo CCAT – Bloqueio do Pólo 1**

#### 4.5 MODELO 03

Este modelo de elo CCAT é idêntico ao Modelo 02 apresentado no subitem anterior a menos da representação do VCO. O Modelo 03 tem como propósito específico analisar o desempenho do Modelo C de VCO (Figura 3.16) em detrimento ao Modelo B (Figura 3.13).

Uma vez que um modelo mais detalhado de VCO foi implementado, com sucesso, no modelo de elo CCC de Garabi [20], as análises conduzidas pretendem avaliar o desempenho dinâmico do Modelo C de VCO em um elo CCAT convencional.

Para esta análise, foram simuladas contingências que representassem grande variação na potência de curto-circuito no inversor, uma vez que esta é a condição particular na qual se esperam diferenças significativas de desempenho, quais sejam:

1. Curto-circuito monofásico da barra CA do inversor seguido da perda dos compensadores síncronos no sistema CA do lado do inversor;
2. Curto-circuito monofásico da barra CA do inversor seguido da perda múltipla de diversos elementos da rede CA associada.

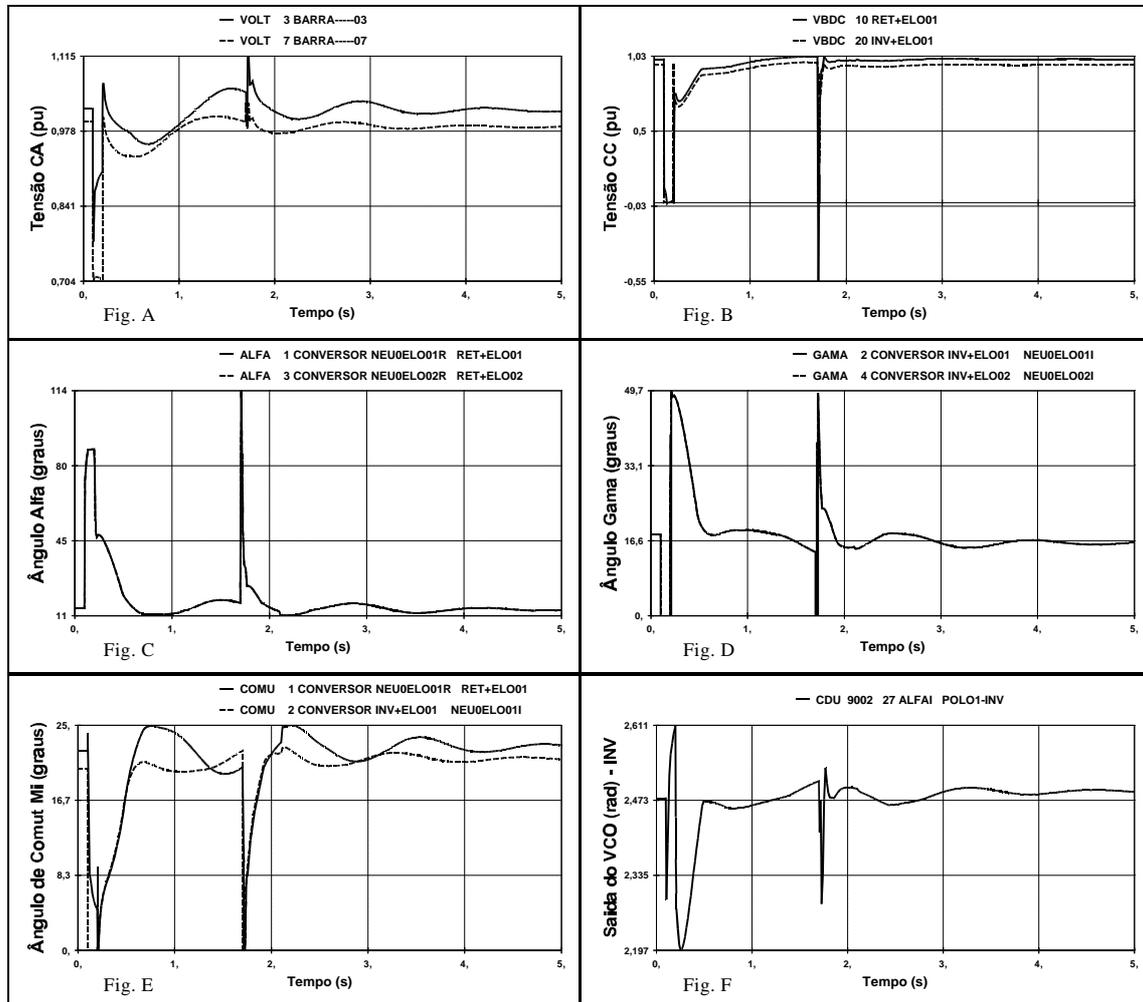
Estas perdas múltiplas representam um enfraquecimento do sistema CA associado ao inversor. Estas, foram simuladas através da modificação da impedância entre as barras 02 e 07 (ver Figura 4.1).

A Figura 4.18 apresenta os resultados obtidos quando da ocorrência da contingência 1.

Durante o defeito há a ocorrência de falha de comutação. Porém, tão logo este seja eliminado, os pólos se recuperam.

Através da análise da Figura 4.18, é possível observar que há a ocorrência de uma outra falha de comutação, além da ocorrida durante o defeito, no instante de tempo de 1,7 segundos (Fig. E). Esta falha ocorre em ambos os pólos e tem duração de 1 ciclo (0,0016s). Após este período os pólos se recuperam e continuam o processo de comutação de suas válvulas.

Comparando os resultados obtidos nesta simulação com os resultados obtidos considerando o modelo mais simplificado do VCO (Modelo B), pode-se verificar que, com o Modelo B (Figura 4.16), não há ocorrência de falha de comutação além da que ocorre durante o defeito.



**Figura 4.18 – Desempenho do Elo CCAT – Falta Monofásica na Barra CA do Inv. Contingência 1**

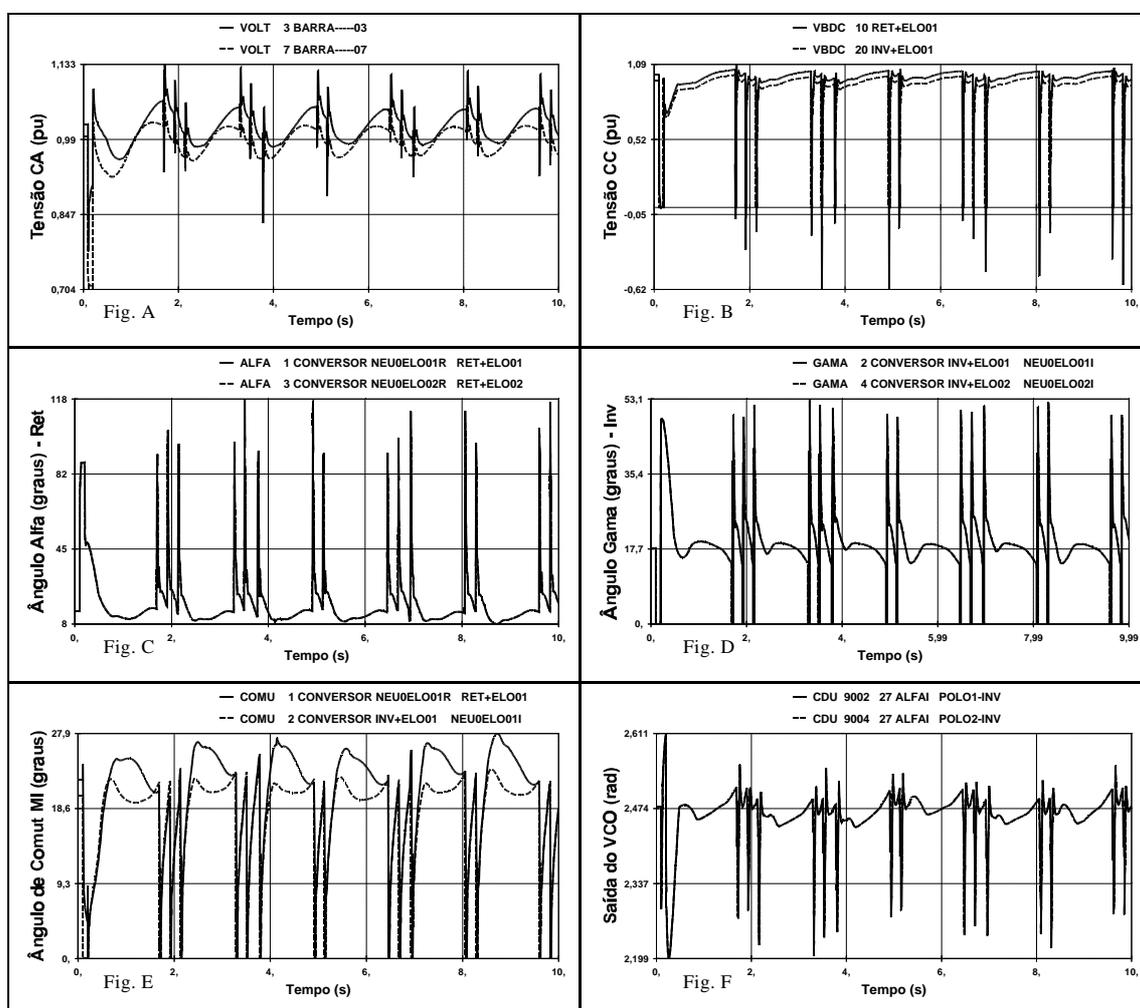
O distúrbio no sistema em corrente alternada, ocasionado pela contingência, provoca variações significativas na tensão e ângulo na barra CA do conversor (Fig. A). Estas variações se refletem no desempenho do sistema de controle de disparo (Fig. F).

A diferença no desempenho do controle de disparo de ambos os modelos é explicada pelo fato de que o modelo mais simplificado não incorpora os distúrbios no sistema CA na determinação do ângulo  $\alpha$ .

Em outras palavras, o modelo simplificado considera que o controle de disparo e o sistema CA são desacoplados, quando na realidade eles não são.

A Figura 4.19 apresenta os resultados obtidos quando da ocorrência da contingência 2.

O elo CCAT, sob esta contingência, apresenta falhas de comutação sucessivas. Os pólos 1 e 2 não conseguem manter a comutação de suas válvulas. Como consequência, os pólos são bloqueados e desbloqueados sucessivamente (Fig. E). O distúrbio no sistema CA é de tal magnitude que se reflete negativamente no controle do disparo das estações conversoras (Fig. F).



**Figura 4.19** – Desempenho do Elo CCAT – Falta Monofásica na Barra CA do Inv.  
Contingência 2

Os resultados obtidos para esta contingência, considerando o modelo simplificado de VCO (Modelo B), pode ser vista no Apêndice B.

Partindo-se do princípio que, em ambos os casos, o sistema é o mesmo (mesmo caso base) e, que a contingência aplicada também é a mesma, os resultados obtidos com o Modelo C são uma forte indicação da influência da representação de um modelo detalhado de VCO no desempenho do elo CCAT em determinadas situações. Especificamente, em situações onde a potência de curto-circuito no sistema CA do lado do inversor seja inferior à do retificador.

Cabe ressaltar que, a utilização de modelos de VCO simplificados que não levam em conta os distúrbios do sistema CA pode, nestas situações específicas, não retratar de forma fiel o desempenho de elos CCAT durante distúrbios que enfraqueçam ainda mais o sistema CA associado ao lado do inversor.

#### **4.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 4**

Neste Capítulo foram apresentados os resultados das simulações dinâmicas efetuadas para cada modelo de elo CCAT desenvolvido. A análise dos resultados foi conduzida de acordo com o comportamento conjunto de cada elemento de controle descrito no capítulo 3.

O grau de complexidade dos modelos de elo CCAT desenvolvidos foi aumentando na medida em que foram identificadas as limitações de cada modelo.

De uma maneira geral, os controles do elo atuam da forma esperada durante condições de distúrbio, ou seja, ações de controle são geradas de maneira a manter a ordem especificada (de corrente ou potência).

Neste capítulo também podem ser verificadas as condições de sistema que podem levar à necessidade de implementação de modelos mais completos de VCO, tendo em vista que o controle de disparo e o sistema CA não são inteiramente desacoplados.

## 5 CONCLUSÕES

Através dos modelos desenvolvidos neste trabalho de tese e, a partir das simulações efetuadas, pode se concluir que o grau de detalhamento necessário na representação dos elos CCAT em programas de estabilidade transitória depende da análise que se pretende realizar.

A utilização de um modelo simplificado do modelo de elo CCAT em programas de estabilidade transitória é válida em estudos onde existem uma grande quantidade de incertezas associadas. Os resultados deste tipo de estudo são interpretados como puramente indicativos e servem de balizadores para as tomadas de decisão necessárias para a expansão de sistemas elétricos. Por exemplo, estudos de planejamento de longo prazo (mais de dez anos à frente do ano inicial).

Para análises que requerem um grau de detalhamento elevado, tais como estudos de planejamento de curto prazo e estudos pré-operacionais, é necessário representar um modelo mais completo de elo CCAT, incorporando os controles relevantes na operação dos sistemas, tais como: controle de sobrecarga na corrente de ordem, congelamento da medição de tensão CC durante condições de distúrbio, modo de operação síncrona dos pólos e etc. A partir deste modelo completo é possível analisar em detalhes a operação real do elo CCAT, bem como a influência deste no desempenho dos sistemas CA associados. Por exemplo, a influência no amortecimento de oscilações eletromecânicas dos sistemas em corrente alternada.

Em diversas ocorrências no sistema, foi verificado, pela análise comparativa entre os gráficos referentes à saída do regulador de corrente e do VCO, que este último não gera ação de controle no sentido de alterar o ângulo de disparo  $\alpha$ . Em outras palavras, para estas condições apresentadas, a representação do modelo de VCO com ou sem detalhamento adicional, não influencia o desempenho dinâmico do elo CCAT e, portanto, poderia ser desprezada.

Em situações específicas onde a potência de curto-circuito no sistema CA do lado do inversor seja inferior à do retificador, pode-se concluir também que o grau de detalhamento da representação do VCO implementado nos modelos de elos, tem grande influência no desempenho do sistema CA/CC devido às acentuadas variações na tensão

## CONCLUSÕES

---

e no ângulo da barra CA do inversor quando da ocorrência de distúrbios no sistema em corrente alternada.

Os modelos que não levam em conta a função de sincronização da medição do ângulo de disparo  $\alpha$ , bem como as variações angulares da barra CA das conversoras, podem não retratar de forma fiel o desempenho de elos CCAT, durante distúrbios que enfraqueçam ainda mais o sistema CA associado ao lado do inversor.

Uma vez que o Modelo C de VCO foi implementado (com sucesso) apenas no elo CCC de Garabi [20], apresenta-se como sugestão para desenvolvimentos futuros a implementação deste modelo no elo CCAT de Itaipu, através da representação do modelo no “benchmark” utilizado para as simulações do elo no programa ATP. Desta forma, será possível validar os resultados nas simulações com os resultados obtidos no Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas, o que servirá de subsídio para uma eventual alteração no modelo “built-in” do elo CCAT de Itaipu no programa ANATEM do CEPEL.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Lopes, J. C., *Modelagem de Ligações em Corrente Contínua*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1982.
- [2] Ping, W. W., *Representação de Elos CCAT em Programas Digitais de Estabilidade*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.
- [3] Macedo, N. J. P., *Análise e Controle da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas Elétricos de Potência Com Elos de Corrente Contínua e Compensadores Estáticos de Reativos*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
- [4] Pilotto, L. A. S., *Modelagem de um Elo de Tansmissão em Corrente Contínua por Variáveis de Estado e Aplicações de Controle Ótimo*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1983.
- [5] Aik, D. L. H e Andersson, G., “Influence of Load Characteristics on the Power/Voltage Stability of The HVDC Systems, part 2: Stability Margin Sensitivity”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, n. 4, pp. 1445 – 1452, Out. 1998.
- [6] Martins, N., Ping, W. W. e Szechtman. M., “Exploiting the HVDC Link Control Capability in Power System Stabilization”, *IPEC Japan*, Tokio, Março 1983.
- [7] Aik, D. L. H e Andersson, G., “Non Linear Dynamics in HVDC Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, n. 4, pp. 1417 – 1426, Out. 1999.
- [8] Jovcic, D., Pahalawaththa, N. e Zavahir, M., “Analytical Modelling of the HVDC – HVAC Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, n. 2, pp. 506 – 511, Apr. 1999.
- [9] Aik, D. L. H e Andersson, G., “Impact of Dynamic System Modelling on the Power Stability of HVDC Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, n. 4, pp. 1427 – 1437, Out. 1999.
- [10] Smed, T. e Andersson, G., “Utilizing HVDC to Damp Power Oscillations”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, n. 2, pp. 620 – 627, Apr. 1993.
- [11] Hammad, A. e Taylor, C., “HVDC Controls for System Dynamic Performance”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, n. 2, pp. 743 – 752, May 1991.

- [12] Hammad, A., “Stability and Control of HVDC and AC Transmissions in Parallel”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, n. 4, pp. 1545 – 1554, Out. 1999.
- [13] Kimbark, E. W., *Direct Current Transmission*, Vol. 1, John Wiley and Sons Inc., New York, 1971.
- [14] Espírito Santo, S. e Macedo, N.J.P., Validação de Novo Modelo de Elo CCAT Implementado no TRANSDIR Utilizando o Simulador de Sistemas Elétricos, Nota Técnica DEE.O.001.95 – FURNAS Centrais Elétricas S.A., 1995.
- [15] Macedo, N.J.P. e outros, *Instalação de um Limitador de Mínimo na Tensão U<sub>d</sub> do Elo de Corrente Contínua*, Nota Técnica DEE.O.009.97 - FURNAS Centrais Elétricas S.A., 1997.
- [16] Macedo, N.J.P., Damião, C.H.B.P. e Espírito Santo, S., *Representação de Eventos no Sistema de Transmissão em Corrente Contínua de FURNAS no Programa ANATEM*, Nota Técnica DEE.O – 01/2000 – FURNAS Centrais Elétricas S.A., 2000.
- [17] Bowles, J. P., “Alternative Technique and Optimization of Voltage and Reactive Power Control at HVDC converter Stations”, IEEE Conference on Overvoltages and Compensation on Intergrated AC-DC Systems, Winnipeg, Canadá, julho, 1980.
- [18] Adamson, C. e Hingorani, N. G., *High Voltage Direct Current Power Transmission*, Garraway Limited, 1ª Edição, London, 1960.
- [19] Arrilaga, J. Arnold, C.P. e Harker, B. J., *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1983.
- [20] Barros, J. G. C., Menzies, D., Macedo, N. J. P., et al, *Series Capacitor Commutated (CCC) HVDC converter Stations: Benchmark for Digital Simulation Studies*, GT CIGRE B4-34, Brasil, 2003.
- [21] Menzies, D. F., *Estudo de Desempenho Dinâmico do Elo de Corrente Contínua - Relatório Técnico Completo – Anexo*, Nota Técnica DEE.O 02/98 – Furnas Centrais Elétricas S.A., 1998.
- [22] ANÔNIMO, *Programa ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos – Manual do Usuário*, V09-12/02, Rio de Janeiro, CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2002.

## APÊNDICE A

### DADOS DO SISTEMA ANALISADO

A Figura A.1, mostrada no final deste apêndice, apresenta o sistema teste utilizado nesta dissertação de mestrado. Nela, estão plotados o fluxo de potência, as tensões e ângulos dos barramentos CA representativos do ajuste do caso base do sistema CA / CC analisado.

São apresentados , a seguir, os dados do sistema analisado no capítulo 4 deste trabalho de tese:

#### A . 1 Dados do Sistema CA

- *Dados de Barra*

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Geração (MW/Mvar)		Limite Geração/Absorção de Reativos (Mvar)	
			P	Q	Qmin	Qmax
Barra - 01	1,010	40,3	7000,0	95,2	-1800,0	1800,0
Barra - 02	1,000	0,0	-6772,0	801,2	-9999	9999
Barra - 03	1,019	32,0				
Barra - 04	1,021	31,4				
Barra - 05	1,059	22,7				
Barra - 06	1,056	17,3				
Barra - 07	0,995	10,6				

APÊNDICE A

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Geração (MW/Mvar)		Limite Geração/Absorção de Reativos (Mvar)	
			P	Q	Qmin	Qmax
Barra - 08	1,063	17,4				
Barra - 09	1,063	17,4				
Barra - 10	1,059	28,2				
Barra - 11	1,059	28,2				
Barra - 12	1,043	23,8				
Barra - 13	1,043	23,8				
Barra - 14	1,063	17,4				
Barra - 15	1,059	28,2				
Barra - 16	1,043	23,8				
Barra - 17	1,035	10,6	0,0	431,1	-810,0	900,0

• *Dados dos Circuitos*

Circuito		R (%)	X (%)	B (Mvar)
De	Para			
Barra - 01	Barra - 03		0,21246	
Barra - 02	Barra - 07		0,54	
Barra - 03	Barra - 04		0,0275	
Barra - 04	Barra - 08	0,09	1,86	937,2
Barra - 04	Barra - 09	0,09	1,86	937,2
Barra - 04	Barra - 14	0,09	1,86	937,2
Barra - 05	Barra - 08		-0,75	
Barra - 05	Barra - 09		-0,75	
Barra - 05	Barra - 10		-0,78	
Barra - 05	Barra - 11		-0,78	
Barra - 05	Barra - 14		-0,75	
Barra - 05	Barra - 15		-0,78	
Barra - 06	Barra - 10	0,06	1,53	759,5
Barra - 06	Barra - 11	0,06	1,53	759,5
Barra - 06	Barra - 12		-0,90	
Barra - 06	Barra - 13		-0,90	
Barra - 06	Barra - 15	0,06	1,53	759,5
Barra - 06	Barra - 16		-0,09	
Barra - 07	Barra - 12	0,06	1,74	884,0
Barra - 07	Barra - 13	0,06	1,74	884,0
Barra - 07	Barra - 16	0,06	1,74	884,0
Barra - 17	Barra - 07		0,953	

- *Reatores de Barra*

<b>Barra</b>	<b>Reator (Mvar)</b>
Barra - 05	330
Barra - 06	330

- *Filtros*

<b>Barra</b>	<b>Banco de Capacitores (Mvar)</b>
Barra - 03	1540
Barra - 07	1050

- *Reatores de Linha*

<b>Circuito</b>		<b>Reator (Mvar)</b>	
<b>De</b>	<b>Para</b>	<b>Terminal De</b>	<b>Terminal Para</b>
Barra - 04	Barra - 08	330	150
Barra - 04	Barra - 09	330	150
Barra - 04	Barra - 14	330	150
Barra - 06	Barra - 10	330	330
Barra - 06	Barra - 11	330	330
Barra - 06	Barra - 15	330	330
Barra - 07	Barra - 12	330	
Barra - 07	Barra - 13	330	
Barra - 07	Barra - 16	330	

- *Dados de Gerador*

<b>Grandeza</b>	<b>Barra - 01</b>	<b>Barra - 17 (CS)</b>
MVA	737	300
T' do (s)	8,50	9,00
T'' do(s)	0,090	0,060
T''qo (s)	0,19	0,20
H (s)	5,389	1,60
Xd (% - Na Base da Maq)	94,90	170,0
Xq	67,80	100,0

<b>Grandeza</b>	<b>Barra - 01</b>	<b>Barra - 17 (CS)</b>
(% - Na Base da Maq)		
X'd (% - Na Base da Maq)	31,7	37,0
X''d (% - Na Base da Maq)	25,20	22,0

## A . 2 Dados do Elo CCAT

- *Bases*

<b>Elo</b>	<b>V base (kV)</b>	<b>Ibase (A)</b>
1	600	2.625
2	600	2.625

- *Dados de Barra CC*

<b>Barra CC</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tensão (pu)</b>
10	Retificador	603,9
20	Inversor	579,6
50	Retificador	603,9
60	Inversor	579,6

- *Dados da Linha CC*

<b>Barra CC</b>		<b>R (W)</b>	<b>L (mH)</b>
<b>De</b>	<b>Para</b>		
10	20	10,47	1.231,9
50	60	10,47	1.231,9

- *Dados dos Conversores*

Barra CC	Tipo	$P_{ord}$ (MW)	Margem de I	Ângulo de Dísparo $\alpha$ (graus)	Ângulo de Extinção $\gamma$ (graus)
10	Retificadora	1400	-	15,72	-
20	Inversora	-	10 % $I_{ord}$	-	18,0
50	Retificadora	1400		15,72	-
60	Inversora	-	10 % $I_{ord}$	-	18,0

- *Dados do Conversor (continuação)*

Barra CC	Tipo	Reatância de Comut. (%)	Tensão no Sec. do Trafo (kV)	Base do Trafo (MVA)	Corrente Nominal (A)
10	Retificadora	18,63	127,4	470,0	2.625
20	Inversora	18,08	127,4	472,0	2.625
50	Retificadora	18,63	127,4	470,0	2.625
60	Inversora	18,08	127,4	472,0	2.625

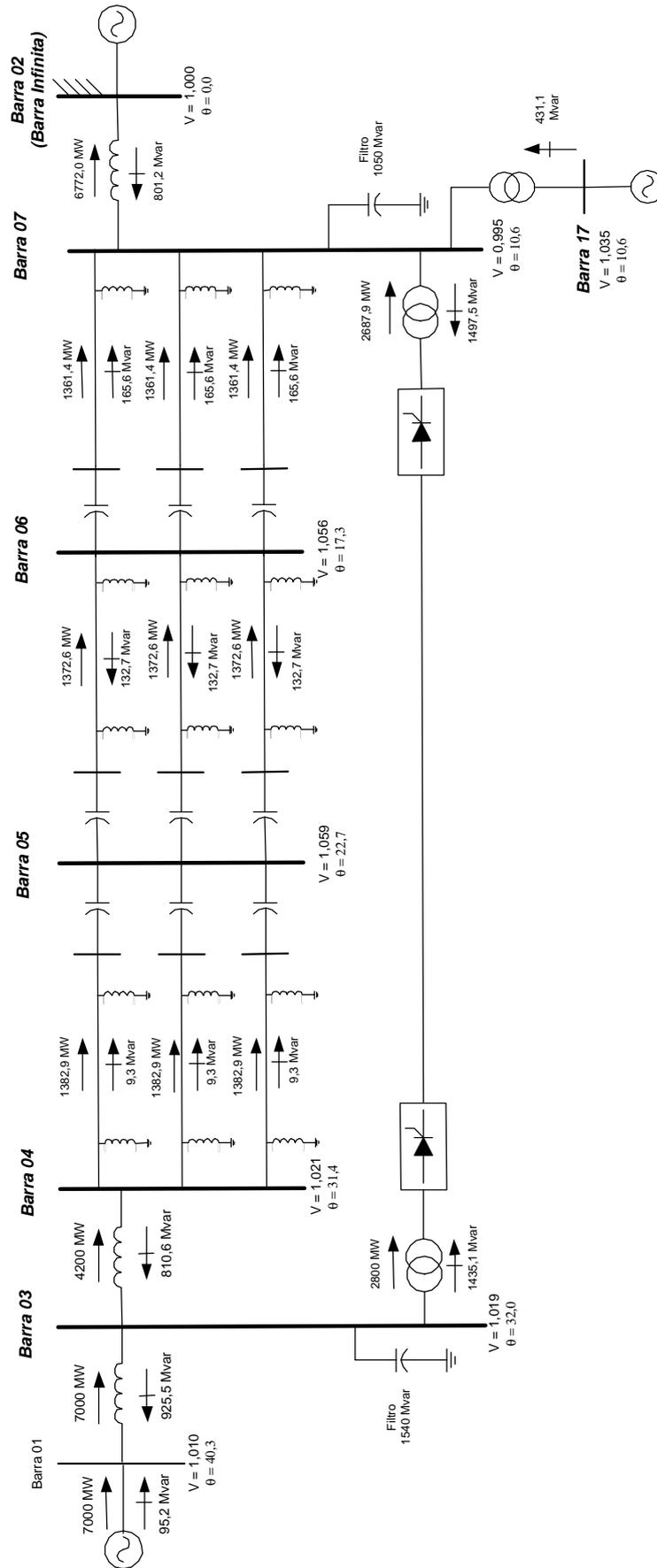
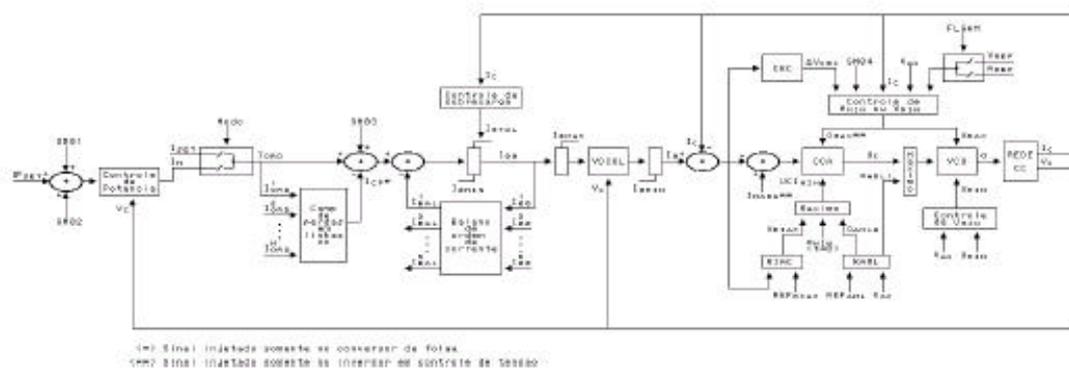


Figura A.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste Analisado

## APÊNDICE B

### VALIDAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO FRENTE AO MODELO “BUILT-IN” DO PROGRAMA ANATEM DO CEPEL

Os modelos “built-in” implementados no programa ANATEM do CEPEL são constituídos de modelos dinâmicos “prontos” de elementos do sistema tais como: geradores de pólos salientes, geradores de pólos lisos, reguladores de velocidade e de tensão, sinais adicionais (PSS) e etc. A sua concepção teve por objetivo facilitar o usuário no que se refere à modelagem dinâmica dos mesmos, bastando para isso a inserção dos parâmetros característicos de cada componente. A Figura B.1 apresenta o modelo “built-in” representativo do elo CCAT de Itaipu [22], que será utilizado como parâmetro de comparação para o modelo completo (Modelo 02) desenvolvido nesta dissertação de mestrado.



**Figura B.1** – Diagrama Unifilar do Modelo “built-in” representativo do elo CCAT de Itaipu

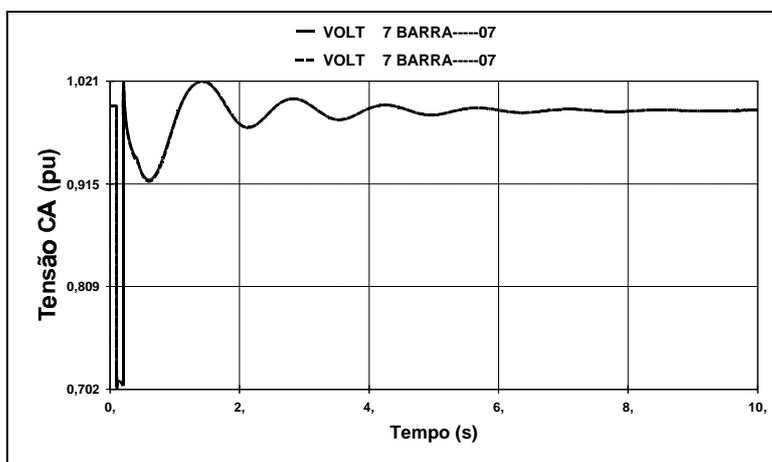
A validação foi efetuada apenas para o modelo completo de elos CCAT, uma vez que o modelo simplificado não contempla diversos controles representados no modelo “built-in” do programa ANATEM.

No entanto, mesmo na validação do modelo completo, é necessário desabilitar alguns controles do modelo “built-in”, quais sejam: RAML, RIAC e o STAB50. O controle do inversor foi modificado para controle de gama.

A análise conduzida contemplou apenas um caso considerado severo para o desempenho do elo CCAT, a saber: curto-circuito monofásico seguido de perdas múltiplas de elementos no sistema CA no lado do inversor. Estas perdas múltiplas representam um enfraquecimento do sistema CA associado ao inversor, e foram simuladas através da modificação da impedância entre as barras 02 e 07 (ver Figura 4.1).

A referida emergência foi simulada no mesmo caso base, considerando o Modelo 02 (ver item 4.4) ou o modelo “built-in” do ANATEM. Os resultados de ambos os casos foram plotados em um mesmo gráfico e são apresentados a seguir:

A Figura B.2 apresenta a variação da tensão na barra CA do inversor



**Figura B.2 - Variação da Tensão na Barra CA do Inversor**

Como os resultados obtidos com ambos os modelos são bem próximos, as figuras a seguir apresentam apenas o detalhe das grandezas. A Figura B.3 apresenta o detalhe da variação da tensão na barra CA do Inversor.

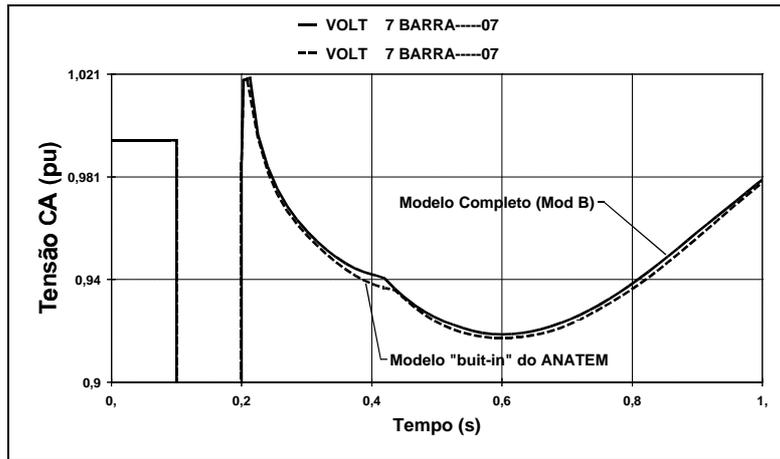


Figura B.3 – Detalhe da Variação da Tensão na Barra CA do Inversor

A Figura B.4 mostra a excursão do ângulo de disparo do retificador.

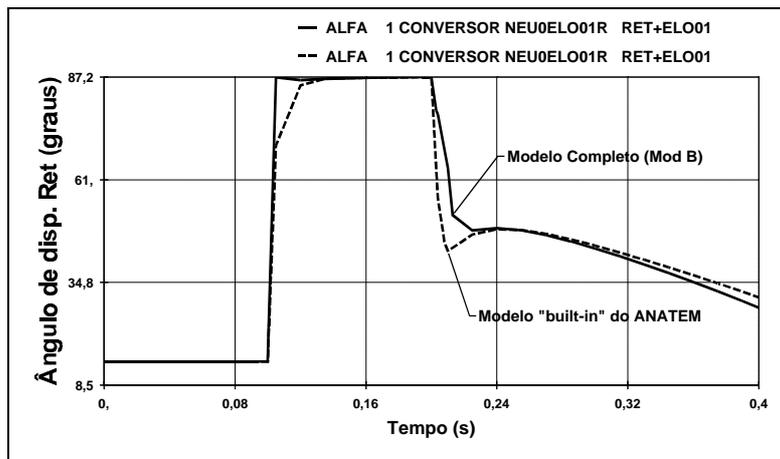
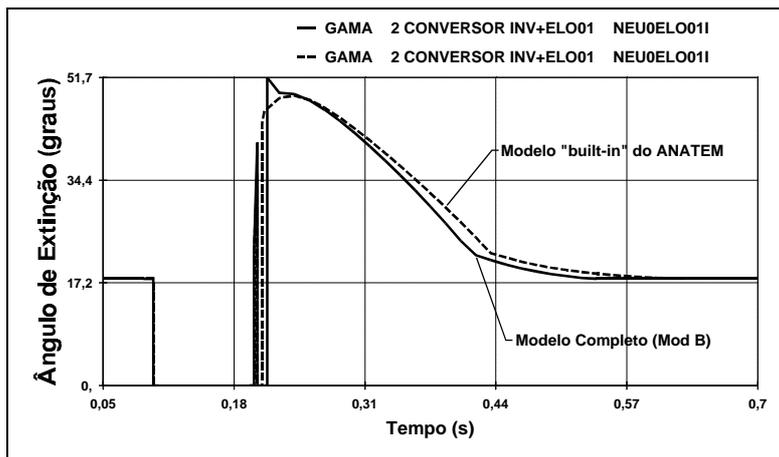


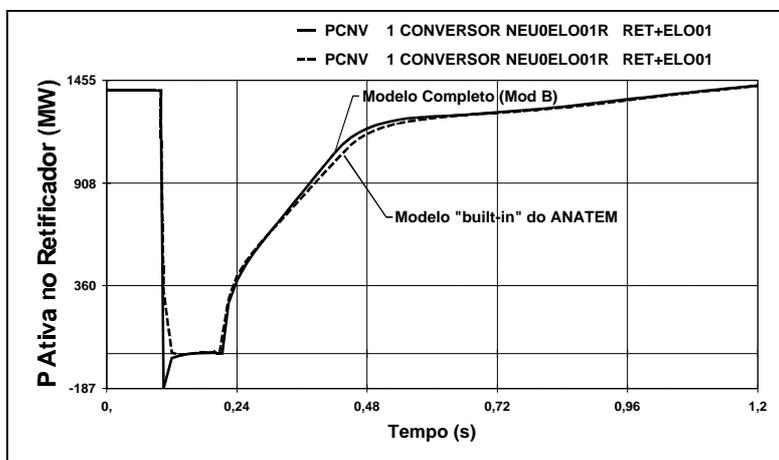
Figura B.4 - Excursão do Ângulo de Disparo do Retificador

A Figura B.5, por sua vez, apresenta a variação do ângulo de extinção do inversor.



**Figura B.5 - Variação do Ângulo de Extinção  $\alpha$  do Inversor**

As Figuras B.6 e B.7, a seguir, apresentam a variação na potência ativa e reativa no elo CCAT, respectivamente.



**Figura B.6 - Variação na Potência Ativa no Retificador**

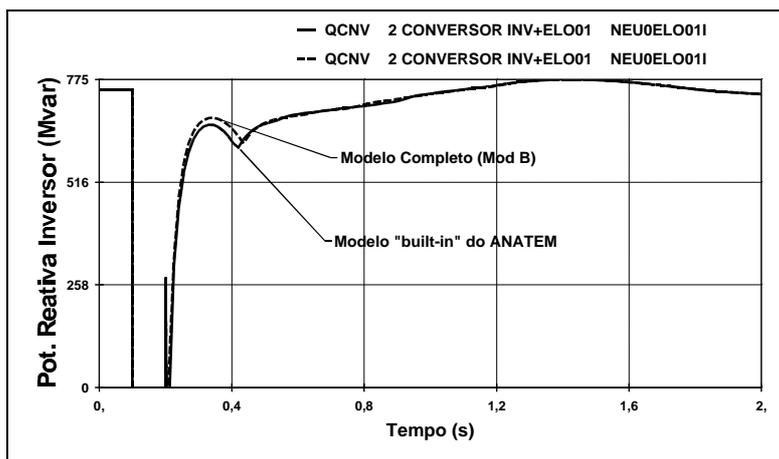


Figura B.7 - Variação na Potência Reativa no Inversor

Por último é apresentada, pela Figura B.8, a variação na tensão CC do inversor.

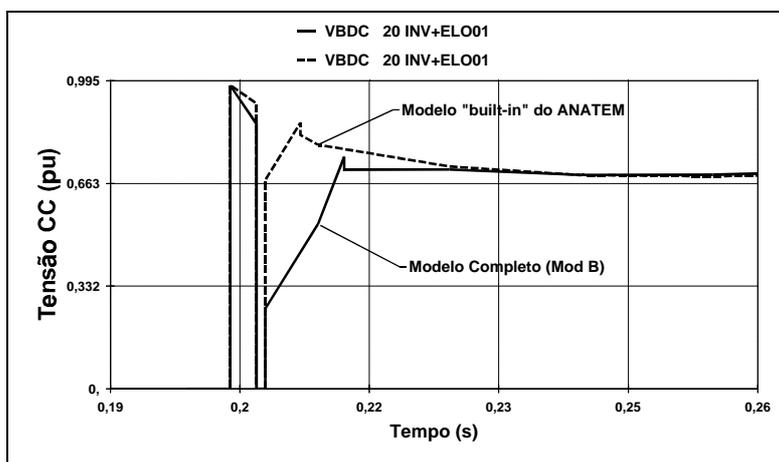


Figura B.8 - Variação da Tensão na Barra CC do Inversor

Uma vez que a validade dos estudos dinâmicos associados a elos CCAT está intimamente relacionada com a qualidade dos modelos utilizados, o grau de detalhamento necessário na representação dos controles, está relacionada ao tipo de análise a que se pretende realizar.

A análise das Figuras B.2 a B.8 indica que, o modelo completo utilizado neste trabalho de tese reproduz com fidelidade razoável o comportamento do modelo “built-in” do programa ANATEM, do CEPEL.

## APÊNDICE C

### CÁLCULO DO SCR

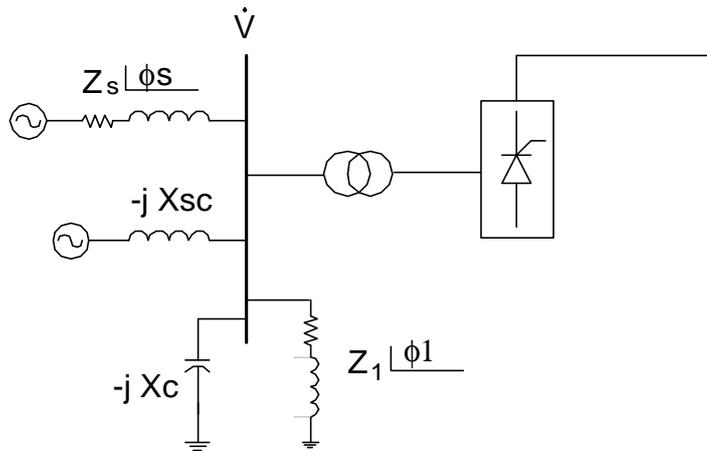
Nos dias atuais, é comum a utilização da relação de curto-circuito na determinação da interação existente entre sistemas CA/CC. Esta interação está fortemente relacionada ao controle de tensão na barra CA dos conversores.

A grandeza chamada de Relação de Curto-circuito (ou “Short Circuit Ratio” - SCR). é definida como a razão da potência de curto-circuito, na barra do conversor considerado, pela potencia CC nominal do elo.

$$\text{SCR} = \frac{\text{Potência CA de Curto – Circuito}}{\text{Potência Nominal do elo CCAT}}$$

Neste trabalho foi tomada a sugestão de Bowles [17] que define a Potência CA de curto-circuito através da impedância equivalente vista da barra considerada, incluindo-se todos os elementos ligados naquela barra. O SCR calculado a partir desta premissa é também denominado de “Effective Short Circuit Ratio” (ESCR).

A Figura C.1 apresenta a configuração típica de uma estação conversora



Onde:

$Z_s$  = Impedância do Sistema

$Z_1$  = Impedância da Carga

$X_c$  = Reatância do Banco de Capacitores

$X_{sc}$  = Reatância do Compensador Síncrono

**Figura C.1** – Estação Conversora

Tomando-se por base a estação conversora mostrada na Figura B.1, a impedância equivalente de Thevenin vista da barra CA do conversor é dada por:

$$\frac{1}{\dot{Z}_{th}} = \frac{1}{Z_s \angle \phi_s} + \frac{1}{jX_{sc}} + \frac{1}{-jX_c} + \frac{1}{Z_1 \angle \phi_1}$$

A potência CA de curto-circuito ( $P_{cc}$ ) é definida como:

$$P_{cc} = \frac{V^2}{Z_{th}} \quad (\text{em pu})$$

No entanto, para condições nominais,  $V = 1$  (pu). Logo:

$$P_{cc} = \frac{1}{Z_{th}}$$

Assim:

$$\text{SCR} = \frac{P_{cc}}{P_d} \quad \text{onde } P_d = \text{potência nominal do elo CCAT}$$

Não há uma fronteira bem definida no que se refere à distinção entre sistemas fracos e fortes mas, atualmente, é comum tratarem-se os sistemas com SCR abaixo de 2,5 como fracos.

## APÊNDICE D

### MODELOS DE ELO CCAT DESENVOLVIDOS

São apresentados, a seguir, os modelos de elo CCAT desenvolvidos nesta dissertação de mestrado. Os modelos foram implementados segundo a sintaxe do programa ANATEM do CEPEL, na forma de arquivos “CDU” (Controladores Definidos pelo Usuário).

- *Modelo 01*

```
DCDU
(
-----
(nc) ( nome cdu )
9001 ELOCC RET-01
-----
(
-----
(EFPAR (npar) (      valpar      )
-----
( CCA
DEFPAR #KICCA          2500.00
DEFPAR #KPCCA          102.0
( VCO
DEFPAR #TVCO           .0014
( Limites de ALFA
DEFPAR #ALFMX          163.0
DEFPAR #ALFMN           5.0
( VDCOL
DEFPAR #TUP1           0.080
DEFPAR #TDWN1          0.0054
DEFPAR #UDHI            0.93
DEFPAR #UDLW            0.326
DEFPAR #FRMN            0.35
```

APÊNDICE D

```
DEFPAR #IOMIN          0.1
DEFPAR #IOMAX          1.4
(
DEFPAR #PI              3.141592654
-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)
(vmax)
-----
(
( CCA
(
0001 IMPORT CCNV      IDC
0004 SOMA             IDC  ERRC
                    -I0  ERRC
0005 GANHO            ERRC  UCP   #KPCCA
0008 PROINT           ERRC  UCI   #KICCA  0.0  1.0      ALFMN  ALFMX
0009 SOMA             UCP   UC
                    UCI   UC
0010 LIMITA          UC    UCL                ALFMN  ALFMX
(
( VCO
(
0014 LEDLAG          UCL   ALFAG  1.0          1.0#TVCO
(
0035 FRACAO          ALFAG  ALFAR  #PI      0.0 180.0  0.0
0036 EXPORT ALFA     ALFAR
(
( VDCOL
(
0040 IMPORT VCNV     VDC
0254 GANHO           VDC   VDCM  1.0
(
(Dinamica do VDCOL
(
0041 LAGNL           VDCM  VDCL   1.0#TDWN1#TUP1      VDCLMN VDCLMX
0042 FUNCAO RAMPA   VDCL  X42   #UDLW #FRMN #UDHI  1.0
0044 LIMITA         I00r  X44
                    X42  X45
0045 MULTPL         X44  X45
0047 LIMITA         X45   IO                IOMIN  IOMAX
(
-----
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
-----
DEFVAL      ALFMN  #ALFMN
DEFVAL      ALFMX  #ALFMX
DEFVAL VAR   Iord  IDC
DEFVAL      IOMAX  #IOMAX
DEFVAL      IOMIN  #IOMIN
DEFVAL      VDCLMN #UDLW
DEFVAL      VDCLMX #UDHI
(
FIMCDU
(
(
-----
(nc) ( nome cdu )
9002 ELOCC INV-01
-----
```

APÊNDICE D

```

(-----)
(EFFPAR (npar) (      valpar      )
(-----)
( CCA
DEFFPAR #KICCA          5000.00
DEFFPAR #KPCCA          47.0
( VCO
DEFFPAR #TVCO          .0014
( Limites de ALFA
DEFFPAR #ALFMN          100.0
( VDCOL
DEFFPAR #TDWN1          0.004
DEFFPAR #TUP1           0.050
DEFFPAR #UDHI           0.93
DEFFPAR #UDLW           0.279
DEFFPAR #FRMN           0.30
DEFFPAR #IOMIN          0.1
DEFFPAR #IOMAX          1.4
( Margem de corrente
DEFFPAR #IMRG           0.1
( CEC
DEFFPAR #KCEC           51.00
(
DEFFPAR #PI              3.141592654
(-----)
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)
(vmax)
(-----)
(
( CCA
(
0001 IMPORT CCNV          IDC
0003 ENTRAD              IMRG
0004 SOMA                 IDC   ERRC
                        -IO   ERRC
                        IMRG  ERRC
0005 GANHO                ERRC  UCP   #KPCCA
0008 PROINT              ERRC  UCI   #KICCA   0.0   1.0       ALFMN  ALFMX
0009 SOMA                 UCP   UC
                        UCI   UC
0010 LIMITA              UC    UCL                ALFMN  ALFMX
(
(
( VCO
(
0014 LEDLAG              UCL   ALFAG   1.0           1.0#TVCO
(
0035 FRACAO              ALFAG ALFAR  #PI      0.0 180.0   0.0
0036 EXPORT ALFA        ALFAR
(
( VDCOL
(
0040 IMPORT VCNV          VDC
0254 GANHO                VDC  VDCM   1.0
0941 FUNCAO MENOS       VDCM  MVDC
(
(
(Dinamica do VDCOL
(
0041 LAGNL                MVDC  VDCL   1.0#TDWN1#TUP1      VDCLMN VDCLMX
0042 FUNCAO RAMPA       VDCL  X42   #UDLW #FRMN #UDHI      1.0

```

APÊNDICE D

```

1042 ENTRAD          I00i
0044 LIMITA          I00i  X44          IOMIN  IOMAX
0045 MULTPL          X42   X45
                   X44   X45
0047 LIMITA          X45   I0          IOMIN  IOMAX
(
( CEC
(
0051 SOMA            I0    DI
                   -IDC  DI
0052 LIMITA          DI    X52          ZERO   IMRG
0053 GANHO            X52   CEC    #KCEC
0054 ENTRAD          AREARF
0055 SOMA            AREARF AMING
                   CEC   AMING
0056 FRACAO          AMING  AMIN   #PI    0.0 180.0  0.0
0057 FUNCAO COS      AMIN   X57
(
( ALFA MAXIMO (AREA MINIMA)
(
0081 IMPORT VOLT      VAC
0082 IMPORT CTAP      CTAP
0083 IMPORT CNVK      CNVK
0084 IMPORT RCNV      DXL
0085 GANHO            DXL  DXL2    2.0
0086 DIVSAO          DXL2  CTEINV
                   CTAP  CTEINV
                   CNVK  CTEINV
0087 MULTPL          IDC   X87
                   CTEINV X87
0088 DIVSAO          X87   X88
                   VAC   X88
0092 SOMA            X88   COSAL
                   -X57  COSAL
0093 LIMITA          COSAL  COSALL          MHUM   HUM
0094 FUNCAO ACOS      COSALL ALFMXR
0095 FRACAO          ALFMXR ALFMX   180.0  0.0#PI
(
(-----
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
(-----
DEFVAL      ALFMN  #ALFMN
DEFVAL VAR  ALFMX  ALFAG
DEFVAL      ZERO   0.0
DEFVAL      IOMAX  #IOMAX
DEFVAL      IOMIN  #IOMIN
DEFVAL      VDCLMN #UDLW
DEFVAL      VDCLMX #UDHI
DEFVAL      IMRG   #IMRG
DEFVAL VAR  UCI    ALFMX
DEFVAL VAR  I00i  IDC
DEFVAL      MHUM  -1.
DEFVAL      HUM   1.0
(
FIMCDU

```

APÊNDICE D

---

• *Modelo 02*

```
DCDU
(
(=====
(                               CONTROLES DO RETIFICADOR
(=====
(nc) ( nome cdu )
9001 POLO1-RET
(-----
(EFFPAR (npar) (   valpar   )
(-----
( PPC
DEFFPAR #TMUP           0.3
DEFFPAR #TMDW           0.1
DEFFPAR #TMSTR          0.5
( HOLD UD/CMR
DEFFPAR #UDCMN          0.45
DEFFPAR #TAX1           18.60
( STOL
DEFFPAR #T1MAX           1.0
DEFFPAR #AMAX            4.514
DEFFPAR #G1MAX           .05142
DEFFPAR #STMAX           40.996
DEFFPAR #YALIM           1.0
( TELECOM
DEFFPAR #TELCM           0.066
( CCA
DEFFPAR #KICCA           2500.00
DEFFPAR #KPCCA           102.0
( VCO
DEFFPAR #TVCO            .0017
( Limites de ALFA
DEFFPAR #ALFMX           163.0
DEFFPAR #ALFMN            5.0
(
DEFFPAR #PI              3.141592654
( VDCOL
DEFFPAR #TUP1            0.080
DEFFPAR #TDWN1           0.0054
DEFFPAR #UDHI            0.93
DEFFPAR #UDLW            0.326
DEFFPAR #FRMN            0.35
DEFFPAR #IOMIN           0.1
DEFFPAR #IOMAX           1.4
(
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
(-----
(=====
(                               CCA
(=====
0001 IMPORT CCNV          IDC
0004 SOMA                 IDC   ERRC
                        -I0   ERRC
0005 GANHO                ERRC  UCP   #KPCCA
0008 PROINT               ERRC  UCI   #KICCA   0.0   1.0       ALFMN  ALFMX
0009 SOMA                 UCP   UC
                        UCI   UC
0010 LIMITA               UC    UCL                ALFMN  ALFMX
```

APÊNDICE D

```

(=====
(
                                VCO
(=====
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
0014 SOMA          UCL    DALFA
                    -ALFAER DALFA
1014 GANHO          DALFA X1014 1.
0015 LIMITA        X1014 DALFAL
0016 PROINT        DALFAL ALFAG 720. 0.0 1.0          DALFMN DALFMX
0017 DELAY          ALFAG  ALFAER
(
(
                                LIMITE DE DERIVADA DE ALFA
(
0018 DELAY          UCL    ALFANT
0019 FUNCAO RAMPA  ALFANT DALFMX 56.0 79.0 124.0 11.0
0020 FUNCAO PULSO  ALFANT X00020 45.0 4.20 68.0 0.0
0021 FUNCAO RETA   X00020 DALFMN 1.0 -5.6
0022 FRACAO        ALFAG  ALFAR #PI 0.0 180.0 0.0
0023 EXPORT ALFA   ALFAR
(=====
(
                                VDCOL
(=====
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
0040 IMPORT VCNV    VDC
0254 GANHO          VDC    VDCM 1.0
(
(Dinamica do VDCOL
(
0041 LAGNL          VDCM  VDCL 1.0#TDWN1#TUP1          VDCLMN VDCLMX
0042 FUNCAO RAMPA  VDCL  X42 #UDLW #FRMN #UDHI 1.0
0044 LIMITA        I00r  X44          IOMIN IOMAX
0045 MULTPL        X42   X45
                    X44   X45
0047 LIMITA        X45   I0          IOMIN IOMAX
(=====
(
                                PPC - POWER POLE CONTROL
(=====
(
                                CALCULO DA ORDEM DE CORRENTE
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0119 ENTRAD        Pord  P00
0120 LAGNL          Pord  P00 1.0 #TMUP #TMDW
0122 LEDLAG        VDC   VDCF 1.0 0.0 1.0 #TMSTR VDCMIN BIG
1122 LIMITA        VDCF  VDCF
0123 T/HOLD        VDCF  VDPPC          VDCMIN BIG
                    TRACK VDPPC
0124 DIVSAO        P00   Iord
                    VDPPC Iord
(
                                HOLD UD/CMR
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0125 IMPORT DT      DELTT
0126 FUNCAO PULSO  VDC   H0 0.0 0.0 #UDCMN 1.0
0127 DELAY          VDC   H1
0128 SOMA          H1    H2
                    -VDC  H2
0129 DIVSAO        H2    H3
                    DELTT H3
0130 FUNCAO PULSO  H3    H4 1.0 0.0 #TAX1 1.E+6
0131 SOMA          H4    H5
                    H10   H5
0132 PROINT        H5    H6 1.0 0.0 1.0          ZERO HUM
0133 SOMA          H6    H7

```

APÊNDICE D

```

                                H10   H7
0134 PROINT                    H12   H8     1.0   0.0   1.0           ZERO   DEZ
0135 FUNCAO PULSO H8          H9     0.0  -1.0   2.0   0.0
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)
(vmax)
0136 FUNCAO PULSO H8          H10    2.0  -1.E+6 2.50   0.0
0137 DELAY              H7          H12
0138 FUNCAO RETA  H9          H11    1.0   1.0
0139 LOGIC  .AND.  H0          TRACK
                                H11    TRACK
(
                                STOL
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)
(vmax)
0140 ENTRAD                    YALIM
0141 IMPORT CCNV                    IDRET
0142 SOMA                      -YALIM ST1
                                IDRET ST1
0143 SOMA                      YALIM ST2
                                IDRET ST2
0144 MULTPL                    ST1   ST3
                                ST2   ST3
0145 PROINT                    ST3   ST4    1.0   0.0   #T1MAX           ZERO   BIG
0146 FUNCAO RETA  ST4          ST5    1.0  -#AMAX
0147 GANHO                    ST5   ST6    #G1MAX
0148 LIMITA                    ST6   ST7
                                ZERO   BIG
0149 FUNCAO RETA  ST7          ST8   -1.0  #STMAX
0150 LIMITA                    ST8   STOL           YALIM   BIG
0151 MIN                      STOL  STIO
                                Iord  STIO
(
                                TELECOM
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)
(vmax)
0152 LEDLAG                    STIO  I00i   1.0   0.0   1.0   #TELCM
0153 LEDLAG                    I00i  TL1    1.0   0.0   1.0   #TELCM
0154 MAX                      STIO  I00r
                                TL1   I00r
0251 EXPORT CDU  I00i
-----
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
-----
DEFVAL      DALFA    0.0
DEFVAL      DEZ      10.0
DEFVAL      VDCMIN  0.975
(DEFVAL      VDCMIN  0.000
DEFVAL      BIG      1.E+6
(
DEFVAL      ALFMN   #ALFMN
DEFVAL      ALFMX   #ALFMX
DEFVAL      ZERO    0.0
DEFVAL      HUM     1.0
DEFVAL      IOMAX   #IOMAX
DEFVAL      IOMIN   #IOMIN
DEFVAL      VDCLMN  #UDLW
DEFVAL      VDCLMX  #UDHI
( STOL
DEFVAL      YALIM   #YALIM
DEFVAL      STOL   #IOMAX
( HOLD UD/CMR
DEFVAL      H6     0.0
DEFVAL      H8     0.0
( PPC

```

APÊNDICE D

```
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
(DEFVAL      Pord  1.00
DEFVAL VAR   Iord  IDC
FIMCDU
(
(
(=====
(          CONTROLES DO INVERSOR
(=====
(nc) ( nome cdu )
9002 POLO1-INV
(-----
(EFPAR (npar) (   valpar   )
(-----
(-----
(
(-----
(EFPAR (npar) (   valpar   )
(-----
( CCA
DEFPAR #KICCA          5000.00
DEFPAR #KPCCA          47.0
( VCO
DEFPAR #TVCO          .0014
( Limites de ALFA
DEFPAR #ALFMN          100.0
( VDCOL
DEFPAR #TDWN1          0.004
DEFPAR #TUP1          0.050
DEFPAR #UDHI          0.93
DEFPAR #UDLW          0.279
DEFPAR #FRMN          0.30
DEFPAR #IOMIN          0.1
DEFPAR #IOMAX          1.4
( Margem de corrente
DEFPAR #IMRG          0.1
( CEC
DEFPAR #KCEC          51.00
(
DEFPAR #PI          3.141592654
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
(-----
(
( CCA
(
0001 IMPORT CCNV          IDC
0002 IMPORT CDU          I00i      2043
0003 ENTRAD          IMRG
0004 SOMA          IDC  ERRC
          -I0  ERRC
          IMRG  ERRC
0005 GANHO          ERRC  UCP  #KPCCA
0008 PROINT          ERRC  UCI  #KICCA  0.0  1.0          ALFMN  ALFMX
0009 SOMA          UCP  UC
          UCI  UC
0010 LIMITA          UC  UCL          ALFMN  ALFMX
(
(=====
(          VCO
(=====
```

APÊNDICE D

```

0014 SOMA          UCL    DALFA
                  -ALFAER DALFA
1014 GANHO        DALFA  X1014   1.0
0015 LIMITA      X1014  DALFAL                      DALFMN
DALFMX
0016 PROINT      DALFAL  ALFAG   720.  0.0   1.0          ALFMN  ALFMX
0017 DELAY       ALFAG   ALFAER
(
(
          LIMITE DE DERIVADA DE ALFA
(
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
0018 DELAY       UCL    ALFANT
0019 FUNCAO PULSO ALFANT DALFMX   0.0   5.6  124.0  0.703
0022 FRACAO     ALFAG   ALFAR  #PI     0.0  180.0   0.0
0023 EXPORT ALFA ALFAR
(=====
(
( VDCOL
(
0040 IMPORT VCNV          VDC
0254 GANHO              VDC  VDCM     1.0
0941 FUNCAO MENOS      VDCM  MVDC
(
(
(Dinamica do VDCOL
(
0041 LAGNL             MVDC  VDCL     1.0#TDWN1#TUP1          VDCLMN VDCLMX
0042 FUNCAO RAMPA     VDCL  X42     #UDLW #FRMN #UDHI     1.0
0044 LIMITA          I00i   X44
0045 MULTPL          X42    X45
                  X44    X45
0047 LIMITA          X45    I0          I0MIN  I0MAX
(
( CEC
(
0051 SOMA            I0     DI
                  -IDC   DI
0052 LIMITA          DI     X52          ZERO   IMRG
0053 GANHO           X52    CEC     #KCEC
0054 ENTRAD          AREARF AREARF
0055 SOMA            AREARF AMING
                  CEC    AMING
0056 FRACAO          AMING  AMIN   #PI     0.0  180.0   0.0
0057 FUNCAO COS      AMIN   X57
(
( ALFA MAXIMO (AREA MINIMA)
(
0081 IMPORT VOLT          VAC
0082 IMPORT CTAP          CTAP
0083 IMPORT CNVK          CNVK
0084 IMPORT RCNV          DXL
0085 GANHO              DXL   DXL2     2.0
0086 DIVSAO            DXL2  CTEINV
                  CTAP  CTEINV
                  CNVK  CTEINV
0087 MULTPL            IDC    X87
                  CTEINV X87
0088 DIVSAO            X87   X88
                  VAC   X88
0092 SOMA              X88   COSAL
                  -X57  COSAL

```

APÊNDICE D

---

```
0093 LIMITA          COSAL  COSALL          MHUM  HUM
0094 FUNCAO ACOS    COSALL ALFMXR
0095 FRACAO          ALFMXR ALFMX   180.0   0.0#PI
(
(
(-----
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
(-----
DEFVAL          DALFMN -16.2
DEFVAL          DALFA   0.0
DEFVAL          ALFMN  #ALFMN
DEFVAL VAR      ALFMX  ALFAG
DEFVAL          ZERO    0.0
DEFVAL          IOMAX  #IOMAX
DEFVAL          IOMIN  #IOMIN
DEFVAL          VDCLMN #UDLW
DEFVAL          VDCLMX #UDHI
DEFVAL          IMRG   #IMRG
DEFVAL VAR      UCI    ALFMX
DEFVAL          MHUM   -1.
DEFVAL          HUM    1.0
(
FIMCDU
```

APÊNDICE D

---

• *Modelo 03*

```
DCDU
(
(=====
(                               CONTROLES DO RETIFICADOR
(=====
(nc) ( nome cdu )
9001 POLO1-RET
(-----
(EFFPAR (npar) (   valpar   )
(-----
( PPC
DEFFPAR #TMUP           0.3
DEFFPAR #TMDW           0.1
DEFFPAR #TMSTR          0.5
( HOLD UD/CMR
DEFFPAR #UDCMN          0.45
DEFFPAR #TAX1           18.60
( STOL
DEFFPAR #T1MAX           1.0
DEFFPAR #AMAX            4.514
DEFFPAR #G1MAX           .05142
DEFFPAR #STMAX           40.996
DEFFPAR #YALIM           1.0
( TELECOM
DEFFPAR #TELCM           0.066
( CCA
DEFFPAR #KICCA           2500.00
DEFFPAR #KPCCA           102.0
( VCO
DEFFPAR #TVCO            .0017
( Limites de ALFA
DEFFPAR #ALFMX           163.0
DEFFPAR #ALFMN            5.0
(
DEFFPAR #PI              3.141592654
( VDCOL
DEFFPAR #TUP1            0.080
DEFFPAR #TDWN1           0.0054
DEFFPAR #UDHI            0.93
DEFFPAR #UDLW            0.326
DEFFPAR #FRMN            0.35
DEFFPAR #IOMIN           0.1
DEFFPAR #IOMAX           1.4
(
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
(-----
(=====
(                               CCA
(=====
0001 IMPORT CCNV          IDC
0004 SOMA                 IDC   ERRC
                        -I0   ERRC
0005 GANHO                ERRC  UCP   #KPCCA
0008 PROINT               ERRC  UCI   #KICCA   0.0   1.0       ALFMN  ALFMX
0009 SOMA                 UCP   UC
                        UCI   UC
0010 LIMITA               UC    UCL                ALFMN  ALFMX
```

APÊNDICE D

```

(=====
(
                                VCO
(=====
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
0014 SOMA          UCL    DALFA
                -ALFAC  DALFA
0015 LIMITA      DALFA  DALFAL                      DALFMN
DALFMX
0016 SOMA          DALFAL X0016
                SINCR  X0016
0017 PROINT      X0016  ALFAC    720.  0.0  1.0          ALFMN
ALFMX
0019 SOMA          ALFAG  X0019
                -ALFAC  X0019
0020 DELAY       X0019  X0020
0021 FRACAO      X0020  SINCR    1.0  0.0  36.0  0.0
(
0022 IMPORT ANGL          ANG
1022 LEDLAG      ANG    VANGR    1.0  0.0  1.0  0.02
0023 FRACAO      VANGR  VANGG  180.0  0.0 #PI  0.0
0024 PROINT      DALFAL X0024  -720.  0.0  1.0
0025 SOMA          VANGG  ALFAG
                -X0024  ALFAG
0026 FRACAO      ALFAG  ALFAR  #PI    0.0 180.0  0.0
0027 EXPORT ALFA  ALFAR
(
(
                                LIMITE DE DERIVADA DE ALFA
(
0032 DELAY       UCL    ALFANT
0033 FUNCAO RAMPA ALFANT DALFMX  56.0  79.0 124.0  11.0
0034 FUNCAO PULSO ALFANT X00020  45.0  4.20 68.0  0.0
0035 FUNCAO RETA  X00020 DALFMN  1.0  -5.6
(=====
(
                                VDCOL
(=====
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
0039 ENTRAD          VDC0
0040 IMPORT VCNV          VDC
0254 DIVSAO          VDC    VDCM
                VDC0    VDCM
(
(Dinamica do VDCOL
(
0041 LAGNL          VDCM  VDCL    1.0#TDWN1#TUP1          VDCLMN VDCLMX
0042 FUNCAO RAMPA  VDCL  X42    #UDLW #FRMN #UDHI    1.0
0044 LIMITA        I00r  X44
                X42    X45
0045 MULTPL        X44    X45
0047 LIMITA        X45    I0          I0MIN  I0MAX
(=====
(
                                PPC - POWER POLE CONTROL
(=====
(
                                CALCULO DA ORDEM DE CORRENTE
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
0119 ENTRAD          Pord
0120 LAGNL          Pord  P00    1.0  #TMUP #TMDW
0122 LEDLAG        VDC  VDCF    1.0  0.0  1.0  #TMSTR VDCMIN BIG
1122 LIMITA        VDCF  VDCFLL          VDCMIN BIG
0123 T/HOLD        VDCFLL VDPPC
                TRACK  VDPPC
0124 DIVSAO        P00    Iord

```

APÊNDICE D

```

                                VDPPC  Iord
(
                                HOLD UD/CMR
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
0125 IMPORT DT                                DELTT
0126 FUNCAO PULSO  VDC  H0      0.0  0.0  #UDCMN 1.0
0127 DELAY        VDC  H1
0128 SOMA         H1      H2
                                -VDC  H2
0129 DIVSAO      H2      H3
                                DELTT  H3
0130 FUNCAO PULSO  H3      H4      1.0  0.0  #TAX1 1.E+6
0131 SOMA        H4      H5
                                H10     H5
0132 PROINT     H5      H6      1.0  0.0  1.0          ZERO  HUM
0133 SOMA        H6      H7
                                H10     H7
0134 PROINT     H12     H8      1.0  0.0  1.0          ZERO  DEZ
0135 FUNCAO PULSO  H8      H9      0.0 -1.0  2.0  0.0
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
0136 FUNCAO PULSO  H8      H10     2.0 -1.E+6 2.50  0.0
0137 DELAY        H7      H12
0138 FUNCAO RETA  H9      H11     1.0  1.0
0139 LOGIC  .AND.  H0      TRACK
                                H11     TRACK
(
                                STOL
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
0140 ENTRAD      YALIM
0141 IMPORT CCNV  IDRET
0142 SOMA        -YALIM  ST1
                                IDRET  ST1
0143 SOMA        YALIM  ST2
                                IDRET  ST2
0144 MULTPL     ST1     ST3
                                ST2     ST3
0145 PROINT     ST3     ST4      1.0  0.0  #T1MAX          ZERO  BIG
0146 FUNCAO RETA  ST4     ST5      1.0  -#AMAX
0147 GANHO      ST5     ST6      #G1MAX
0148 LIMITA     ST6     ST7          ZERO  BIG
0149 FUNCAO RETA  ST7     ST8     -1.0  #STMAX
0150 LIMITA     ST8     STOL          YALIM  BIG
0151 MIN        STOL   STIO
                                Iord   STIO
(
                                TELECOM
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
0152 LEDLAG     STIO   I00i    1.0  0.0  1.0  #TELCM
0153 LEDLAG     I00i   TL1     1.0  0.0  1.0  #TELCM
0154 MAX        STIO   I00r
                                TL1     I00r
0251 EXPORT CDU  I00i
(-----
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
(-----
DEFVAL VAR      VDC0  VDC
DEFVAL          DALFA  0.0
DEFVAL          DEZ    10.0
(DEFVAL        VDCMIN  0.975
DEFVAL          VDCMIN  0.000
DEFVAL          BIG    1.E+6
(
DEFVAL          ALFMN  #ALFMN
DEFVAL          ALFMX  #ALFMX

```

APÊNDICE D

```
DEFVAL      ZERO      0.0
DEFVAL      HUM       1.0
DEFVAL      IOMAX    #IOMAX
DEFVAL      IOMIN    #IOMIN
DEFVAL      VDCLMN   #UDLW
DEFVAL      VDCLMX   #UDHI
( STOL
DEFVAL      YALIM    #YALIM
DEFVAL      STOL     #IOMAX
( HOLD UD/CMR
DEFVAL      H6       0.0
DEFVAL      H8       0.0
( PPC
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
(DEFVAL      Pord    1.00
DEFVAL VAR   Iord    IDC
FIMCDU
(
(=====
(          CONTROLES DO INVERSOR
(=====
(nc) ( nome cdu )
9002 POLO1-INV
(-----
(EFFPAR (npar) (   valpar   )
(-----
(-----
(
(-----
(EFFPAR (npar) (   valpar   )
(-----
( CCA
DEFPAR #KICCA      5000.00
DEFPAR #KPCCA      47.0
( VCO
DEFPAR #TVCO       .0014
( Limites de ALFA
DEFPAR #ALFMN      100.0
( VDCOL
DEFPAR #TDWN1      0.004
DEFPAR #TUP1       0.050
DEFPAR #UDHI       0.93
DEFPAR #UDLW       0.279
DEFPAR #FRMN       0.30
DEFPAR #IOMIN      0.1
DEFPAR #IOMAX      1.4
( Margem de corrente
DEFPAR #IMRG       0.1
( CEC
DEFPAR #KCEC       51.00
(
DEFPAR #PI         3.141592654
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 )(vmin) (vmax)
(-----
(
( CCA
(
0001 IMPORT CCNV      IDC
0002 IMPORT CDU       I00i      2043
0003 ENTRAD          IMRG
```



APÊNDICE D

```

- IDC    DI
0052 LIMITA    DI    X52                ZERO    IMRG
0053 GANHO     X52    CEC      #KCEC
0054 ENTRAD    AREARF AREARF
0055 SOMA      AREARF AMING
                CEC    AMING
0056 FRACAO    AMING  AMIN    #PI    0.0 180.0  0.0
0057 FUNCAO  COS    AMIN    X57
(
( ALFA MAXIMO (AREA MINIMA)
(
0081 IMPORT VOLT          VAC
0082 IMPORT CTAP          CTAP
0083 IMPORT CNVK          CNVK
0084 IMPORT RCNV          DXL
0085 GANHO      DXL    DXL2    2.0
0086 DIVSAO     DXL2   CTEINV
                CTAP   CTEINV
                CNVK   CTEINV
0087 MULTPL     IDC    X87
                CTEINV X87
0088 DIVSAO     X87    X88
                VAC    X88
0092 SOMA      X88    COSAL
                -X57   COSAL
0093 LIMITA    COSAL  COSALL          MHUM    HUM
0094 FUNCAO  ACOS    COSALL ALFMXR
0095 FRACAO    ALFMXR ALFMX   180.0  0.0#PI
(
(
(-----
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
(-----
DEFVAL VAR    VDC0    VDC
DEFVAL        DALFMN -16.2
DEFVAL        DALFA   0.0
DEFVAL        ALFMN   #ALFMN
DEFVAL VAR    ALFMX   ALFAG
DEFVAL        ZERO    0.0
DEFVAL        IOMAX   #IOMAX
DEFVAL        IOMIN   #IOMIN
DEFVAL        VDCLMN  #UDLW
DEFVAL        VDCLMX  #UDHI
DEFVAL        IMRG    #IMRG
DEFVAL VAR    UCI     ALFMX
DEFVAL        MHUM    -1.
DEFVAL        HUM     1.0
(
FIMCDU

```