

TESE

851

EFEI

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

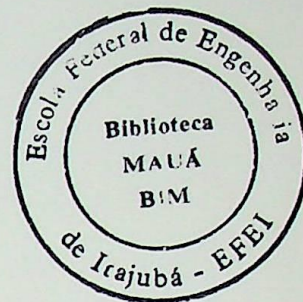
MODELAGEM, AJUSTE DE PARÂMETROS DE CONTROLE E
SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA MULTITERMINAL DE
TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

IVONE MARIA DE OLIVEIRA

ITAJUBÁ - MG - BRASIL

1996

**MODELAGEM, AJUSTE DE PARÂMETROS DE CONTROLE E
SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA MULTITERMINAL DE
TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA**



Dissertação submetida à
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

por

Ivone Maria de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto D. Coelho (EFEI)
Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira (UFU)

EFEI - ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
ITAJUBÁ - MG - BRASIL
Maio de 1996

CLASS. 621.315:621.3.024(043.2)
CUT: 048 m
TOMBO. 851





Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Instituto de Engenharia de Energia e Eletrônica

ANEXO II

PLANO DE TRABALHO DA UNIDADE CURRICULAR

Nome do Aluno: OLIVEIRA, IVONE MARIA DE
Título da Dissertação: Modelagem, Ajuste de Parâmetros de Controle e Simulação de um Sistema Multiterminal de Transmissão em Corrente Contínua

ALUNO

EXERCÍCIOS	CONTEÚDO	SERVIÇO
1	A+	
2	A+	
3	A+	
4	A+	

OLIVEIRA, IVONE MARIA DE

MODELAGEM, AJUSTE DE PARÂMETROS DE CONTROLE E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA MULTITERMINAL DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ - EFEI

1. TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA
2. SISTEMA MULTITERMINAL
3. CONTROLE LINEAR

I. EFEI

II. TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação "Modelagem, Ajuste de Parâmetros de Controle e Simulação de um Sistema Multiterminal de Transmissão em Corrente Contínua"

Autor: Ivone Maria de Oliveira

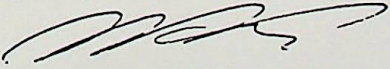
JULGAMENTO

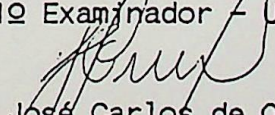
EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A+	
2º	A+	
3º	A+	
4º	A+	

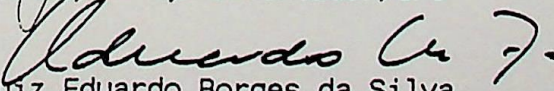
Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, aprovada com distinção

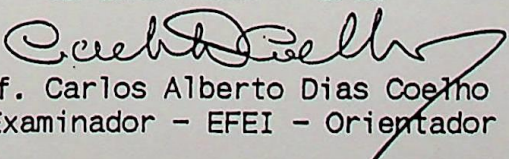
Observações: _____

Itajubá, 03 de Maio de 1996.


Prof. Waldir Pó
1º Examinador - USP


Prof. José Carlos de Oliveira
2º Examinador - Co-Orientador/UFU


Prof. Luiz Eduardo Borges da Silva
3º Examinador - EFEI


Prof. Carlos Alberto Dias Coelho
4º Examinador - EFEI - Orientador

Agradecimentos

A FUERNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., em especial à Superintendência de Operação (SO/O) e ao Departamento de Estudos Técnicos (DET/OT), pela oportunidade de trabalho no CEN – Centro de Engenharia de Sistemas Elétricos, e pelo apoio providenciado para a desenvolvimento deste trabalho de Doutorado de Mestrado.

Aos amigos da Direção de Apoio ao Sistema de Operação (DANS/O), principalmente ao Setor de Média Tensão (SM/T), pelo constante apoio e colaborações prestadas ao longo desta pesquisa.

Ao Professor Carlos Alberto Dias Godini pela atenção, obsequio e competente orientação.

Aos Professores José Carlos de Oliveira pela eficiente e relevante co-orientação.

Aos Pais, Cristiano Lopes por sua amizade, incentivo e exemplo.

Aos amigos Carla, Djalma e Juarez.

Agradecimentos

À FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., em especial à Superintendência de Operação (SO.O) e ao Departamento de Estudos Elétricos (DEE.O), pela oportunidade de realização do CESE - Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos, e pelo apoio proporcionado para o desenvolvimento deste trabalho de Dissertação de Mestrado.

Aos amigos da Divisão de Análise do Sistema da Operação (DANS.O), principalmente ao Setor de Médio Prazo (SMP), pelo carinho, apoio e conhecimentos transmitidos ao longo desta pesquisa.

Ao Professor Carlos Alberto Dias Coelho pela atenciosa, atuante e competente orientação.

Ao Professor José Carlos de Oliveira pela eficiente e relevante co-orientação.

A Juarez Castrillon Lopes por sua amizade, incentivo e atenção.

Resumo

A evolução dos dispositivos eletrônicos de potência, empregados em equipamentos elétricos de alta tensão desde a década de 60, impulsionou a transmissão em corrente contínua a ocupar patamares elevados de confiabilidade e desempenho. A entrada em operação comercial de ligações em corrente contínua na configuração multiterminal em diversos países, demonstra os benefícios operativos proporcionados por esta tecnologia de transmissão de potência.

No Brasil, a expansão da ligação em corrente contínua ponto-a-ponto do Projeto Itaipu para o estado do Rio de Janeiro mostra-se viável e fundamenta a expectativa de transmissão em corrente contínua a três terminais. A importância de se deter conhecimentos sobre os modos de operação e desempenho do sistema de controle deste possível sistema multiterminal determinou a motivação concreta desta dissertação de mestrado.

Assim sendo, implantou-se no programa científico MATLAB for Windows, principal ferramenta computacional desta pesquisa, um modelo linear do sistema em corrente contínua a dois terminais em operação do complexo Itaipu, o qual foi verificado por comparação direta de resultados obtidos do programa de transitórios eletromecânicos MICRODIN. Em seguida, esse modelo foi expandido para representar a interligação a três terminais, mantendo-se uma representação linearizada de forma a permitir a aplicação de técnicas de sistemas de controle lineares para ajuste dos parâmetros variáveis do controlador da nova estação inversora.

Para a estabilização da malha de controle adicional foram, então, empregados algoritmos que determinam as principais características do comportamento transitório da resposta a degrau de um sistema linear. Tais algoritmos são executados automaticamente, proporcionando uma grande liberdade na obtenção de várias alternativas de solução.

Com o objetivo principal de minimizar ainda mais os esforços e tempo envidados em simulações, este projeto de pesquisa propõe um procedimento de análise para a seleção dos valores dos parâmetros de controle que proporcionem o melhor desempenho dinâmico do sistema de transmissão multiterminal. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo computacional iterativo que permite verificar, simultaneamente, as evoluções dos principais índices de desempenho que refletem o comportamento dinâmico do sistema multiterminal ao se variar, dentro de uma faixa preestabelecida, os parâmetros dos controladores.

Abstract

The evolution of the power electronic devices used in high voltage electric equipment since the sixties, allowed the Direct Current (DC) Transmission to reach high levels of reliability and performance. Each new Multiterminal Direct Current (MTDC) that came into operation in different countries reinforced the operational benefits offered by this technology of power transmission.

In Brazil, the expansion of the point-to-point High-Voltage DC Transmission (HVDC) of the Itaipu Project to Rio de Janeiro State was shown to be viable and raises the possibility of a three terminal direct current transmission system. The importance of the know-how about operation modes and dynamic behavior of the control system of this possible multiterminal was the main motivation of this master of science dissertation.

So, in this dissertation it was implemented, using the scientific program MATLAB for Windows, main computational tool used in this research, a linear model of the point-to-point direct current system in operation of the Itaipu Project, which was verified by direct comparison of its results with the results of the electromechanical transient simulation program MICRODIN. Then, the model was expanded to represent the three terminal interconnection and, still as a linearized representation, to allow the use of linear control system techniques to set the variable parameters of the control system of the new inverter station.

Then, to stabilize the additional control loop, algorithms were used to find out the main characteristics of the transient behavior to step inputs in a linear system. These algorithms are automatically executed, allowing great freedom in obtaining several alternative solutions.

With the main objective of minimize the efforts and time spent in simulations, this research project proposes an analysis procedure to the selection of the parameter values of the new controls that results in the best dynamic behavior of the MTDC transmission system. For that, a computational algorithm was developed which allows to verify, simultaneously, the evolutions of the main performance indexes that reflect the dynamic behavior of the multiterminal system when the controller parameters are varied within a previously defined range.

Identificação dos Principais Símbolos Utilizados

Ao longo deste trabalho, os principais parâmetros ou variáveis dos sistemas elétrico e de controle manipulados serão referenciados por símbolos, os quais estão definidos neste glossário. São eles:

$U_d \Rightarrow$ Tensão Contínua do Conversor de 6 pulsos;

$U_{do} \Rightarrow$ Tensão Contínua em Vazio do Conversor de 6 pulsos;

$U_{ac} \Rightarrow$ Tensão Alternada Eficaz (fase-fase) do Secundário do Transformador Conversor da ponte de 6 pulsos;

$I_d \Rightarrow$ Corrente Contínua;

$I_{ref} \Rightarrow$ Referência do Controle de Corrente Contínua;

$\Delta I_d \Rightarrow$ Margem de Corrente entre as Referências dos Controles de Corrente Contínua do Retificador e Inversor ($I_{ref_R} - I_{ref_I}$);

$I_{ac} \Rightarrow$ Corrente Alternada no Primário do Transformador Conversor da ponte de 6 pulsos;

$\alpha \Rightarrow$ Ângulo de Disparo do Conversor;

$\gamma \Rightarrow$ Ângulo de Extinção do Conversor;

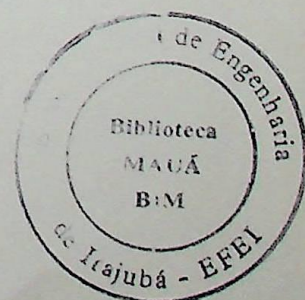
$\mu \Rightarrow$ Ângulo de Comutação do Conversor;

$\beta \Rightarrow$ Ângulo resultante da soma dos Ângulos de Comutação e Extinção do Conversor;

$\delta \Rightarrow$ Ângulo resultante da soma dos Ângulos de Disparo e Comutação do Conversor;

$R_c \Rightarrow$ Resistência de Comutação do Conversor de 6 pulsos;

$X_c \Rightarrow$ Reatância de Comutação do Conversor de 6 pulsos;



$r_{cv} \Rightarrow$ Resistência do Transformador Conversor da ponte de 6 pulsos referida ao lado do sistema em corrente contínua;

$x_{cv} \Rightarrow$ Reatância do Transformador Conversor da ponte de 6 pulsos referida ao lado do sistema em corrente contínua;

$r_t \Rightarrow$ Resistência do Transformador Conversor da ponte de 6 pulsos;

$x_t \Rightarrow$ Reatância de Dispersão do Transformador Conversor da ponte de 6 pulsos;

$r_a \Rightarrow$ Resistência do Reator de Alisamento;

$l_a \Rightarrow$ Indutância do Reator de Alisamento;

$r_{cc} \Rightarrow$ Resistência da Linha de Corrente Contínua;

$l_{cc} \Rightarrow$ Indutância da Linha de Corrente Contínua.

As siglas foram mantidas como escritas na língua inglesa, pois são de uso consagrado em todo o mundo e por isso incorporadas ao jargão do setor elétrico brasileiro.

Os símbolos, quando acompanhados do índice "R", referem-se às variáveis e parâmetros da estação retificadora e se seguidos do índice "I", referem-se às da estação inversora.

MODELAGEM, AJUSTE DE PARÂMETROS DE CONTROLE E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA MULTITERMINAL DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

Por: Ivone Maria de Oliveira

Sumário

	Página
<i>Agradecimentos</i> _____	v
<i>Resumo</i> _____	vi
<i>Abstract</i> _____	vii
<i>Identificação dos Principais Símbolos Utilizados</i> _____	viii
<i>Sumário</i> _____	x
Capítulo 1 - Introdução _____	1
1.1 - <i>Considerações Iniciais</i> _____	1
1.2 - <i>Motivação desta Dissertação</i> _____	4
1.3 - <i>Objetivo e Escopo</i> _____	5
1.4 - <i>Descrição do Texto</i> _____	6
Capítulo 2 - Alternativa Multiterminal para o Sistema CC Itaipu _____	8
2.1 - <i>Introdução</i> _____	8
2.2 - <i>Descrição da Área CA de Interesse</i> _____	9
2.3 - <i>Descrição do Sistema CCAT do Projeto Itaipu</i> _____	13
2.4 - <i>Configurações Usuais de Sistemas Multiterminais</i> _____	16
2.4.1 - <i>Configuração Série</i> _____	16
2.4.2 - <i>Configuração Paralela</i> _____	17
2.4.3 - <i>Configuração Mista</i> _____	17
2.5 - <i>Características Básicas de Sistemas Multiterminais</i> _____	18
2.5.1 - <i>Configuração Série</i> _____	18
2.5.2 - <i>Configuração Paralela</i> _____	19

Capítulo 3 - Modelo Linear do Sistema de Corrente Contínua Ponto-a-Ponto _ 20

3.1 - Abordagem do Modelo	20
3.2 - Modelo Linear do Elo Foz-Ibiúna	21
3.2.1 - Pontes Conversoras	21
3.2.2 - Controle de Disparo das Pontes Conversoras	24
3.2.2.1 - Estação Retificadora	27
3.2.2.2 - Estação Inversora	31
3.2.3 - Linha de Transmissão CC	36
3.3 - Modelo do Sistema CA	39

Capítulo 4 - Verificação do Modelo Linear do Sistema Ponto-a-Ponto _____ 50

4.1 - Simplificações Adotadas	50
4.2 - Dados dos Sistemas Elétrico e de Controle	55
4.3 - Verificação do Modelo do Elo CC	57
4.3.1 - Simulação no MICRODIN	57
4.3.2 - Simulação no MATLAB	58
4.4 - Avaliação do Modelo Linear	64

Capítulo 5 - Modelo Linear do Sistema Multiterminal em Corrente Contínua _ 65

5.1 - Introdução	65
5.2 - Opções para a Expansão do Elo Foz-Ibiúna	66
5.3 - Modo de Controle do Sistemas MTCC Paralelo	68
5.3.1 - Controle da Margem de Corrente	70
5.3.2 - Característica Estática do Sistema Multiterminal	71
5.4 - Modelo Linear do Sistema MTCC	74
5.4.1 - Estação Inversora Rio	75
5.4.2 - Controle de Corrente da Inversora Rio	76
5.4.3 - Linhas de Transmissão CC	77
5.4.3.1 - Linha CC Foz-Ibiúna	77
5.4.3.2 - Linha CC Ibiúna-Rio	77
5.4.4 - Sistema CA da área Rio	78
5.5 - Dados do Sistema Elétrico	80

Capítulo 6 - Ajuste dos Parâmetros de Controle da Conversora Rio	82
6.1 - Diretrizes	82
6.2 - Diagrama de Blocos do Sistema Multiterminal	83
6.3 - Equação Matricial de Entrada-Saída de um Sistema Multiterminal	85
6.4 - Ajuste dos Parâmetros de Controle	89
6.4.1 - Controle Proporcional Puro	90
6.4.2 - Controle Proporcional-Integral	101
6.5 - Simulações	109
 Capítulo 7- Conclusões	 112
 Bibliografia	 115
 Apêndice A	 118
 Apêndice B	 128
 Apêndice C	 135

Capítulo 1

Introdução

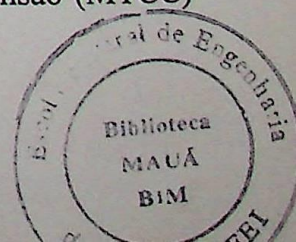
1.1 - Considerações Iniciais

Há pelo menos três décadas a Transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) tem avançado e ocupado um lugar de destaque na área de transmissão de energia elétrica. O reconhecimento do seu alto grau de confiabilidade e desempenho tornou-a uma alternativa atraente e competitiva em relação à Transmissão em Corrente Alternada em Alta Tensão (CAAT).

A maioria dos sistemas CCAT em operação comercial, caracterizada por transmissão do tipo ponto-a-ponto (PAP) ou por estações 'back-to-back' [1,2], foi a melhor solução técnico-econômica em situações que exigiram a aplicação das vantagens operativas oferecidas pela transmissão em corrente contínua, como:

- ◆ transmissão de grandes blocos de potência a longa distância;
- ◆ interligação de sistemas em corrente alternada (CA) através de longos cabos marítimos;
- ◆ interligação de sistemas CA com frequências diferentes, com filosofias de operação distintas ou que não operam em sincronismo;
- ◆ estabilização de sistemas CA através de modulação da transmissão de potência ativa ou do consumo de potência reativa;
- ◆ controle de nível de curto-circuito de sistemas CA.

O grande avanço tecnológico e industrial nas áreas de controle digital e de sistemas de telecomunicação, bem como a evolução de equipamentos especiais de manobra, impulsionaram melhorias nas transmissões em corrente contínua que viabilizaram a operação de sistemas Multiterminais de Transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão (MTCC) [2,3].



Algumas ligações CCAT existentes já possuem algumas propriedades de operação multiterminal. A operação em paralelo de estações conversoras em uma mesma linha de corrente contínua (CC), quando de uma falta permanente ou mesmo na indisponibilidade por longo tempo de outra linha CC, apresenta-se como um caso simples de sistema multiterminal. Como exemplos, podem ser mencionados os projetos de Inga-Shaba no Zaire, Cabora Bassa em Moçambique e Nelson River em Manitoba, Canadá [1,4].

O sistema de transmissão CCAT Nelson River da Manitoba Hydro, inicialmente composto por um bipolo utilizando válvulas a arco de mercúrio e com valores nominais de 1620 MW, ± 450 kV e 1800 A, teve seu segundo bipolo concluído, empregando válvulas a tiristores, por volta de 1980 e com valores nominais de 1800 MW, ± 500 kV e 1800 A. Após a entrada em operação do bipolo 2 viabilizou-se a ligação em paralelo dos dois bipolos [5], apesar das estações retificadoras, situadas na região norte de Manitoba, estarem afastadas de 40 Km e as estações inversoras situarem-se na mesma localidade da região sul de Manitoba.

Outro projeto de destaque no emprego da operação em paralelo é o sistema de transmissão Pacific Intertie, pois sua conexão em paralelo é mais que uma situação alternativa, é um modo de operação. Originalmente com capacidade de transmissão de 2000 MW (± 500 kV), e interligando o noroeste e o sudoeste dos Estados Unidos na configuração bipolar, através da combinação de válvulas a arco de mercúrio e a tiristores, foi expandido para 3100 MW (± 500 kV) ao adicionar conversores a tiristores em paralelo aos já instalados. A entrada em operação comercial do bipolo com o arranjo em paralelo ocorreu em meados de 1989 [3,6].

A caracterização de uma real ligação MTCC está baseada na separação geográfica de três ou mais estações conversoras que componham um sistema de transmissão em corrente contínua. O projeto Sardenha (Itália) foi, de fato, o primeiro sistema de transmissão multiterminal em operação.

Depois de mais de vinte anos em serviço como uma ligação convencional a dois terminais, o projeto Itália-Sardenha (200 MW, 200 kV) passou a operar, por volta de 1987, como um sistema a três terminais. A terceira conversora, localizada na Ilha de Córsega, está conectada em paralelo à linha CC e opera como retificadora ou inversora de 50 MW em 200 kV [7].

Mais recentemente, em 1992, iniciou-se a operação plena do primeiro sistema multiterminal de grande porte, o projeto Quebec - New England. Inicialmente composta por uma ligação bipolar ponto-a-ponto de 690 MW (171 Km) entre Des Cantons, Quebec, Canadá, e Comerford, New Hampshire, USA, esta transmissão compreenderia, em uma segunda etapa, o sistema multiterminal a quatro terminais, com a inclusão em paralelo de uma estação retificadora (2250 MW), Radisson, ao norte do Canadá (1010 Km) e de uma estação conversora (1800 MW), Sandy Pond, na região oeste de Boston (215 Km ao sul). Haveria, ainda, uma terceira fase, abrangendo uma quinta estação conversora (2138 MW), Nicolet, próxima a Montreal [8]. O resultado efetivo deste projeto foi a transmissão a três terminais composta pelas conversoras Radisson, Nicolet e Sandy Pond.

No Brasil, o principal sistema de transmissão em corrente contínua pertence a FURNAS Centrais Elétricas S.A. Integrando o projeto Itaipu, este sistema CCAT é responsável pela transmissão de 6300 MW gerados pela usina hidrelétrica (UHE) de Itaipu 50 Hz. Sua estação retificadora, em Foz do Iguaçu, Paraná, interliga-se com a inversora, em Ibiúna, São Paulo, através de dois bipolos em ± 600 kV e com extensão de 800 Km. A influência desta transmissão no sistema interligado das regiões sul e sudeste do país pode ser avaliada constatando-se que a perda de transmissão de uma de suas quatro linhas equiivale à perda de geração de uma UHE como Marimbondo (1440 MW), Furnas (1216 MW) ou Luiz Carlos Barreto (1050 MW) do sistema FURNAS.

Pela sua importância, o sistema CCAT do projeto Itaipu foi provido da estrutura de operação em paralelo de suas conversoras em caso de defeito e/ou manutenção de uma linha CC. Deste modo, durante situações de indisponibilidade de linha, fica garantido o restabelecimento da capacidade de transmissão e assim o alto nível de disponibilidade e confiabilidade do sistema de transmissão [9,10]. O término do comissionamento da operação em paralelo ocorreu em 1987.

Os projetos até então mencionados corroboraram as vantagens adicionais oferecidas pelos sistemas multiterminais de transmissão em corrente contínua. Vantagens que vêm conduzindo as concessionárias de energia elétrica a direcionarem seus interesses a esta atual técnica de transmissão de energia, especialmente em países de grande extensão territorial, tais como os Estados Unidos, o Canadá, o Brasil e outros. E é dentro deste cenário que o desenvolvimento de ferramentas computacionais nacionais e modelos adequados para a avaliação de desempenho de tais sistemas, tanto em regime permanente quanto em condições transitórias e dinâmicas, mostram-se importantes.

1.2 - Motivação desta Dissertação

Ao destacar uma das principais vantagens operativas oferecida pelos sistemas MTCC, o número de possibilidades de configurações, abrem-se inúmeras opções técnico-econômicas para extensões de elos CC que se encontrem em operação, as quais proporcionariam maior escoamento e melhor distribuição da potência elétrica transmitida.

No sistema elétrico brasileiro, a aplicação da alternativa de um sistema MTCC apresenta-se viável ao se avaliar, por exemplo, os reforços necessários ao sistema de suprimento dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Sua implementação se realizaria pela expansão de um dos bipolos da transmissão CC do projeto Itaipu através da instalação de uma estação inversora adicional perto do centro de carga da área Rio de Janeiro, a qual receberia uma injeção de potência da ordem de 1500 MW.

A referência [11] apresenta a análise técnica e econômica de tal alternativa que, durante sua fase de estudo, constatou o número reduzido de ferramentas computacionais nacionais que permitissem aprofundar conhecimento sobre o tema. Inclusive este dado fica reforçado ao se lembrar que o estudo de desempenho dinâmico da operação em paralelo do sistema Itaipu foi basicamente realizado em simulador de corrente contínua [10], por carência de ferramentas digitais que incorporassem configurações de sistemas multiterminais.

Atualmente encontram-se disponíveis no setor elétrico os programas ANAREDE, de fluxo de potência, e ANATEM, de estabilidade dinâmica, desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, que incluem modelos de sistemas CC multiterminais. Inclusive, na realização deste trabalho, foi utilizada a opção de configuração multiterminal do programa ANAREDE.

Procurando tornar disponíveis modelos lineares adequados para análise, ajuste e compensação dos sistemas de controle de ligações multiterminais, esta dissertação propõe um modelo linearizado da extensão do elo CC Foz-Ibiúna a três terminais, bem como um procedimento de análise de desempenho do sistema de transmissão para o ajuste eficiente dos parâmetros do sistema de controle. Vale acrescentar que o desenvolvimento e as conclusões obtidas podem ser aplicados a outros sistemas multiterminais de mesmas características físicas.

1.3 - Objetivo e Escopo

Os objetivos principais deste trabalho são o desenvolvimento de um modelo linear de um sistema de transmissão em corrente contínua a três terminais, fundamentado na viabilidade de expansão da ligação CC ponto-a-ponto do projeto Itaipu para o estado do Rio de Janeiro, e o ajuste dos parâmetros variáveis do sistema de controle da estação inversora a ser instalada.

São apresentadas as estratégias de controle usualmente empregadas nos projetos de transmissão CC na configuração multiterminal e, a partir deste conhecimento, definido o modo de operação em controle de corrente constante para a nova estação inversora.

Para a determinação dos valores dos parâmetros variáveis do controle de corrente adicional são empregados algoritmos computacionais baseados na teoria do lugar das raízes da equação característica do sistema linear que fornecem, automaticamente, as principais características dinâmicas da resposta a degrau. Estes algoritmos proporcionam uma grande liberdade na obtenção de várias alternativas de solução.

No intento de minimizar a necessidade de simulação na decisão do ajuste final, é desenvolvido um novo algoritmo computacional, empregando os anteriores, que possibilita um conhecimento amplo sobre o comportamento dinâmico do sistema, como também permite adquirir sensibilidade da influência da variação dos parâmetros de controle no desempenho do sistema multiterminal.

O emprego do algoritmo acima mencionado, possibilita estabelecer um procedimento de análise de resultados para uma escolha eficiente dos valores dos parâmetros de controle que melhor atendam as especificações de desempenho desejadas para o sistema de transmissão.

1.4 - Descrição do Texto

Um resumo da evolução e dos benefícios operativos alcançados com a operação de sistemas de transmissão em corrente contínua na configuração multiterminal no cenário mundial foi então apresentado no capítulo 1, onde também foram estabelecidas as razões que motivaram a pesquisa deste tema de dissertação de mestrado, bem como as metas e ações para seu desenvolvimento.

No capítulo seguinte, isto é, no capítulo 2, é oferecida uma visão atual e geral sobre a estrutura funcional do sistema elétrico brasileiro, como também enunciados os principais circuitos de transmissão que compõem o sistema de FURNAS. São descritos os limites operativos da rede de suprimento às áreas Rio de Janeiro e Espírito Santo, os quais conduzem à alternativa de extensão do sistema de transmissão ponto-a-ponto em corrente contínua do projeto Itaipu à configuração multiterminal, e descrito, de forma mais detalhada, o sistema de transmissão em corrente contínua do projeto Itaipu. São, também, esclarecidas as configurações usuais e as características básicas de operação de sistemas MTCC a fim de propiciar um amplo entendimento do conteúdo deste trabalho.

O modelo linear da ligação em corrente contínua Foz-Ibiúna a ser expandido para a configuração a três terminais é desenvolvido no capítulo 3. Para a melhor compreensão da modelagem estabelecida, é feita uma explanação sucinta dos principais modos de operação do sistema CC para então representar, por seus modelos matemáticos, apenas os controladores e elementos de transmissão que fundamentalmente determinam o desempenho dinâmico. Ao final, o modelo linearizado do sistema ponto-a-ponto é apresentado nas formas de diagrama de blocos e equação matricial de estado.

O capítulo 4 aborda a adequacidade do modelo linear do sistema ponto-a-ponto a fim de assegurar uma representação confiável do provável sistema multiterminal. A modelagem desenvolvida é verificada aplicando-se degraus nas referências dos controles de corrente das estações retificadoras em ambos os modelos, o linear implantado no programa MATLAB for WINDOWS, e o não linear implantado no programa MICRODIN, e comparando-se os comportamentos transitórios das correntes contínuas. Para esta avaliação do modelo linear foram adotados os mesmos valores de parâmetros elétricos e de controle utilizados nos estudos de Planejamento da Operação Elétrica de FURNAS.



Assegurada a representação do elo CC, o capítulo 5 ocupa-se em discorrer sobre o modo de controle convencional de sistemas multiterminais com configuração paralela, para com isso definir o modo de operação da estação inversora a ser instalada na área Rio. Após esta definição, é desenvolvido o modelo linear da transmissão a três terminais, o qual é apresentado através de diagrama de blocos. Por fim, são definidos os parâmetros elétricos dos novos elementos de transmissão e então ajustado o caso teste do sistema multiterminal, utilizando o programa de fluxo de potência ANAREDE, para a determinação das condições nominais de operação do novo sistema.

O capítulo 6 abrange a análise de desempenho e ajuste do sistema de controle da estação inversora adicional. Conforme será definido no capítulo 5, o modo de operação da estação Rio será em controle de corrente constante, executado por um controlador do tipo proporcional-integral, que terá seus parâmetros variáveis determinados através de um procedimento sistemático de ajuste baseado na teoria do Lugar das Raízes e composto de duas etapas. Numa primeira etapa, será introduzido apenas o efeito proporcional do controlador e definido o valor de ganho que propicie um desempenho adequado do sistema. Na segunda, para o valor de ganho proporcional já estipulado, será acrescentado o elemento integrador, e seu parâmetro variável será ajustado de forma a obter o comportamento da resposta do sistema dentro de índices de desempenho especificados. Então, serão realizadas simulações apresentando os resultados alcançados.

Por último, o capítulo que tratará das conclusões desta pesquisa é designado por capítulo 7, o qual se deterá em consolidar as principais orientações, análises e contribuições apresentadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, as quais se concentrarão na aplicação de técnicas de sistemas de controle lineares na estabilização das malhas de controle de um sistema de transmissão em corrente contínua na configuração multiterminal.

Capítulo 2

Alternativa Multiterminal para o Sistema CC Itaipu

2.1 - Introdução

O impulso tecnológico na área de controle digital permitiu que a estrutura clássica dos sistemas de controle de transmissões em corrente contínua ponto-a-ponto, constituída basicamente de controladores de potência, de corrente e de disparo das conversoras, superpostos a limites de corrente dependentes da tensão, evoluísse a ponto de propiciar, com alta confiabilidade, a operação de sistemas CC multiterminais.

No Brasil, a transmissão em corrente contínua na configuração multiterminal despontou como solução alternativa à transmissão em corrente alternada no reforço ao atendimento à demanda dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Este empreendimento mostrou-se viável através de uma extensão do elo CC entre Foz do Iguaçu (PR) e Ibiúna (SP) ao estado do Rio de Janeiro. Naturalmente, por se tratar de um projeto inovador para o sistema elétrico brasileiro, exige conhecimentos mais profundos sobre suas propriedades e aspectos de operação.

Para melhor compreensão dos benefícios oferecidos por essa alternativa de transmissão, neste capítulo serão apresentados um relato das condições operativas da área Rio de Janeiro/Espírito Santo (suas limitações), uma descrição do sistema de transmissão CCAT do projeto Itaipu, o qual seria expandido, e uma abordagem das principais características e modos de operação possíveis de sistemas MTCC.

2.2 - Descrição da Área CA de Interesse

O sistema elétrico brasileiro apresenta-se interligado entre as regiões sul e sudeste e entre as regiões norte e nordeste do país. Quatro companhias federais e regionais (Eletronorte, Chesf, FURNAS e Eletrosul), controladas pela empresa 'holding' Eletrobrás, atuam como empresas supridoras de energia elétrica e são responsáveis pela transmissão de grandes blocos de energia do sistema.

Como empresa possuidora de um importante parque gerador, a Itaipu Binacional integra-se de maneira peculiar ao sistema elétrico brasileiro através de outras empresas supridoras. Já as companhias estaduais, algumas também detentoras de grande capacidade de geração, integram-se como companhias distribuidoras, comprando energia das empresas supridoras para garantia de atendimento à demanda.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. (FURNAS), empresa regional supridora da região sudeste e de parte de alguns estados da região centro-oeste, se interliga com a região sul através da transmissão em alta tensão em 765 kV que integra o sistema receptor da UHE Itaipu 60 Hz. Como empresa supridora, apresenta a característica de ser dividida por áreas de atendimento que compõem seu sistema de transmissão (ver figura 2.1(a)). São elas:

- ◆ 500 kV/345 kV para a área Rio de Janeiro/Espírito Santo;
- ◆ 500 kV para a área Minas Gerais;
- ◆ 345 kV/230 kV para a área Goiás/Brasília e parte de Tocantins;
- ◆ 765 kV do sistema receptor da UHE Itaipu 60 Hz e interligação Sul/Sudeste;
- ◆ ± 600 kV em corrente contínua (CCAT), do sistema receptor da UHE Itaipu 50 Hz;
- ◆ 500 kV para a área São Paulo.

A área Rio de Janeiro/Espírito Santo, ou simplesmente área Rio, é a de interesse deste trabalho. Com geração própria na ordem de 1200 MW face a uma carga em torno de 5000 MW, é atendida por dois grandes sistemas radiais: os troncos de 500 kV e 345 kV para toda a área e os troncos de 345 kV e 138 kV que atendem às empresas distribuidoras Cerj e Escelsa.

Grandes blocos de potência são transportados por estes troncos. O controle de tensão local é realizado através de três compensadores síncronos, localizados em barras de interligação de FURNAS com a Light (SE Grajaú) e com a Escelsa (SE Vitória), e em usinas de FURNAS e da Light, que se interligam com o sistema de transmissão para a área.

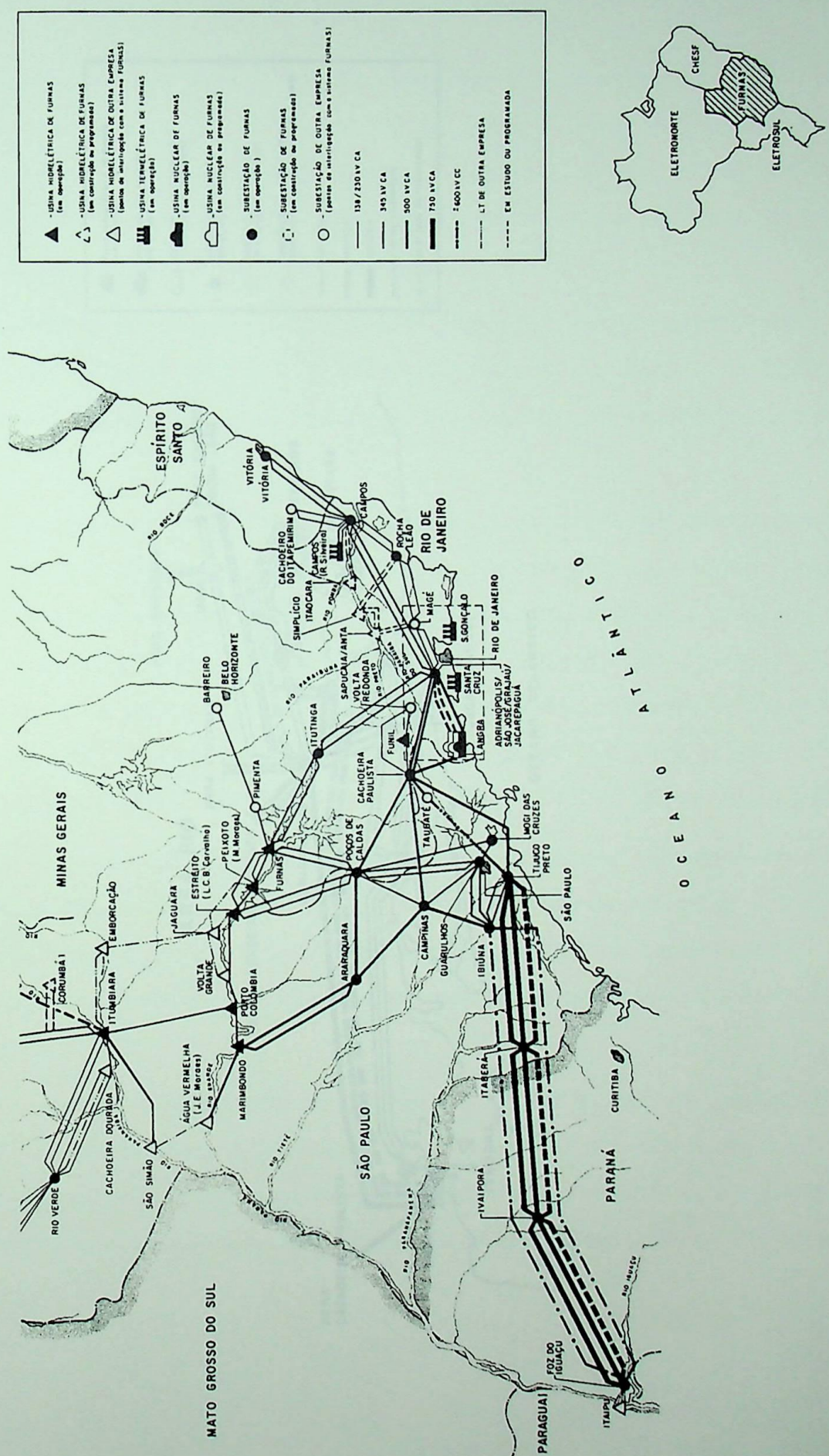
A figura 2.1(b) apresenta, de maneira simplificada, a área Rio de Janeiro.

Já há alguns anos, os estudos no âmbito do Planejamento da Operação Elétrica para definição dos valores máximos de transmissão para a área Rio, demonstram que os limites de regime permanente são alcançados antes dos limites de estabilidade eletromecânica. Isto porque, durante o período transitório das investigações dinâmicas, com resultados estáveis, os níveis de tensão apresentam-se inferiores ao permitido, podendo acarretar a interrupção do fornecimento de energia ao consumidor por atuação de suas proteções de subtensão.

Desse modo, os valores de fluxo de potência, para os quais são alcançados os limites mínimos de tensão das barras de interligação durante emergências na rede de 500 kV, as mais severas da área, são fluxos inferiores aos que causariam instabilidade dinâmica eletromecânica. Conseqüentemente, o limite de regime permanente tem sido o fator limitante da área Rio.

A possibilidade de extensão do sistema em corrente contínua ponto-a-ponto do projeto Itaipu, tornando-o um sistema MTCC a três terminais, apresenta-se como uma solução alternativa para a expansão da estrutura de transmissão dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo na garantia da continuidade e qualidade no fornecimento de energia à região.

O terceiro terminal do sistema de transmissão em corrente contínua se localizaria próximo ao centro de carga da área Rio de Janeiro, mais precisamente, na SE São José [11]. A instalação dessa nova estação conversora, além de prover uma injeção de potência de aproximadamente 1500 MW, possibilitaria efetuar um controle efetivo e rápido de tensão na área, através de controladores que poderiam ser incorporados à malha principal de seu sistema de controle.



Figuro 2.1 (a) - Área de Atuacao de FURNAS

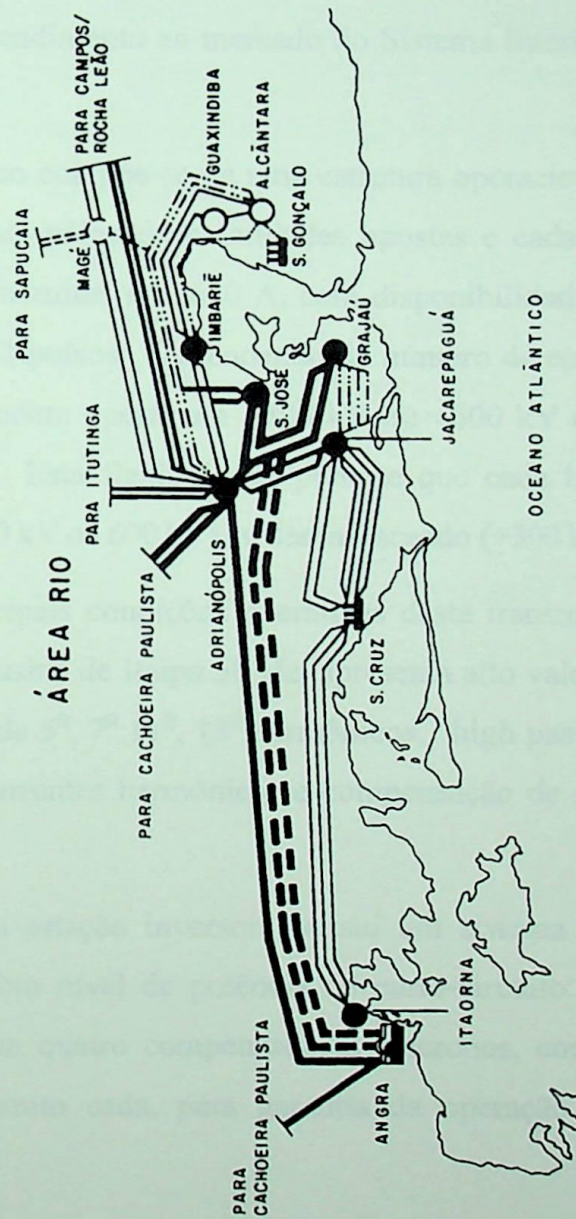
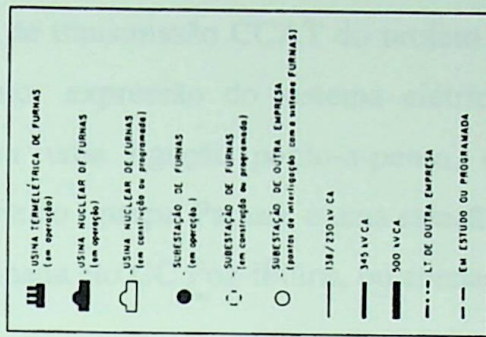


Figura 2.1 (b) - Área Rio de Janeiro / Espírito Santo

2.3 - Descrição do Sistema CCAT do Projeto Itaipu

O sistema de transmissão CCAT do projeto Itaipu é, atualmente, a ligação em corrente contínua de maior expressão do sistema elétrico brasileiro. Sua configuração operativa, caracterizada por uma ligação ponto-a-ponto, é composta de uma estação retificadora localizada em Foz do Iguaçu, Paraná, e uma estação inversora situada em Ibiúna, São Paulo, e, por isso, denominada elo CC Foz-Ibiúna, ou apenas elo Foz-Ibiúna.

Responsável pela transmissão de 6300 MW, produzidos por nove unidades geradoras da usina hidrelétrica de 50 Hz da Itaipu Binacional, este sistema CCAT é de fundamental importância para o atendimento ao mercado do Sistema Interligado das regiões sul e sudeste do país.

Seu arranjo físico compõe-se de uma estrutura operacional de dois bipolos, sendo cada um constituído de dois pólos de polaridades opostas e cada pólo, de potência nominal de 1575 MW e corrente nominal de 2610 A, com disponibilidade de operar empregando um ou dois conversores de 12-pulsos. Dependendo do número de conversores em série, os pólos de polaridade positiva podem operar em +300 kV ou +600 kV e os de polaridade negativa em -300 kV ou -600 kV. Esta flexibilidade permite que cada bipolo possa operar balanceado (ambos os pólos em 300 kV ou 600 kV) ou desbalanceado (+300 kV/-600 kV ou -300 kV/600 kV).

Quanto as principais condições operativas desta transmissão, sua estação retificadora, localizada próxima à usina de Itaipu 50 Hz, apresenta alto valor de potência de curto-circuito, e é provida de filtros de 5^o, 7^o, 11^o, 13^o harmônicos, “high pass” e banco de capacitor “shunt” para eliminação de correntes harmônicas e compensação de potência reativa para as pontes conversoras.

Distintamente, a estação inversora possui um sistema receptor de corrente alternada fraco, isto é, com baixo nível de potência de curto-circuito. Por esta razão, a subestação Ibiúna é equipada com quatro compensadores síncronos, contribuindo com 1000 MVA de potência de curto-circuito cada, para garantia da operação adequada do elo de corrente contínua.

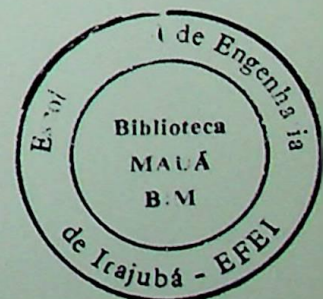
Estão também instalados na SE Ibiúna filtros de 5^o, 7^o, 11^o, 13^o harmônicos, ‘high pass’ e banco de capacitor “shunt” para eliminação de correntes harmônicas e suprimento de potência reativa.

O modo normal de operação do elo CC é controle de potência síncrono. Nesta modalidade de controle, na perda de um conversor ou de um pólo, o outro pólo do mesmo bipolo assume a potência não transmitida. Caso o pólo remanescente não tenha margem para assumir o valor total da potência associada à emergência, o déficit é transferido para o outro bipolo.

Sob este modo de controle, a maioria das contingências nas linhas CC ou nas conversoras não afeta sensivelmente a operação do Sistema Interligado Sul/Sudeste. Apenas contingências mais severas, como perda de bipolo ou perda total do elo CC, em condições de elevadas transferências de potência, significam perda de geração para o Sistema Interligado.

Usualmente denominado SCR (“Short Circuit Ratio”), ou relação de curto-circuito, este fator sintetiza condições dos sistemas CA e CC para os quais é assegurado o desempenho desejável do elo CC. Definido pela relação entre a potência de curto-circuito do sistema CA receptor e a potência ativa transmitida pelo sistema CC, o valor mínimo de SCR, especificado para o elo Foz-Ibiúna, é 2,3.

O circuito esquemático do sistema de transmissão CCAT do projeto Itaipu está apresentado na figura 2.2.



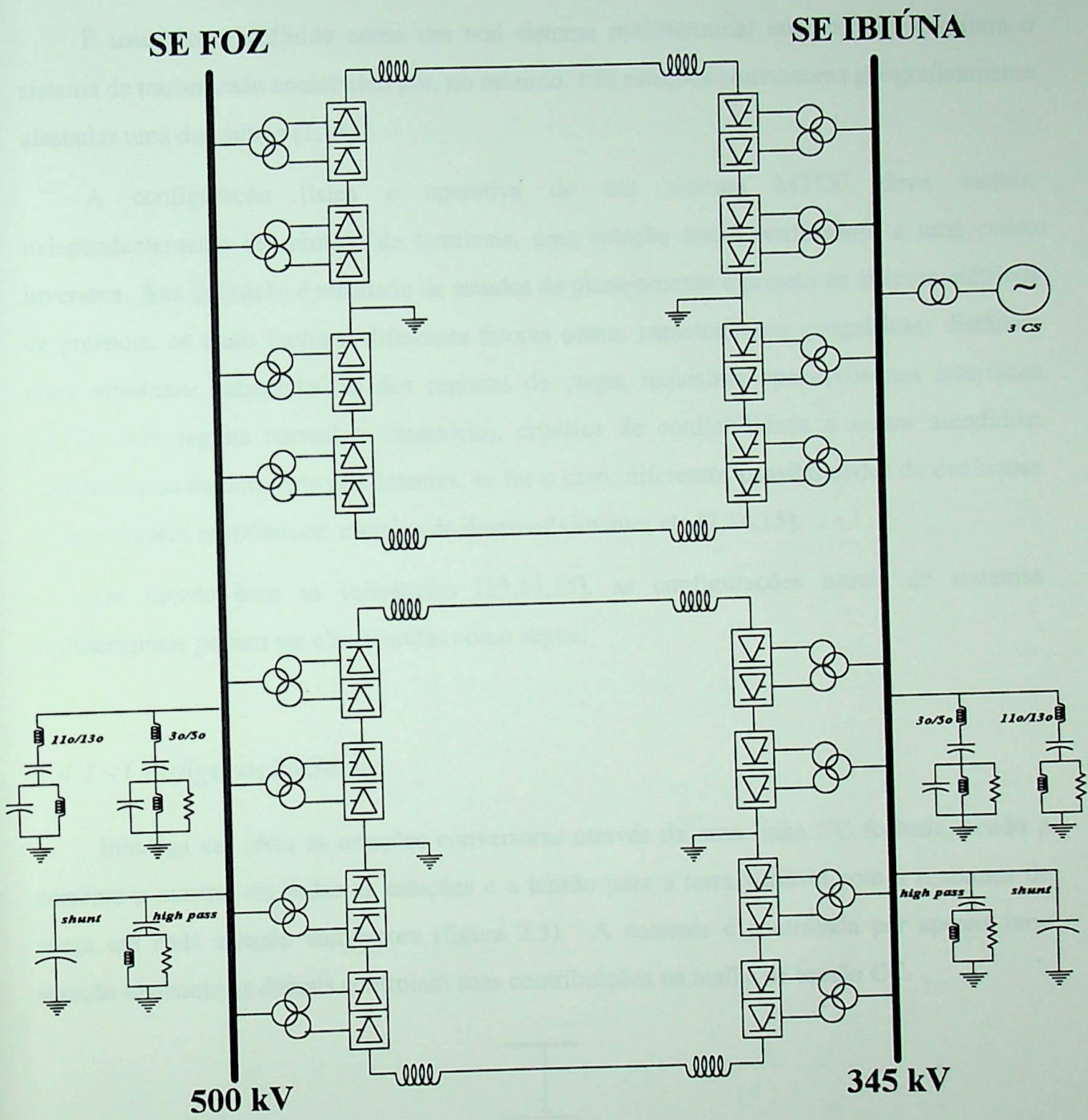


Figura 2.1 - Diagrama de circuito do Elo CC Foz-Ibiúna.

2.4 - Configurações Usuais de Sistemas Multiterminais

É usualmente definido como um real sistema multiterminal em corrente contínua o sistema de transmissão constituído por, no mínimo, três estações conversoras geograficamente afastadas uma das outras [1,13].

A configuração física e operativa de um sistema MTCC deve incluir, independentemente do número de terminais, uma estação como retificadora e uma como inversora. Sua definição é resultado de estudos de planejamento e projeto de sistema elétricos de potência, os quais incluem diferentes fatores como: características geográficas; distância entre terminais; características dos regimes de carga, requisitos operativos nas interfaces CA/CC (em regime normal e transitório), critérios de confiabilidade a serem atendidos; características de terminais já existentes, se for o caso; diferentes possibilidades de evoluções futuras; fatores econômicos; estágios de desenvolvimento; etc [2,14,15].

De acordo com as referências [13,14,15], as configurações usuais de sistemas multiterminais podem ser classificadas como segue:

2.4.1 - Configuração Série:

Interliga em série as estações conversoras através de uma linha CC fechada, sendo a corrente a mesma em todas as estações e a tensão para a terra variável com a mudança de carga em cada estação conversora (figura 2.3). A corrente é controlada por apenas uma estação enquanto as demais controlam suas contribuições na malha de tensão CC.

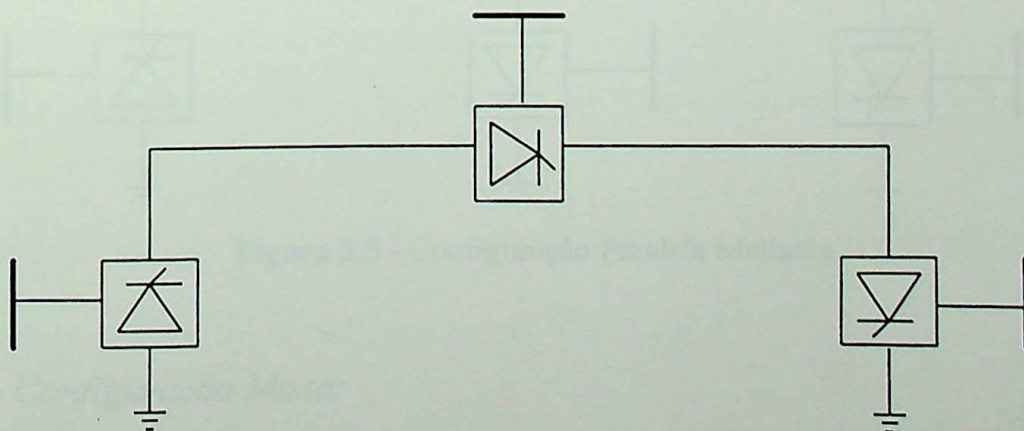


Figura 2.3 - Configuração Série.

2.4.2 - Configuração Paralela:

Interliga em paralelo as estações conversoras através de pelo menos uma linha CC, sendo que apenas uma estação define a tensão de operação do sistema enquanto as outras estações controlam as correntes de seus terminais. Esta configuração pode ser subdividida em:

- ♦ **Configuração Paralela Radial** - cada estação é conectada à apenas uma linha CC, logo a tensão, a menos das quedas ao longo da linha, é a mesma em cada estação conversora (figura 2.4);

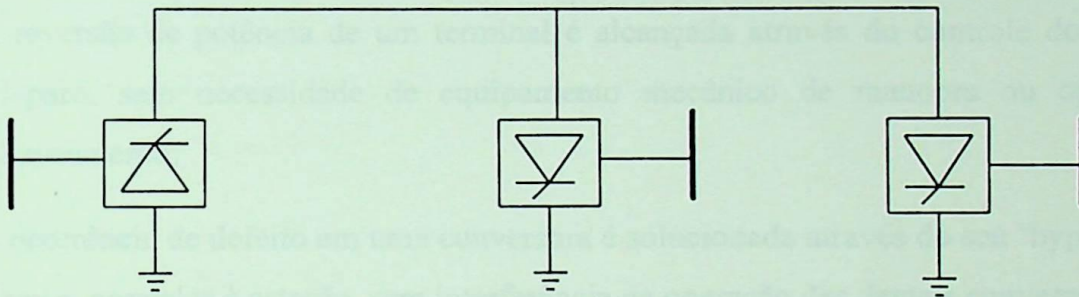


Figura 2.4 - Configuração Paralela Radial.

- ♦ **Configuração Paralela Malhada** - é definida por mais de uma linha CC conectada a cada estação conversora e a tensão é a mesma em cada estação, a menos das quedas de tensão nas linhas (figura 2.5).

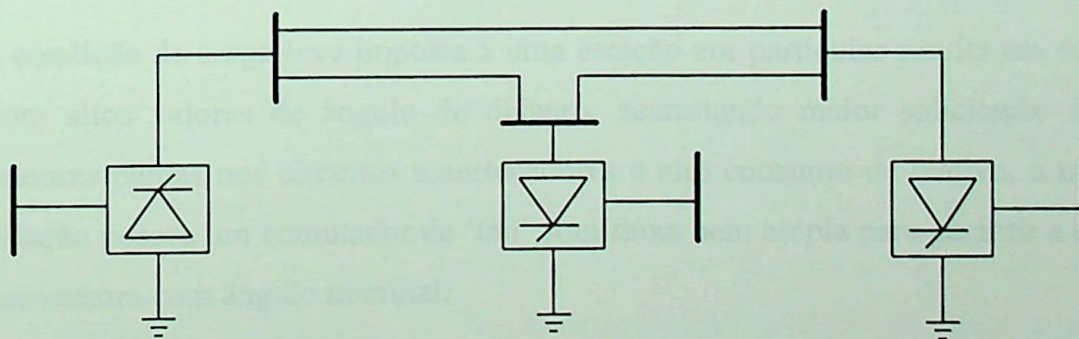


Figura 2.5 - Configuração Paralela Malhada.

2.4.3 - Configuração Mista:

É definida como sendo a combinação das configurações série e paralela.

2.5 - Características Básicas de Sistemas Multiterminais

Neste item são apresentadas as principais características operacionais dos sistemas multiterminais em suas configurações usuais.

2.5.1 - Configuração Série:

- ◆ sua concepção é similar ao sistema convencional ponto-a-ponto, tipicamente composto de conversores em série;
- ◆ a reversão de potência de um terminal é alcançada através do controle do ângulo de disparo, sem necessidade de equipamento mecânico de manobra ou operação de chaveamento;
- ◆ a ocorrência de defeito em uma conversora é solucionada através do seu 'bypassing' por chaves paralelas à estação, sem interferência na operação das demais conversoras;
- ◆ menor influência e requisitos de controle e de suporte de tensão em relação aos sistemas CA conectados;
- ◆ exigência de uma coordenação de isolamento complexa por causa da tensão em relação a terra ser diferente ao longo do sistema e poder variar drasticamente de acordo com os períodos de carga;
- ◆ a condição de carga leve imposta a uma estação em particular resulta em sua operação com altos valores de ângulo de disparo, acarretando maior solicitação às válvulas, maiores perdas nos circuitos amortecedores e alto consumo de reativo, a menos que a estação possua um comutador de 'tap' com faixa bem ampla para garantir a operação da conversora com ângulo nominal;
- ◆ uma falta permanente na linha causa a interrupção total da operação do sistema;
- ◆ apresenta pouca flexibilidade para expansões futuras.

2.5.2 - Configuração Paralela:

- ◆ necessita de chaveamentos especiais para a reversão de potência em cada uma das estações conversoras;
- ◆ saída ou distúrbio em uma localização estratégica da linha CC na configuração radial pode afetar a transmissão de todo o pólo;
- ◆ vulnerabilidade de todo o sistema a falhas de comutação e/ou faltas nos sistemas CA de uma estação inversora por drenar corrente de outro terminal inversor;
- ◆ apresenta problemas de proteção para inversores com dimensões muito diferentes;
- ◆ a utilização de mais de uma ponte conversora por pólo em uma estação impõe problemas operativos;
- ◆ permite a possibilidade de ligação monopolar ou bipolar.

Os sistemas de transmissão de maiores níveis de potência, em operação comercial ou em fase de projeto, que empregam tecnologia MTCC, utilizam a configuração paralela radial. Os principais fatores que influenciam a ocorrência deste fato são, entre outros, os benefícios oferecidos pela configuração paralela, como a facilidade na prática de manobras, chaveamento e expansão da ligação CC, além da adoção de uma estratégia de controle bastante simples. A predominância desta configuração também se constata pelo volume de trabalhos publicados.

O resultado de estudo de viabilidade da extensão do elo CC Foz-Ibiúna para reforço da estrutura de transmissão que atende a área Rio de Janeiro/Espírito Santo, realizado no âmbito do Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico de FURNAS, confirmou a aplicação da configuração paralela radial, e, por isso, a configuração adotada no desenvolvimento deste projeto de pesquisa. No capítulo 5, esta alternativa de solução será tratada em maiores detalhes.

Capítulo 3

Modelo Linear do Sistema de Corrente Contínua Ponto-a-Ponto

3.1 - Abordagem do Modelo

O grau de complexidade atribuída à modelagem de um Sistema Elétrico de Potência é função direta da natureza do fenômeno que se deseja investigar e do objetivo específico do estudo. Através destas duas orientações, torna-se possível definir as áreas de interesse e o nível de detalhamento na representação destas áreas do sistema.

Quanto a precisão com que se deva representar o sistema em estudo, é necessário o estabelecimento das condições de contorno para que se direcione corretamente o desenvolvimento de modelo matemático. São as condições de contorno que delimitam as suposições simplificadoras que facilitam a obtenção das equações diferenciais que descrevem um sistema elétrico.

Sendo esta pesquisa dirigida ao desenvolvimento de um modelo, ajuste de parâmetros de controle e simulação de um sistema multiterminal, extensão do elo de corrente contínua do Projeto Itaipu, é evidente a necessidade de uma descrição particularizada dos modos de controle e operação da ligação CC Foz-Ibiúna.

Para os procedimentos de estabilização e ajuste de parâmetros de controle do proposto sistema multiterminal, a representação linearizada do sistema em torno do ponto de operação nominal apresenta-se a mais indicada, pois permite a aplicação efetiva das técnicas de sistemas de controle lineares. A representação linear também é adequada para avaliação de desempenho dinâmico do sistema diante de pequenas perturbações, que são as que prevalecem na operação normal dos sistemas elétricos.

Ao longo deste capítulo será, então, desenvolvido um modelo linear do sistema ponto-a-ponto Foz-Ibiúna destacando os sistemas de controle de disparo das pontes conversoras e os elementos de transmissão, por serem estes os componentes de maior influência no desempenho do elo CC. No processo de linearização considerou-se, também, o espectro de frequência do estudo, o tempo de observação do fenômeno de interesse e a relação entre a potência transmitida pela ligação e as potências de curto-circuito dos sistemas CA conectados a seus terminais.

3.2 - Modelo Linear do Elo Foz-Ibiúna

A configuração de sistema elétrico usualmente empregada em estudos de avaliação de desempenho de um sistema de transmissão em corrente contínua é ilustrada pela figura 3.1.

Nesta configuração, as redes CA são representadas por impedâncias equivalentes em série com suas fontes de tensão e pelos bancos de filtros equivalentes, e o sistema CC reproduzido pelas pontes de Graetz de 12 pulsos em série com seus transformadores conversores, pelos reatores de alisamento e pela linha CC modelada por parâmetros concentrados.

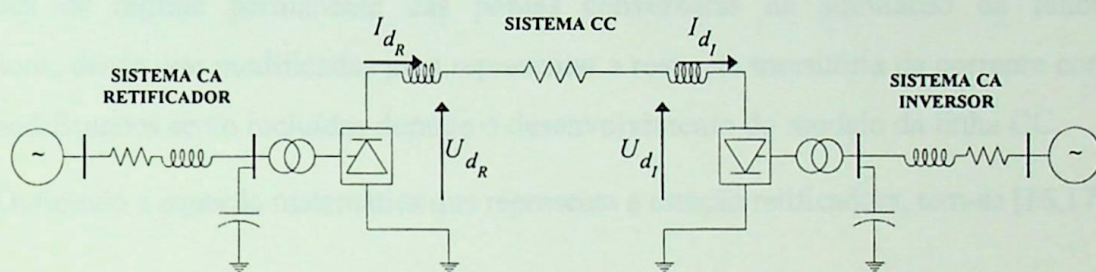


Figura 3.1- Sistema equivalente CA/CC.

Na obtenção da modelagem do elo CC Foz-Ibiúna será adotado o circuito mostrado na figura 3.1, e cada elemento constituinte deste sistema será representado, a seguir, por suas equações matemáticas no domínio do tempo e por suas funções de transferência no domínio da frequência.

3.2.1 - Pontes Conversoras

As equações estabelecidas para o regime permanente das pontes conversoras modelam o conjunto transformador conversor, válvula e reator de alisamento e consideram as seguintes principais hipóteses [16,17,18]:

- ◆ Tensão alternada constante e equilibrada no lado primário do transformador conversor;
- ◆ Reator de alisamento com alto valor de indutância para a obtenção de uma corrente contínua com "ripple" desprezível;
- ◆ As resistências do transformador conversor, válvula e reator de alisamento são desprezíveis.

Ressaltando que as grandezas elétricas das redes CA são manipuladas com seus valores eficazes nos estudos de regime permanente e de estabilidade, torna-se possível a utilização das equações de regime permanente das pontes conversoras na simulação de fenômenos dinâmicos, desde que modificadas para representar a resposta transitória da corrente contínua. Tais modificações serão incluídas durante o desenvolvimento do modelo da linha CC.

Definindo a equação matemática que representa a estação retificadora, tem-se [16,17,18]:

$$U_{d_R} = U_{do_R} \cos \alpha - R_{c_R} I_{d_R} \quad (1)$$

E a equação básica da estação inversora:

$$U_{d_I} = U_{do_I} \cos \gamma - R_{c_I} I_{d_I}$$

ou

$$U_{d_I} = U_{do_I} \cos \beta + R_{c_I} I_{d_I} \quad (2)$$

Onde: $\beta = \mu + \gamma = \pi - \delta$

Ao observá-las, constata-se que as equações de regime das pontes conversoras caracterizam sistemas não lineares. Então, através da aplicação da expansão da Série de Taylor truncada no elemento de 1ª ordem, serão aproximadas por modelos linearizados em relação à condição nominal de operação.

No processo de linearização do sistema retificador foi assumida a situação menos favorável sob o ponto de vista da estabilidade e desempenho dinâmico, que é a conversora ligada diretamente a um barramento infinito ($U_{doR} = \text{cte}$). Para esta condição de operação, e na ocorrência de algum distúrbio que cause o aumento da corrente contínua, o desvio de corrente não será amortecido pela queda da tensão alternada.

A aproximação adotada é válida pelo fato da rede CA do retificador do elo CC Foz-Ibiúna ter uma potência de curto-circuito superior à rede CA do inversor, pois é composta basicamente das unidades geradoras da usina de Itaipu 50 Hz e por linhas de transmissão que não ultrapassam 8 km de comprimento.

Após a linearização das equações (1) e (2) das pontes conversoras obtêm-se:

$$\Delta U_{d_R} = -\Delta U_{doR_0} (\text{sen} \alpha_0) \Delta \alpha - R_{c_R} \Delta I_{d_R} \quad (3)$$

$$\Delta U_{d_I} = (\text{cos} \beta_0) \Delta U_{doI_0} - U_{doI_0} (\text{sen} \beta_0) \Delta \beta + R_{c_I} \Delta I_{d_I} \quad (4)$$

Deve-se salientar que estas equações resultaram da consideração que as variáveis I_{d_R} e α são independentes entre si, assim como U_{doI} , I_{d_I} e β .

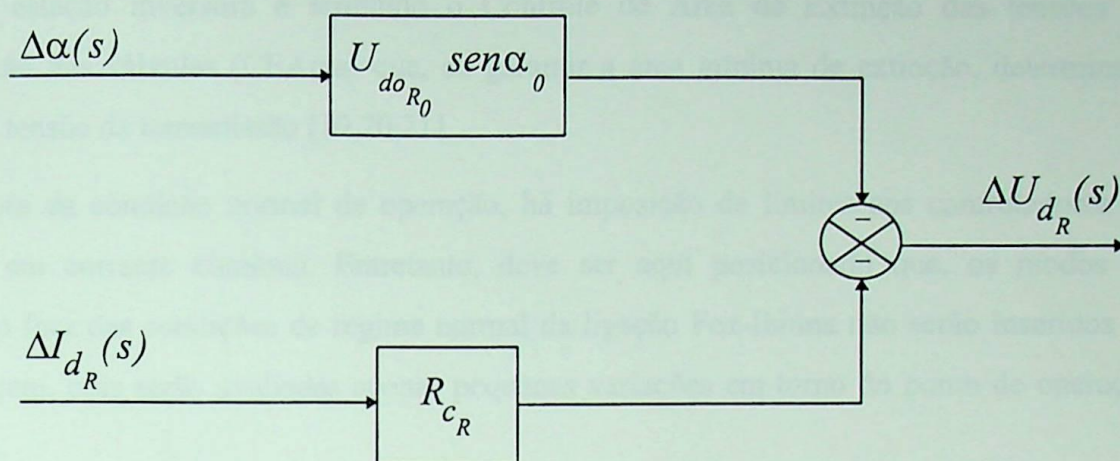
Após a aplicação da transformada de Laplace, as equações (3) e (4) tornam-se:

$$\Delta U_{d_R}(s) = -U_{doR_0} (\text{sen} \alpha_0) \Delta \alpha(s) - R_{c_R} \Delta I_{d_R}(s) \quad (5)$$

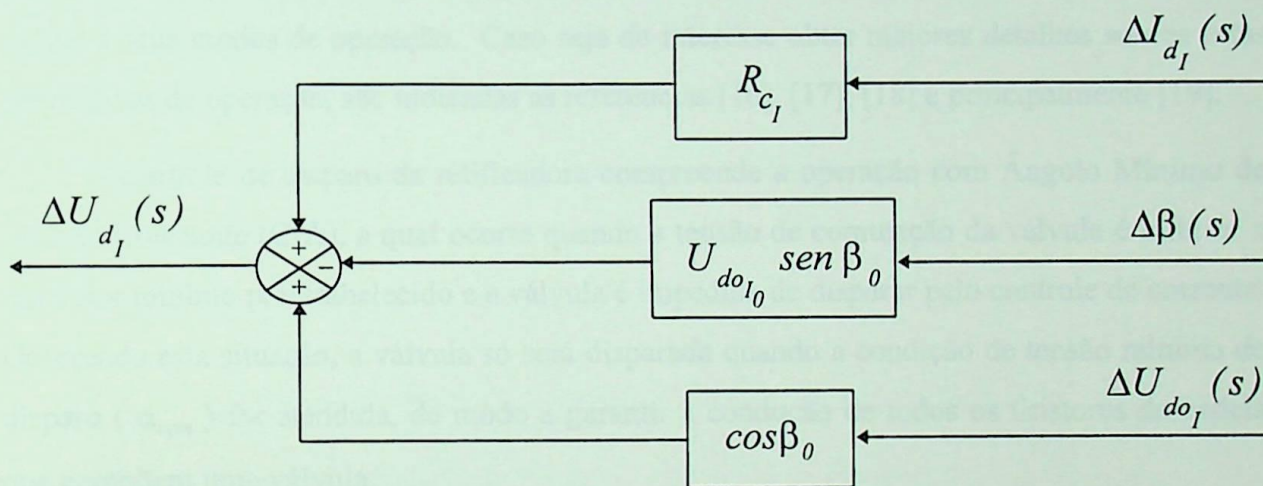
$$\Delta U_{d_I}(s) = (\text{cos} \beta_0) \Delta U_{doI_0}(s) - U_{doI_0} (\text{sen} \beta_0) \Delta \beta(s) + R_{c_I} \Delta I_{d_I}(s) \quad (6)$$

Os diagramas de blocos das pontes conversoras, originados das equações (5) e (6), estão ilustrados na figura 3.2.





(a) Retificadora.



(b) Inversora.

Figura 3.2 - Diagrama de blocos das pontes conversoras.

3.2.2 - Controle de Disparo das Pontes Conversoras

O modo de operação normal do elo CC Foz-Ibiúna atribui à estação retificadora o controle da corrente contínua (I_d), exercido através do Amplificador de Controle de Corrente (CCA), a fim de mantê-la constante e igual a uma referência de corrente (I_{ref}). Este controle tem ação rápida e atua sobre o ângulo de disparo α da ponte conversora [19].

À estação inversora é atribuído o Controle de Área de Extinção das tensões de comutação das válvulas (CEArea) que, ao garantir a área mínima de extinção, determina o nível de tensão da transmissão [19,20,21].

Fora da condição normal de operação, há imposição de limites aos controladores da ligação em corrente contínua. Entretanto, deve ser aqui posicionado que, os modos de operação fora das condições de regime normal da ligação Foz-Ibiúna não serão inseridos na modelagem, pois serão avaliadas apenas pequenas variações em torno do ponto de operação nominal.

Porém, apesar da colocação feita, será discorrida, a seguir, uma rápida descrição destes principais controles adicionais da ligação em corrente contínua afim de propiciar uma visão global e seus modos de operação. Caso seja de interesse obter maiores detalhes sobre estas alternativas de operação, são indicadas as referências [16], [17], [18] e principalmente [19].

O controle de disparo da retificadora compreende a operação com Ângulo Mínimo de Ignição Constante (CIA), a qual ocorre quando a tensão de comutação da válvula é inferior a um valor mínimo preestabelecido e a válvula é impedida de disparar pelo controle de corrente. Ocorrendo esta situação, a válvula só será disparada quando a condição de tensão mínima de disparo (α_{min}) for atendida, de modo a garantir a condução de todos os tiristores da cadeia que compõem uma válvula.

Na estação inversora são inseridos, além do Controle de Área de Extinção das válvulas (CEArea) em operação normal, o Amplificador de Controle de Corrente (CCA) e o Controle de Erro de Corrente (CEC). O controle de corrente tem a finalidade de garantir um ponto de operação estável quando a retificadora estiver operando com tensão CA inferior à nominal e o controle de erro de corrente o objetivo de introduzir uma realimentação positiva durante a transição do controle de extinção para controle de corrente.

As figuras 3.3 e 3.4 mostram, respectivamente, a característica estática de operação da ligação CC Foz- Ibiúna através da tensão contínua U_d em função da corrente contínua I_d e a integração do controle de corrente ao sistema de controle de disparo das válvulas.

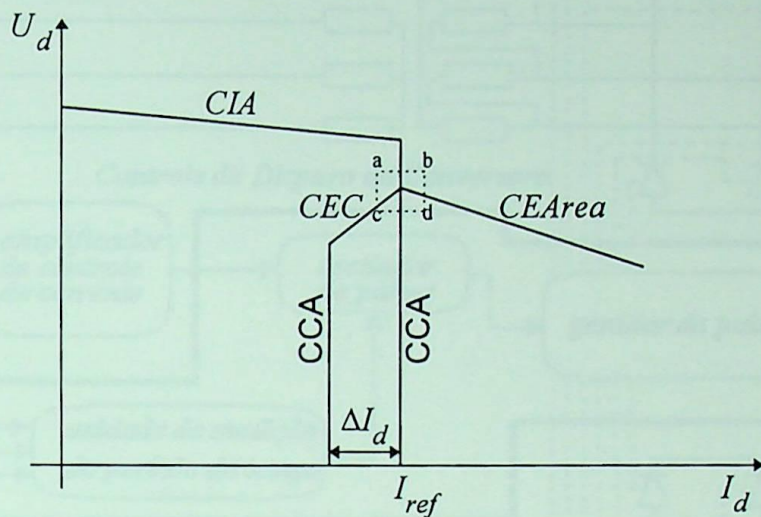


Figura 3.3 - Característica Estática $U_d \times I_d$.

Em relação a figura anterior, define-se:

CIA - Controle de Ângulo de Ignição Constante da Retificadora;

CEArea - Controle de Área de Extinção Constante da Inversora;

CEC - Controle de Erro de Corrente da Inversora;

CCA - Amplificador de Controle de Corrente;

abcd - Região de interesse do estudo (ponto de operação nominal).

As siglas foram mantidas como escritas na língua inglesa, pois são de uso consagrado e estão incorporadas ao jargão do setor elétrico brasileiro.

Vistos os modos adicionais de controle, serão agora examinados os controles de interesse intrínsecos a cada estação conversora.

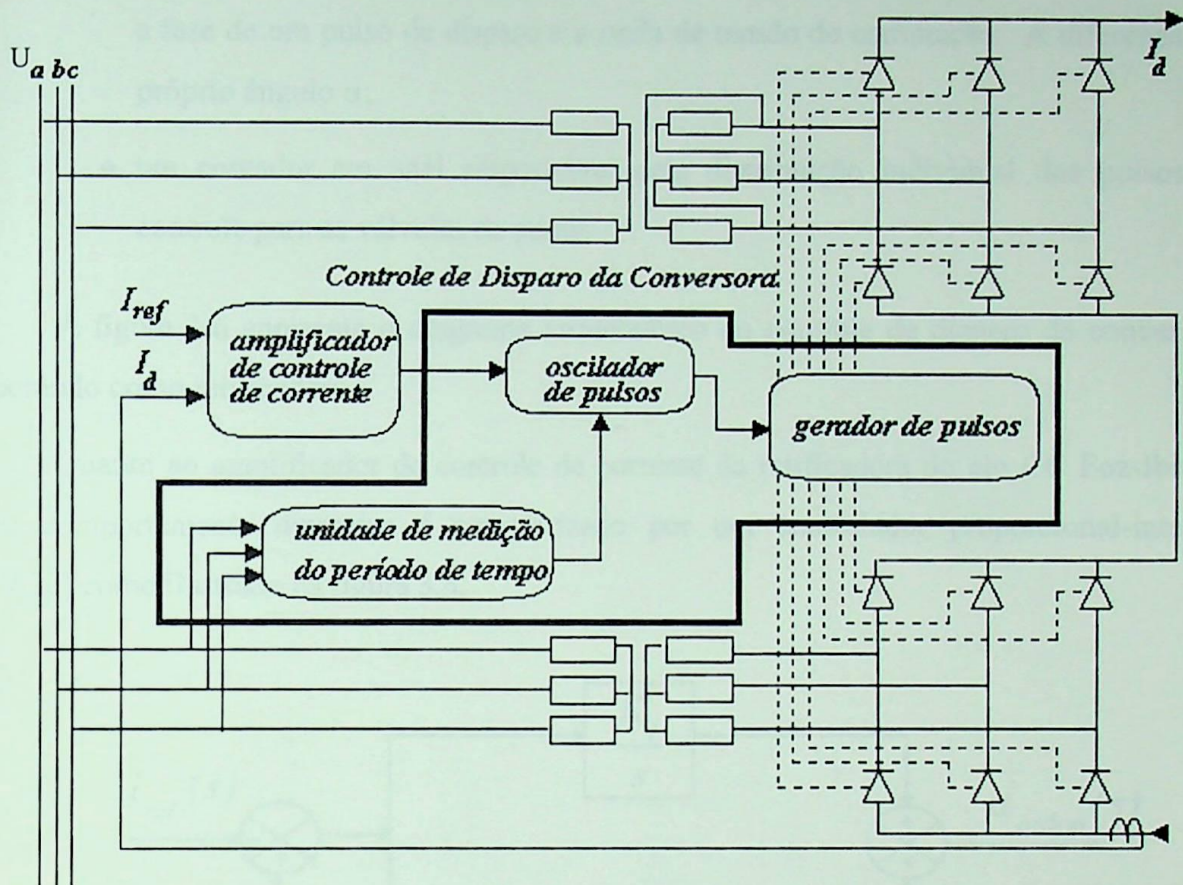


Figura 3.4 - Integração dos controles de corrente e disparo das pontes conversoras.

3.2.2.1 - Estação Retificadora

O controle de disparo da estação retificadora é um exemplo de um 'phase locked loop' (PLL), onde a fase dos pulsos de disparo é controlada com base no cruzamento de fases da tensão do sistema CA. As partes principais do PLL são [20]:

- ♦ um oscilador controlado por tensão (VCO) onde é possível manter a frequência central perto de um valor $12 \times f_0$, sendo f_0 a frequência do sistema CA, e deste modo promovendo uma característica de disparo equidistante;

- ◆ um sistema de medição de fase para que possa ser possível medir a diferença entre a fase de um pulso de disparo e a onda de tensão de comutação. A diferença é o próprio ângulo α ;
- ◆ um contador em anel responsável pela distribuição individual dos pulsos de controle para as válvulas da ponte.

A figura 3.6 apresenta o diagrama esquemático do controle de disparo da conversora operando como retificadora.

Quanto ao amplificador de controle de corrente da retificadora do elo CC Foz-Ibiúna, seu comportamento dinâmico é caracterizado por um controlador proporcional-integral [19,22] como ilustrado na figura 3.5.

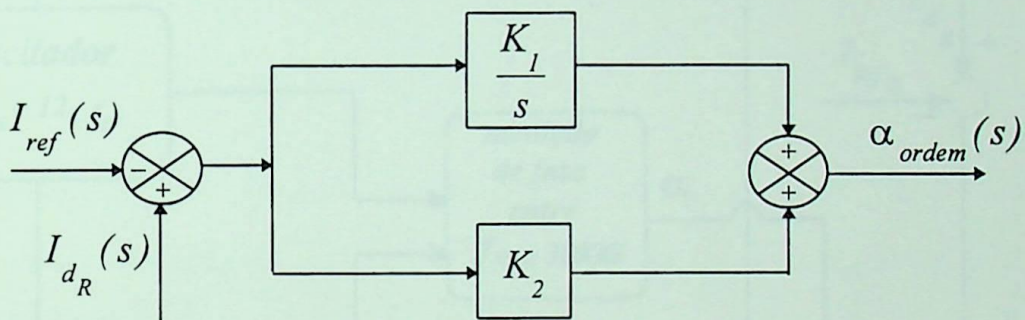


Figura 3.5 - Diagrama de blocos do controle de corrente.

A partir dos diagramas das figuras 3.5 e 3.6 torna-se possível definir o modelo matemático para o sistema de controle de disparo da retificadora. A função VCO, estabelecida pela equação (7), é descrita em detalhes nas referências [19] e [20]:

$$\alpha = K_{vco} \int \alpha_{erro} dt \quad (7)$$

Onde:

$$\alpha_{erro} = \alpha_{ordem} - \alpha \quad (8)$$

Sendo,

$$\alpha_{ordem} = K_1 \int (I_{dR} - I_{ref}) dt + K_2 (I_{dR} - I_{ref}) \quad (9)$$

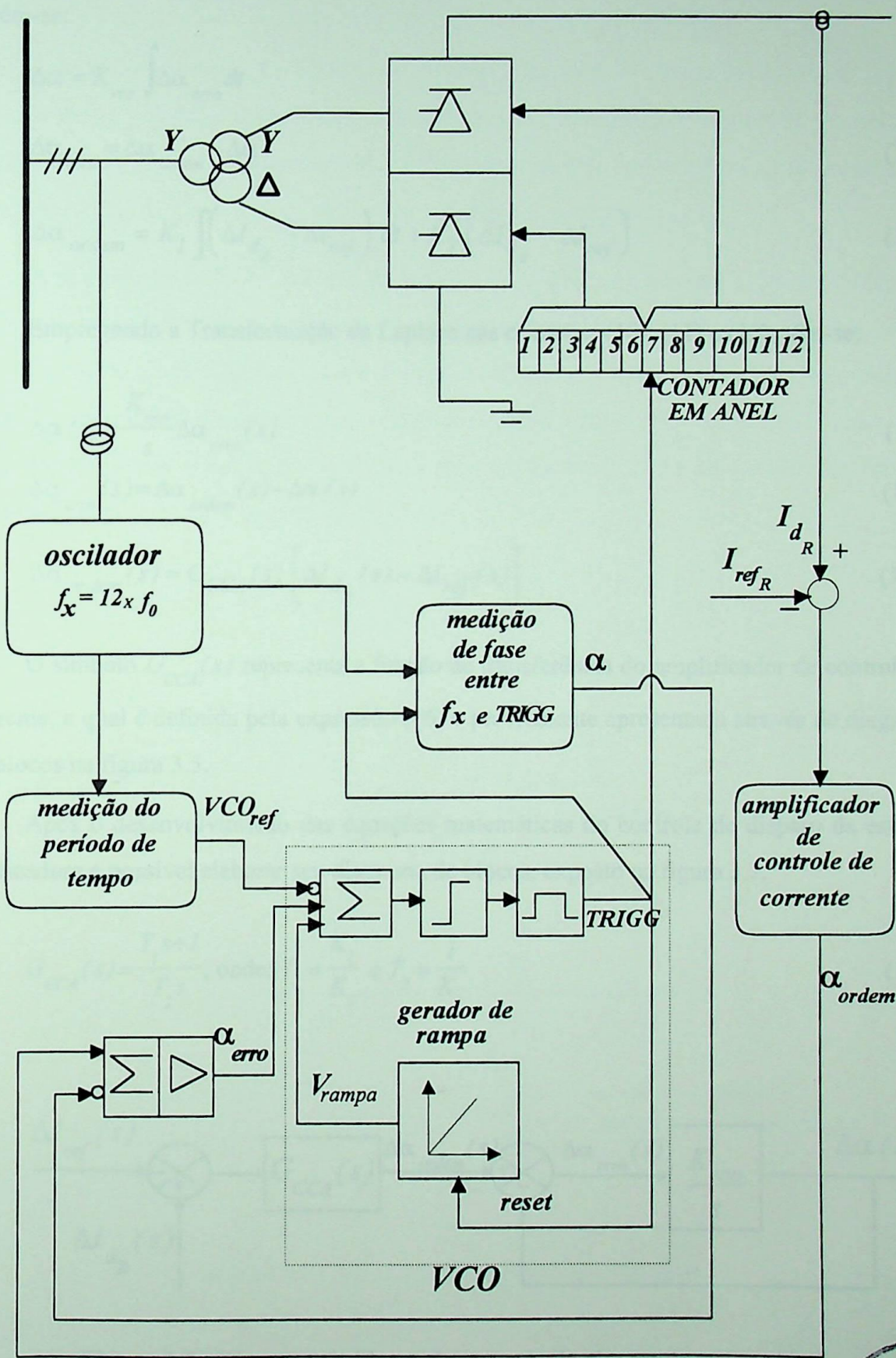
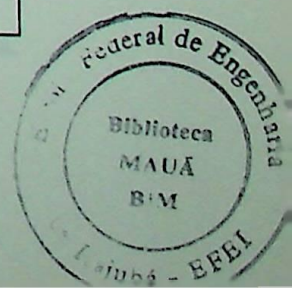


Figura 3.6 - Diagrama do controle de disparo da retificadora.



Substituindo as variáveis plenas das equações (7), (8) e (9) pelas variáveis incrementais, obtêm-se:

$$\Delta\alpha = K_{vco} \int \Delta\alpha_{erro} dt \quad (10)$$

$$\Delta\alpha_{erro} = \Delta\alpha_{ordem} - \Delta\alpha \quad (11)$$

$$\Delta\alpha_{ordem} = K_1 \int (\Delta I_{d_R} - \Delta I_{ref}) dt + K_2 (\Delta I_{d_R} - \Delta I_{ref}) \quad (12)$$

Empregando a Transformação de Laplace nas equações (10), (11) e (12), têm-se:

$$\Delta\alpha(s) = \frac{K_{vco}}{s} \Delta\alpha_{erro}(s) \quad (13)$$

$$\Delta\alpha_{erro}(s) = \Delta\alpha_{ordem}(s) - \Delta\alpha(s) \quad (14)$$

$$\Delta\alpha_{ordem}(s) = G_{CCA}(s) [\Delta I_{d_R}(s) - \Delta I_{ref}(s)] \quad (15)$$

O símbolo $G_{CCA}(s)$ representa a função de transferência do amplificador de controle de corrente, a qual é definida pela expressão (16) e previamente apresentada através de diagrama de blocos na figura 3.5.

Após o desenvolvimento das equações matemáticas do controle de disparo da estação retificadora é possível elaborar seu diagrama de blocos, exposto na figura 3.7.

$$G_{CCA}(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s}, \text{ onde: } T_1 = \frac{K_2}{K_1} \text{ e } T_2 = \frac{1}{K_1} \quad (16)$$

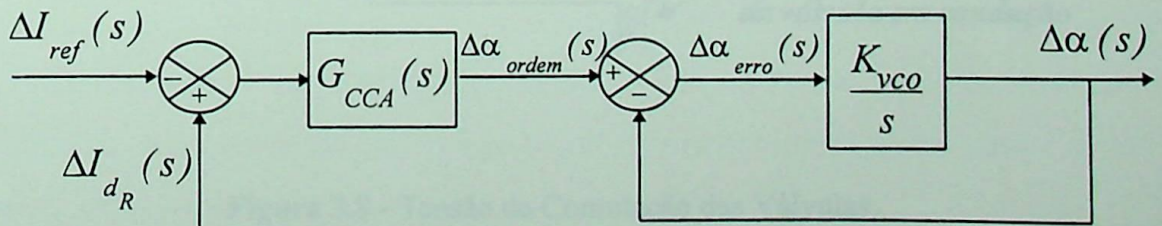


Figura 3.7 - Diagrama de blocos do controle de disparo da retificadora.

3.2.2.2 - Estação Inversora

A estação inversora do elo CC Foz-Ibiúna é provida de um controlador de corrente semelhante ao da retificadora, a menos da referência de corrente que é ajustada em um valor inferior em 10% da corrente nominal. Esta diferença entre as referências de corrente das estações retificadora e inversora é denominada margem de corrente (ΔI_d).

A margem de corrente, incluída no controle de corrente da inversora, determina um erro constante para o controlador, que tenta corrigi-lo aumentando o valor do ângulo de disparo (α) até atingir o seu valor limite. Desta forma, durante a operação em regime permanente, o controle de corrente da inversora encontra-se saturado, atuando o controle de disparo da conversora que procura manter constante a área mínima de extinção das tensões das válvulas para assegurar o processo de comutação (ver figura 3.8).

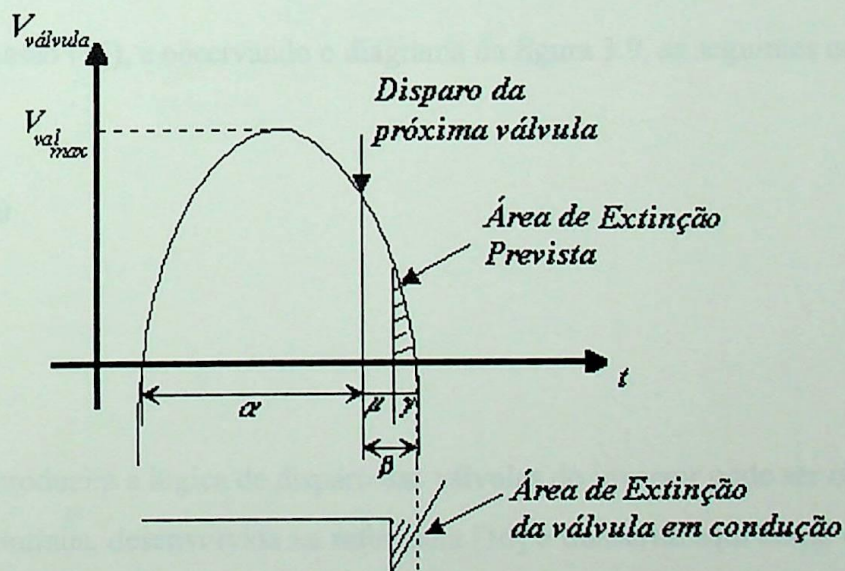


Figura 3.8 - Tensão de Comutação das Válvulas.

O controle de extinção atua através de um sistema preditivo, onde se compara o valor previsto da área de extinção da válvula em condução com uma referência de área mínima (A_{min}). Ao se atingir o valor de referência é enviado o sinal de disparo para a próxima válvula a conduzir [20,21]. A figura 3.9 apresenta o diagrama esquemático do controle de disparo da estação inversora.

A área mínima necessária para garantir a extinção da válvula tem associada a ela um ângulo mínimo de extinção (γ_{min}). Durante a operação em condições nominais não são notadas diferenças sensíveis entre os modos de controle de área e ângulo mínimo de extinção. Este fato permite considerar, para fins práticos de análise de pequenas perturbações em torno do ponto de equilíbrio nominal, a inversora operando no modo de controle de ângulo mínimo (γ_{min}).

Ao observar a figura 3.8, verifica-se que, para a comutação ser completada com sucesso sob condições operativas normais, o ângulo de disparo da inversora deve ser obtido de acordo com seguinte equação:

$$\alpha = \pi - \beta, \text{ onde: } \beta = \mu + \gamma \quad (17)$$

A partir da expressão (17), e observando o diagrama da figura 3.9, as seguintes equações são deduzidas:

$$\beta = K_{vco} \int \beta_{erro} dt \quad (18)$$

Onde:

$$\beta_{erro} = \beta_{ref} - \beta \quad (19)$$

A função que reproduzirá a lógica de disparo das válvulas do inversor pode ser obtida da equação da corrente contínua, desenvolvida na referência [16] e transcrita aqui como equação (20). A partir desta, é possível exprimir β em função do ângulo de extinção constante ($\gamma_{min}=17^\circ$) e da área comutação (μ). A equação (21), resultado desta manipulação, define o instante do disparo do inversor.

$$I_{d1} = \frac{U_{ac1}}{\sqrt{2}X_{c1}} [\cos\gamma - \cos(\gamma + \mu)] \quad (20)$$

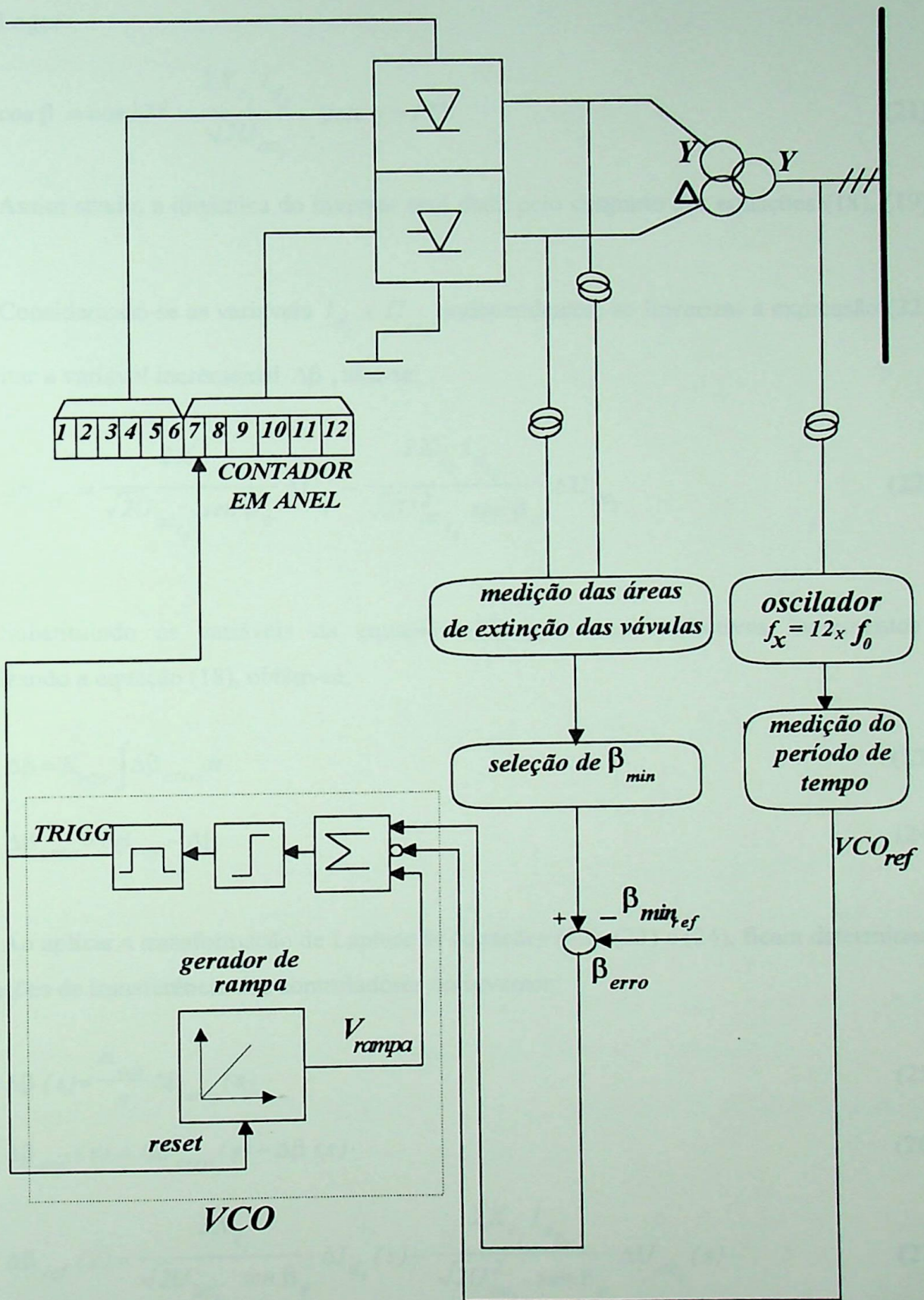


Figura 3.9 - Diagrama do controle de disparo da inversora.

Logo:

$$\cos \beta = \cos 17^\circ - \frac{2X_{c_1} I_{d_1}}{\sqrt{2}U_{ac_1}} \quad \text{para } \gamma = 17^\circ \quad (21)$$

Assim sendo, a dinâmica do inversor será dada pelo conjunto das equações (18), (19) e (21).

Considerando-se as variáveis I_{d_1} e U_{ac_1} independentes, ao linearizar a expressão (22) e explicitar a variável incremental $\Delta\beta$, têm-se:

$$\Delta\beta_{ref} = \frac{2X_{c_1}}{\sqrt{2}U_{ac_{1_0}} \text{sen } \beta_0} \Delta I_{d_1} - \frac{2X_{c_1} I_{d_{1_0}}}{\sqrt{2}U_{ac_{1_0}}^2 \text{sen } \beta_0} \Delta U_{ac_1} \quad (22)$$

Substituindo as variáveis da equação (19) por seus respectivos incrementos e linearizando a equação (18), obtêm-se:

$$\Delta\beta = K_{vco} \int \Delta\beta_{erro} dt \quad (23)$$

$$\Delta\beta_{erro} = \Delta\beta_{ref} - \Delta\beta \quad (24)$$

Ao aplicar a transformação de Laplace às equações (22), (23) e (24), ficam determinadas as funções de transferência dos controladores do inversor:

$$\Delta\beta(s) = \frac{K_{vco}}{s} \Delta\beta_{erro}(s) \quad (25)$$

$$\Delta\beta_{ref}(s) = \Delta\beta_{erro}(s) - \Delta\beta(s) \quad (26)$$

$$\Delta\beta_{ref}(s) = \frac{2X_{c_1}}{\sqrt{2}U_{ac_{1_0}} \text{sen } \beta_0} \Delta I_{d_1}(s) - \frac{2X_{c_1} I_{d_{1_0}}}{\sqrt{2}U_{ac_{1_0}}^2 \text{sen } \beta_0} \Delta U_{ac_1}(s) \quad (27)$$

Definido o modelo matemático, a figura 3.10 ilustra o diagrama de blocos do controle de disparo da estação inversora.

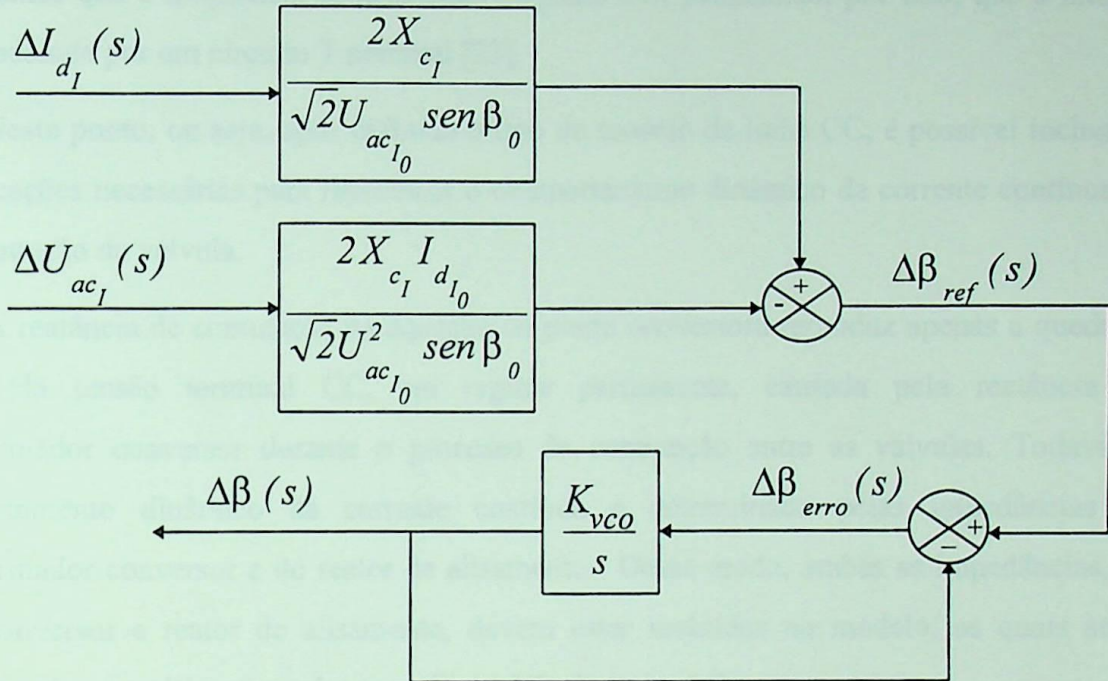


Figura 3.10 - Diagrama de blocos do controle de disparo da inversora.

Conforme mencionado anteriormente, o Controle de Erro de Corrente (CEC) inclui uma realimentação positiva no comportamento da ligação em corrente contínua para variações de corrente inferiores à corrente nominal. Porém, é dispensável a sua inclusão na modelagem do elo CC, pois procura-se avaliar o desempenho dinâmico do sistema em condições normais de operação, ou seja, a inversora operando em controle de área mínima de extinção.

Mesmo assim, serão apresentadas as equações que definem o CEC, também conhecido como 'Static Current Compounding', a título de informação:

$$\gamma = K_C \left(I_{ref} - I_{d1} \right) \quad (28)$$

Ao substituir as variáveis plenas por variáveis incrementais na equação (28), chega-se a:

$$\Delta\gamma = K_C \left(\Delta I_{ref} - \Delta I_{d1} \right)$$

3.2.3 - Linha de Transmissão CC

Este trabalho investiga fenômenos transitórios cujas frequências são consideravelmente mais baixas que a frequência característica da linha CC, permitindo, por isso, que a mesma seja modelada por um circuito T nominal [23].

Neste ponto, ou seja, após definido o tipo de modelo da linha CC, é possível incluir as modificações necessárias para reproduzir o comportamento dinâmico da corrente contínua na representação da válvula.

A reatância de comutação na equação da ponte conversora reproduz apenas a queda de tensão da tensão terminal CC, em regime permanente, causada pela reatância do transformador conversor durante o processo de comutação entre as válvulas. Todavia o comportamento dinâmico da corrente contínua é determinado pelas impedâncias do transformador conversor e do reator de alisamento. Desse modo, ambas as impedâncias, do trafo conversor e reator de alisamento, devem estar incluídas no modelo, as quais serão acrescentadas em série aos parâmetros do modelo da linha CC.

De modo não tão rigoroso, a reatância e a resistência do transformador conversor podem ser estimadas pelos valores abaixo [23]:

$$r_{cv} = 1.85 r_t$$

$$x_{cv} = 1.85 x_t$$

A figura 3.12 apresenta o modelo T da linha de transmissão CC, acrescida das impedâncias dos trafos conversores e dos reatores de alisamento das estações retificadora e inversora.

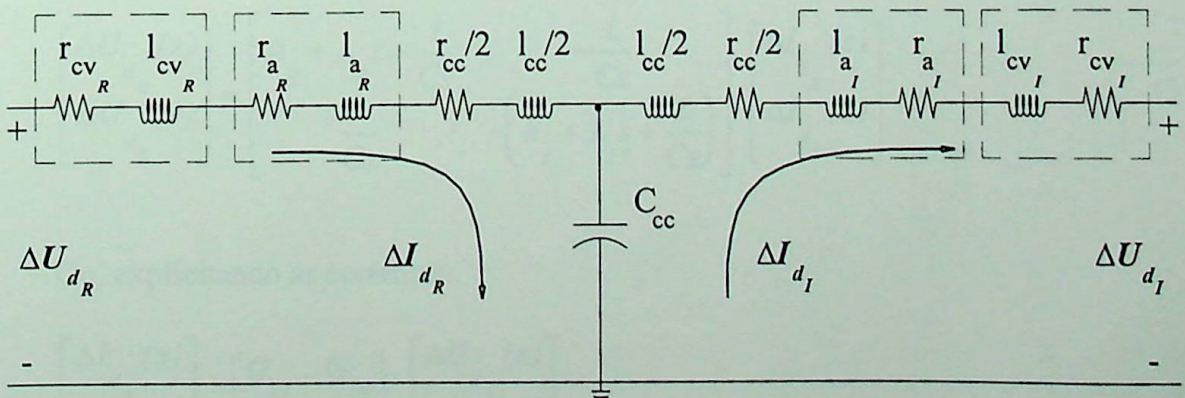


Figura 3.12 - Modelo T da linha de transmissão CC.

As equações incrementais do modelo da linha CC serão:

$$\Delta U_{d_R} = R_R \Delta I_{d_R} + L_R \frac{d\Delta I_{d_R}}{dt} + \frac{l}{C} \int (\Delta I_{d_R} - \Delta I_{d_I}) dt \quad (29)$$

$$-\Delta U_{d_I} = R_I \Delta I_{d_I} + L_I \frac{d\Delta I_{d_I}}{dt} - \frac{l}{C} \int (\Delta I_{d_R} - \Delta I_{d_I}) dt \quad (30)$$

Onde:

$$R_R = r_{cv_R} + r_{a_R} + r_{cc}/2$$

$$R_I = r_{cv_I} + r_{a_I} + r_{cc}/2$$

$$L_R = l_{cv_R} + l_{a_R} + l_{cc}/2$$

$$L_I = l_{cv_I} + l_{a_I} + l_{cc}/2$$

$$C = c_{cc}$$

Após aplicar a transformação de Laplace, as equações (31) e (32) tornam-se:

$$\Delta U_{d_R}(s) = R_R \Delta I_{d_R}(s) + L_R s \Delta I_{d_R}(s) + \frac{l}{Cs} [\Delta I_{d_R}(s) - \Delta I_{d_I}(s)] \quad (29)$$

$$-\Delta U_{d_I}(s) = R_I \Delta I_{d_I}(s) + L_I s \Delta I_{d_I}(s) + \frac{l}{Cs} [\Delta I_{d_R}(s) - \Delta I_{d_I}(s)] \quad (30)$$

Colocando as equações (29) e (30) na forma matricial, obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{d_R}(s) \\ \Delta U_{d_I}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_R + L_R s + \frac{l}{Cs} & -\frac{l}{Cs} \\ \frac{l}{Cs} & -\left(R_I + L_I s + \frac{l}{Cs}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{d_R}(s) \\ \Delta I_{d_I}(s) \end{bmatrix} \quad (31)$$

Ou, explicitando as correntes:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{d_R}(s) \\ \Delta I_{d_I}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{d_R}(s) \\ \Delta U_{d_I}(s) \end{bmatrix} \quad (32)$$

Onde:

$$G_{11} = \frac{\frac{1}{L_R} \left(s^2 + s \frac{R_I}{L_I} + \frac{1}{CL_I} \right)}{D(s)}$$

$$G_{12} = \frac{-\frac{1}{CL_R L_I}}{D(s)}$$

$$G_{21} = \frac{\frac{1}{CL_R L_I}}{D(s)}$$

$$G_{22} = \frac{-\frac{1}{L_I} \left(s^2 + s \frac{R_R}{L_R} + \frac{1}{CL_R} \right)}{D(s)}$$

Sendo:

$$D(s) = s^3 + \left(\frac{R_R}{L_R} + \frac{R_I}{L_I} \right) s^2 + \left(\frac{R_R R_I}{L_R L_I} + \frac{1}{CL_R} + \frac{1}{CL_I} \right) s + \frac{R_R R_I}{CL_R L_I}$$

A figura 3.13 apresenta o diagrama de blocos da linha de transmissão CC.

É importante acrescentar que o modelo T nominal da linha CC, por concentrar a representação da capacitância no centro da linha, oferece a desvantagem de permitir variações instantâneas de tensão nos terminais das conversoras.

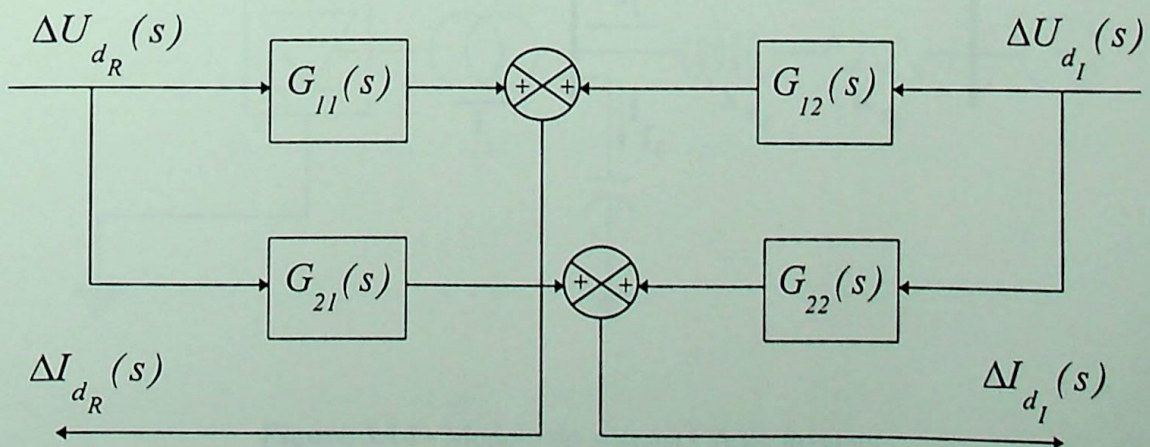


Figura 3.13 - Diagrama de blocos da linha de transmissão CC.

3.3 - Modelo do Sistema CA

Conforme esclarecido anteriormente, a rede alternada do sistema retificador da ligação em corrente contínua Foz-Ibiúna pode ser representada por um barramento infinito ligado diretamente à conversora sem perda de validade dos resultados.

Já a rede CA da inversora deve ser modelada de modo a reproduzir o comportamento dinâmico da interação dos sistemas CA/CC, principalmente as variações da tensão CA da barra conversora decorrentes de pequenos distúrbios internos ao sistema CC. No caso do projeto Itaipu, no qual o sistema inversor possui uma rede CA com baixa potência de curto-circuito, é importante o conhecimento da influência da rede CA do inversor no comportamento dinâmico do sistema de controle de corrente do retificador.

Feitas as considerações básicas, o sistema CA do inversor será representado como ilustrado pela figura 3.14. Ao observá-la, verifica-se que foi adotado um circuito equivalente simples, sem a inclusão da dinâmica de máquinas síncronas, ou seja, a fonte de tensão CA é assumida com tensão e frequência constantes, e a impedância equivalente do sistema CA é resultado da associação paralela da impedância de curto-circuito do sistema vista desta barra e a reatância x''_d de três compensadores síncronos instalados na SE Ibiúna. Os filtros são representados por seus circuitos equivalentes na frequência fundamental.

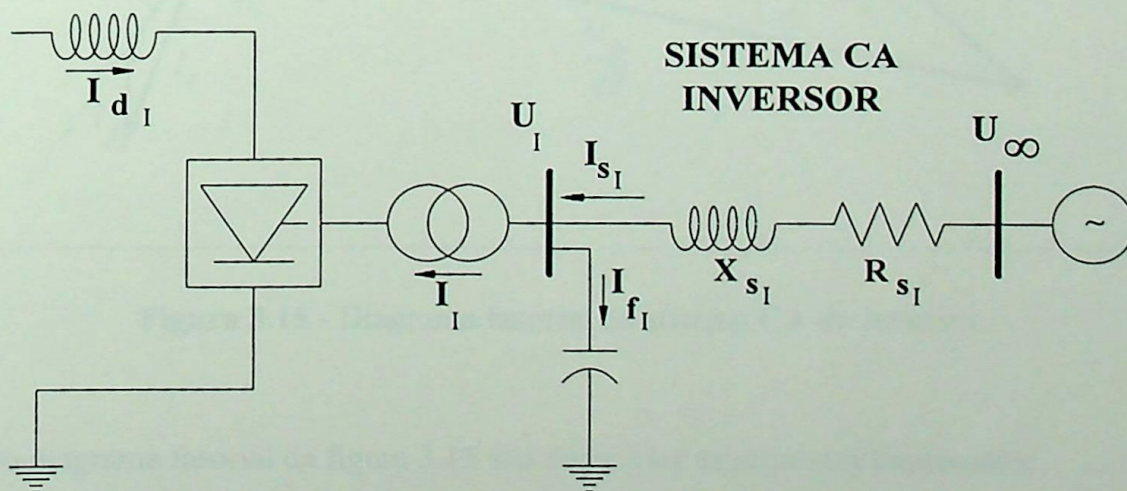


Figura 3.14 - Modelo do sistema CA do inversor.

Baseado na dedução apresentada pela referência [23], o equacionamento matemático da rede CA pode ser obtido a partir do diagrama fasorial à frequência fundamental ilustrado pela figura 3.15, onde:

U_I - Tensão eficaz fase-fase no primário do transformador conversor;

U_∞ - Tensão eficaz fase-fase do barramento infinito;

I_I - Componente fundamental da corrente CA no primário do transformador conversor;

I_{s_I} - Corrente no sistema CA;

I_{f_I} - Corrente no filtro CA;

X_{f_I} - Reatância do filtro CA;

Z_{s_I}, θ_{s_I} - Módulo e ângulo da impedância do sistema CA ($Z_{s_I} = R_{s_I} + jX_{s_I}$).

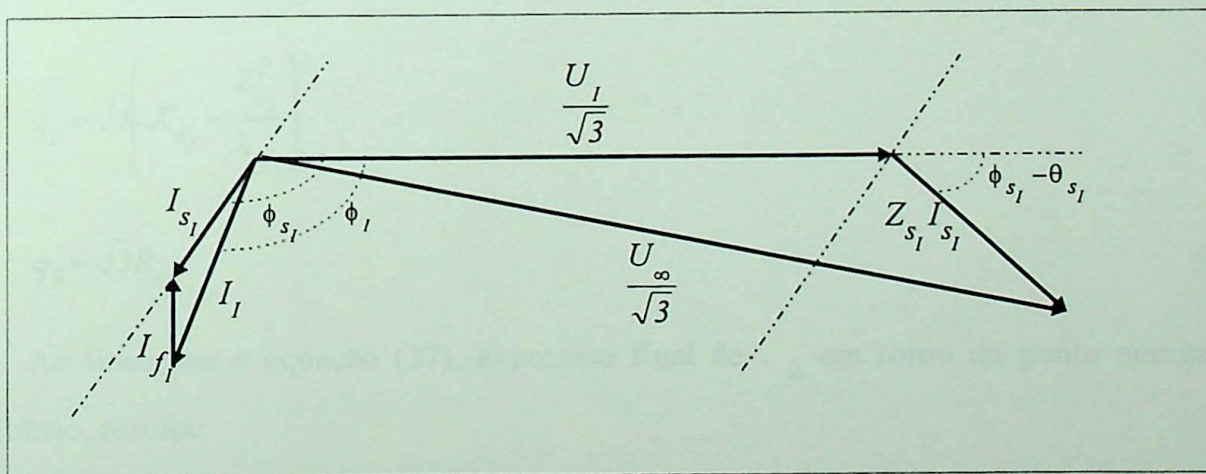


Figura 3.15 - Diagrama fasorial do sistema CA do inversor.

Do diagrama fasorial da figura 3.15 são deduzidas as seguintes expressões:

$$U_\infty^2 = U_I^2 + 2\sqrt{3}U_I Z_{s_I} I_{s_I} \cos(\phi_{s_I} - \theta_{s_I}) + 3Z_{s_I}^2 I_{s_I}^2 \quad (33)$$

$$I_{s_1} \text{sen} \phi_{s_1} = I_1 \text{sen} \phi_1 - I_{f_1} = I_1 \text{sen} \phi_1 - \frac{U_1}{\sqrt{3} X_{f_1}} \quad (34)$$

$$I_{s_1} \text{cos} \phi_{s_1} = I_1 \text{cos} \phi_1 \quad (35)$$

A partir das duas expressões, (34) e (35), determina-se I_{s_1} :

$$I_{s_1}^2 = I_1^2 - 2I_1 \frac{U_1}{\sqrt{3} X_{f_1}} \text{sen} \phi_1 + \frac{U_1^2}{3X_{f_1}^2} \quad (36)$$

Substituindo as equações (34), (35) e (36) na expressão (33), deduz-se:

$$U_\infty^2 = U_1^2 q_1 + 2U_1 I_1 (q_2 \text{sen} \phi_1 + q_3 \text{cos} \phi_1) + 3Z_{s_1}^2 I_1^2 \quad (37)$$

Onde:

$$q_1 = \left(1 - \frac{X_{s_1}}{X_{f_1}} \right)^2 + \left(\frac{R_{s_1}}{X_{f_1}} \right)^2 \quad (38)$$

$$q_2 = \sqrt{3} \left(X_{s_1} - \frac{Z_{s_1}^2}{X_{f_1}} \right) \quad (39)$$

$$q_3 = \sqrt{3} R_{s_1} \quad (40)$$

Ao linearizar a equação (37), expressão final de U_∞ em torno do ponto nominal de equilíbrio, resulta:

$$\begin{aligned} 2U_{\infty_0} \Delta U_\infty = & \left[2U_{I_0} q_1 + 2I_{I_0} + \left(q_2 \text{sen} \phi_{I_0} + q_3 \text{cos} \phi_{I_0} \right) \right] \Delta U_I \\ & + \left[2U_{I_0} \left(q_2 \text{sen} \phi_{I_0} + q_3 \text{cos} \phi_{I_0} \right) + 6I_{I_0} Z_{s_1}^2 \right] \Delta I_I \\ & + \left[2U_{I_0} I_{I_0} \left(q_2 \text{cos} \phi_{I_0} - q_3 \text{sen} \phi_{I_0} \right) \right] \Delta \phi_I \end{aligned} \quad (41)$$

Após manipulação de equações básicas que regem um sistema de corrente contínua, demonstradas nas referências [16] e [17] e transcritas por (42), (43) e (44), é possível encontrar uma função que determina a variação da tensão CA da barra de comutação da inversora (ΔU_{ac_1}) em função das grandezas CC, utilizando para tanto a expressão de ΔU_{∞} .

Então, sendo:

$$U_{d_1} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi N_I} U_I [\cos\gamma + \cos(\gamma + \mu)] \quad (42)$$

$$U_{d_1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi N_I} U_I \cos\gamma - \frac{3}{\pi} X_{c_1} I_{d_1} \quad (43)$$

$$\cos\phi_I = \frac{1}{2} [\cos\gamma + \cos(\gamma + \mu)] \quad (44)$$

onde $N_I = N_1/N_2$ é a relação de transformação do trafo conversor da inversora, é possível determinar o fator de potência na barra inversora para $\gamma=17^\circ$, por:

$$\cos\phi_I = \cos 17^\circ - \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_I X_{c_1} I_{d_1}}{U_I} \quad (45)$$

Linearizando a expressão (45) e explicitando $\Delta\phi_I$, obtêm-se:

$$\Delta\phi_I = \frac{1}{\sin\phi_{I_0}} \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_I X_{c_1}}{U_{I_0}} \Delta I_{d_1} - \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_I X_{c_1} I_{d_{I_0}}}{U_{I_0}^2} \Delta U_I \right] \quad (46)$$

Empregando a demonstração de Kimbark [16] de que as componentes em fase (I_p) e quadratura (I_q) da corrente alternada ($I_I = I_p + jI_q$), em relação à tensão fase-neutro no primário do transformador conversor na frequência fundamental, são dadas por:

$$I_p = \frac{\sqrt{6}}{\pi N_I} I_{d_1} \left(\frac{\cos\gamma + \cos\beta}{2} \right) \quad (47)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6}}{\pi N_I} I_{d_1} \left[\frac{2\mu + \cos 2\gamma - \cos 2\beta}{4(\cos\gamma - \cos\beta)} \right] \quad (48)$$

é razoável adotar para $\mu \leq 30^\circ$, valores usuais de ângulo de comutação, as relações definidas abaixo, obtidas para a condição de operação $\mu = 0$, pois o erro resultante será da ordem de 1.1%:

$$\cos \gamma = \cos \beta \quad \text{e} \quad I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi N_1} I_{d1} \quad (49)$$

Logo, substituindo em (41) as equações (46) e (49) e a relação $U_1 = N_1 U_{ac1}$, obtêm-se:

$$\Delta U_{ac1} = \frac{1}{Q_1} \left(2U_{\infty 0} \Delta U_{\infty} - Q_2 \Delta I_{d1} \right) \quad (50)$$

Sendo que:

$$Q_1 = 2N_1^2 q_1 U_{ac1_0} + \frac{2\sqrt{6}}{\pi} q_4 I_{d1_0} - \frac{\sqrt{12}}{\pi} q_5 X_{c1} \frac{I_{d1_0}^2}{U_{ac1_0}} \quad (51)$$

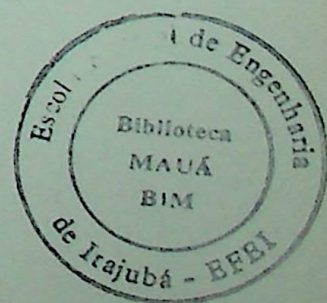
$$Q_2 = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} q_4 U_{ac1_0} + \frac{36}{\pi^2 N_1^2} Z_{s1}^2 I_{d1_0} + \frac{\sqrt{12}}{\pi} q_5 X_{c1} I_{d1_0} \quad (52)$$

E onde:

$$q_4 = q_2 \operatorname{sen} \phi_{1_0} + q_3 \operatorname{cos} \phi_{1_0} \quad (53)$$

$$q_5 = q_2 \operatorname{cot} \phi_{1_0} - q_3 \quad (54)$$

Após a aplicação da transformação de Laplace à equação (54), a figura 3.16 apresenta o diagrama de blocos do sistema CA da estação inversora.



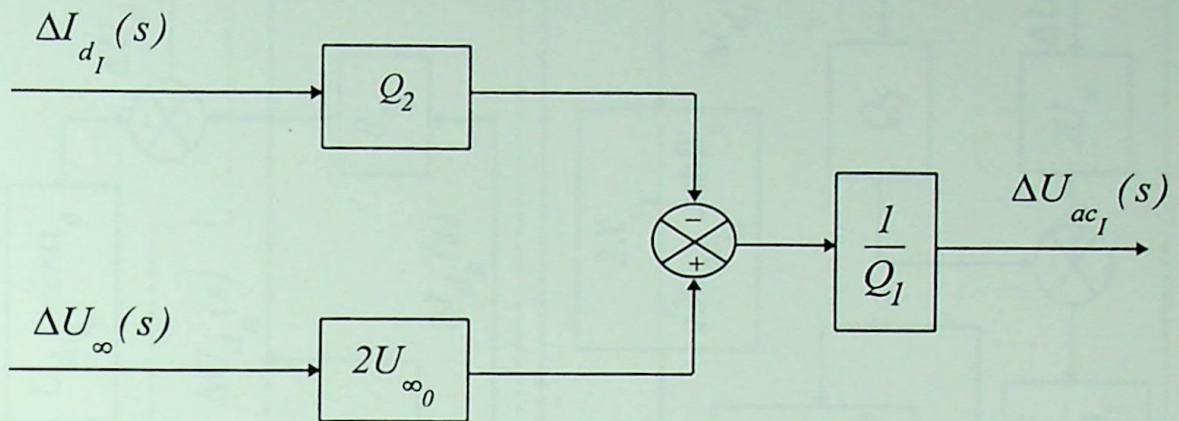


Figura 3.16 - Diagrama de blocos do sistema CA da inversora.

A figura 3.17 reúne os diagramas de blocos de todos os elementos que compõem o sistema de transmissão CC Foz-Ibiúna e, em seguida, após manipulação adequada das equações diferenciais desses mesmos elementos, é definida a equação matricial de estado.

Deve-se enfatizar a importância desta etapa de definição do modelo linear da transmissão ponto-a-ponto, pois é a partir da representação adotada que se comporá o sistema multiterminal, objeto principal de estudo desta pesquisa.

Portanto, para garantia de resultados de simulação confiáveis do sistema a três terminais, o próximo capítulo abordará a representatividade do modelo linear ponto-a-ponto.

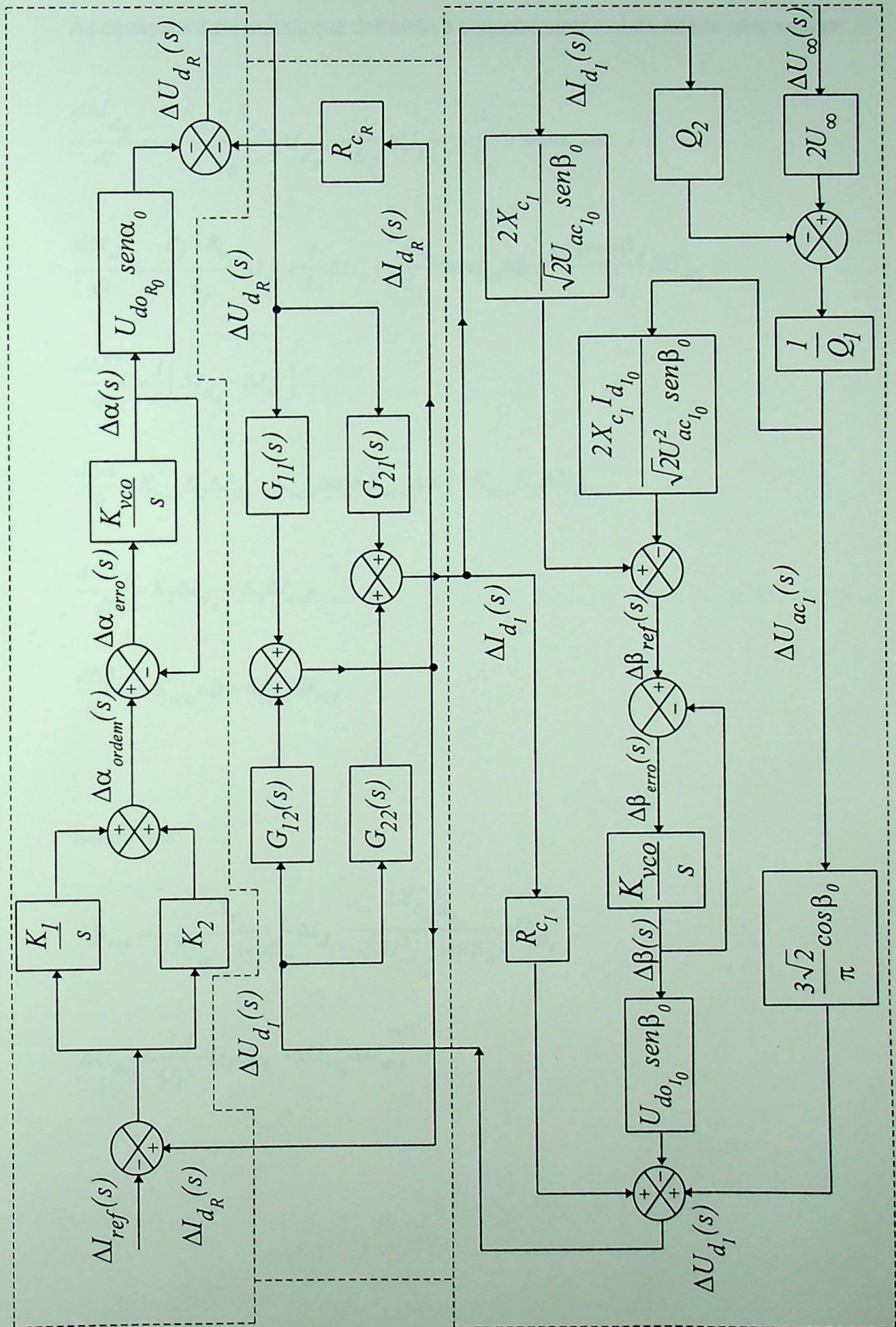


Figura 3.17 - Diagrama de blocos completo da transmissão ponto-a-ponto.

As equações diferenciais que definirão a equação matricial de estado são, a saber:

$$\frac{d\Delta I_{d_R}}{dt} = -\frac{R_R + R_{c_R}}{L_R} \Delta I_{d_R} - \frac{1}{L_R} \Delta U_c - \frac{U_{do_{R0}}}{L_R} \text{sen} \alpha_0 \Delta \alpha$$

$$\frac{d\Delta I_{d_I}}{dt} = -\frac{R_I + R_{c_I}}{L_I} \Delta I_{d_I} + \frac{1}{L_I} \Delta U_c + \frac{U_{do_{I0}}}{L_I} \text{sen} \beta_0 \Delta \beta - \frac{3\sqrt{2} \cos \beta_0}{\pi L_I} \Delta U_{ac_I}$$

$$\frac{d\Delta U_c}{dt} = \frac{1}{C} (\Delta I_{d_R} - \Delta I_{d_I})$$

$$\frac{d\Delta \alpha}{dt} = K_{vco} K_2 \Delta I_{d_R} - K_{vco} \Delta \alpha + K_{vco} \Delta \alpha_I - K_{vco} K_2 \Delta I_{ref}$$

$$\frac{d\Delta \alpha_I}{dt} = K_I \Delta I_{d_R} - K_I \Delta I_{ref}$$

$$\frac{d\Delta \beta}{dt} = -K_{vco} \Delta \beta + K_{vco} \Delta \beta_{ref}$$

Sendo que:

$$\Delta \beta_{ref} = \frac{2X_{c_I}}{\sqrt{2}U_{ac_{I0}} \text{sen} \beta_0} \Delta I_{d_I} - \frac{2X_{c_I} I_{d_{I0}}}{\sqrt{2}U_{ac_{I0}}^2 \text{sen} \beta_0} \Delta U_{ac_I}$$

$$\Delta U_{ac_I} = \frac{1}{Q_I} (-Q_2 \Delta I_{d_I} + 2U_{\infty_0} \Delta U_{\infty})$$

Foram selecionadas, como variáveis de estado do sistema de transmissão, os seguintes desvios:

$$x_1(t) = \Delta I_{d_R}(t) = \text{corrente contínua da estação retificadora};$$

$$x_2(t) = \Delta I_{d_I}(t) = \text{corrente contínua da estação inversora};$$

$$x_3(t) = \Delta U_c(t) = \text{tensão sobre a capacitância da linha de corrente contínua};$$

$$x_4(t) = \Delta \alpha(t) = \text{ângulo de disparo da estação retificadora};$$

$$x_5(t) = \Delta \alpha_1(t) = \text{contribuição do ramo integral do ângulo de disparo da estação retificadora};$$

$$x_6(t) = \Delta \beta(t) = \text{ângulo de disparo da estação inversora}.$$

A equação matricial de estado, que reproduz o desempenho dinâmico do sistema ponto-a-ponto, é dada na forma:

$$\dot{X} = AX + BU$$

Onde:

$X \rightarrow$ vetor de estado;

$A \rightarrow$ matriz coeficiente de estado;

$U \rightarrow$ vetor de controle;

$B \rightarrow$ matriz coeficiente de controle.

Logo:

Equação Matricial de Estado do Sistema Ponto-a-Ponto

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_{d_R} \\ \Delta \dot{I}_{d_I} \\ \Delta \dot{U}_c \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \Delta \dot{\alpha}_I \\ \Delta \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_R + R_{c_R}}{L_R} & 0 & -\frac{1}{L_R} & -\frac{U_{d_{oR_0}} \operatorname{sen} \alpha_0}{L_R} & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{R_I + R_{c_I}}{L_I} - \frac{3\sqrt{2} Q_2 \cos \beta_0}{\pi L_I Q_I} \right) & \frac{1}{L_I} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{vco} K_2 & 0 & 0 & -K_{vco} & K_{vco} & 0 \\ K_I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{vco} Q_3 \left(I + \frac{I_{d_{I_0}} Q_2}{V_{ac_{I_0}} Q_I} \right) & 0 & 0 & 0 & -K_{vco} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{d_R} \\ \Delta I_{d_I} \\ \Delta U_c \\ \Delta \alpha \\ \Delta \alpha_I \\ \Delta \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -K_{vco} K_2 \\ -K_I \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{ref} \\ \Delta U_{\infty} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -K_{vco} K_2 \\ -K_I \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6\sqrt{2} U_{\infty_0} \cos \beta_0}{\pi L_I Q_I} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{vco} K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_{vco} Q_3 \frac{I_{d_{I_0}} Q_2}{V_{ac_{I_0}} Q_I} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{ref} \\ \Delta U_{\infty} \end{bmatrix}$$

Onde:

$$Q_1 = 2N_I^2 q_1 U_{ac_{l_0}} + \frac{2\sqrt{6}}{\pi} q_4 I_{d_{l_0}} - \frac{\sqrt{12}}{\pi} q_5 X_{c_1} \frac{I_{d_{l_0}}^2}{U_{ac_{l_0}}};$$

$$Q_2 = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} q_4 U_{ac_{l_0}} + \frac{36}{\pi^2 N_I^2} Z_{S_1}^2 I_{d_{l_0}} + \frac{\sqrt{12}}{\pi} q_5 X_{c_1} I_{d_{l_0}};$$

$$Q_3 = \frac{2X_{c_1}}{\sqrt{2}U_{ac_{l_0}} \operatorname{sen}\beta_0};$$

$$q_1 = \left(1 - \frac{X_{S_1}}{X_{f_1}}\right)^2 + \left(\frac{R_{S_1}}{X_{f_1}}\right)^2;$$

$$q_2 = \sqrt{3} \left(X_{S_1} - \frac{Z_{S_1}^2}{X_{f_1}} \right);$$

$$q_3 = \sqrt{3} R_{S_1};$$

$$q_4 = q_2 \operatorname{sen}\phi_{l_0} + q_3 \operatorname{cos}\phi_{l_0};$$

$$q_5 = q_2 \operatorname{cot}\phi_{l_0} - q_3.$$

Capítulo 4

Verificação do Modelo Linear do Sistema Ponto-a-Ponto

4.1 - Simplificações Adotadas

Este capítulo verifica a eficácia do modelo linear desenvolvido para o elo Foz-Ibiúna com a principal finalidade de propiciar resultados de simulação consistentes do modelo multiterminal, ou seja, do modelo linear ponto-a-ponto acrescido da representação da terceira conversora. Esta verificação se consistirá na comparação de resultados obtidos de simulações digitais empregando o programa de transitórios eletromecânicos MICRODIN, versão PC do programa TRANSDIR (PECO), e o programa científico MATLAB for Windows, versão 4.0. Para o procedimento desta averiguação, foram adotados os valores de parâmetros elétricos e de controle atualmente utilizados nos estudos no âmbito do Planejamento da Operação do Grupo Coordenador do Sistema Interligado (GCOI).

A adoção dos dados típicos empregados nos estudos dinâmicos do elo CC acarretou algumas simplificações no modelo linear elaborado. Para compatibilizar o modelo linear com o não-linear, foram eliminados a capacitância na representação da linha de corrente contínua e o atraso introduzido pelos osciladores controlados por tensão dos circuitos de disparo das válvulas (VCO).

Ao considerar a capacitância da linha CC nula, isto é $C_{cc} = 0$, ocorrem as seguintes alterações no modelo matemático da linha de transmissão em corrente contínua (rever figura 3.12):

$$I_{d_R} = I_{d_I} = I_d$$

$$R = R_R + R_I = r_{cv_R} + r_{a_R} + r_{cc} + r_{a_I} + r_{cv_I}$$

$$L = L_R + L_I = l_{cv_R} + l_{a_I} + l_{cc} + l_{a_I} + l_{cv_I}$$

Logo, modelada apenas pelos elementos série, a linha de corrente contínua terá a função de transferência apresentada pela figura 4.1.

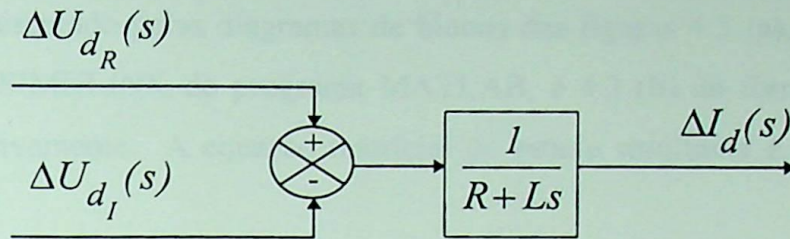
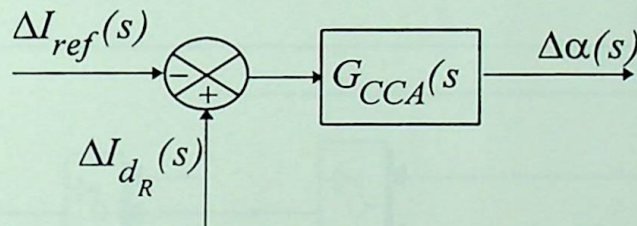
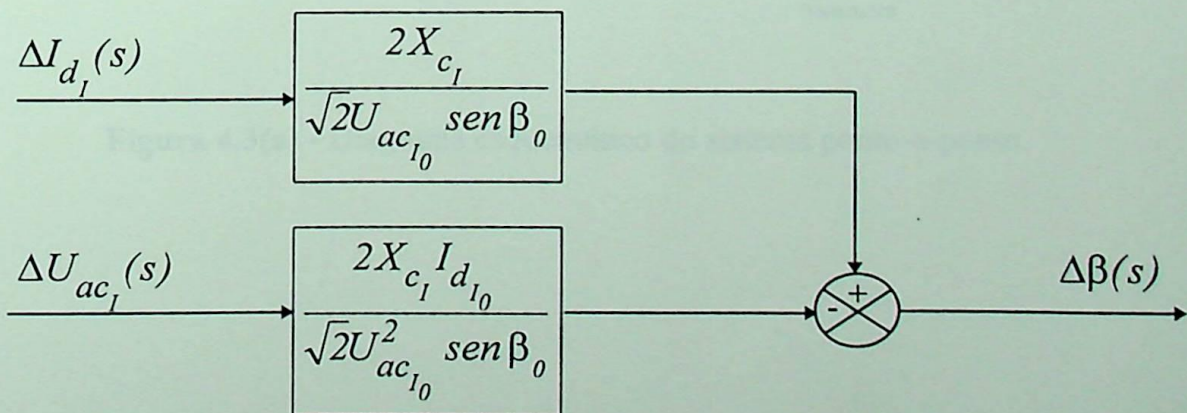


Figura 4.1 - Diagrama de blocos da linha CC.

Com a eliminação das funções VCO, as representações dos sistemas de disparo das válvulas das estações retificadora e inversora se reduziram aos diagramas de blocos apresentados pelas figuras 4.2 (a) e (b) respectivamente.



(a) - Estação retificadora.



(b) - Estação inversora.

Figura 4.2 - Diagramas de blocos do controle de disparo.

O modelo linear do elo Foz-Ibiúna, incluindo as duas simplificações que se fizeram necessárias, é apresentado pelos diagramas de blocos das figuras 4.3 (a), obtido diretamente da rotina gráfica SIMULINK do programa MATLAB, e 4.3 (b) de forma esquematizada e detalhada, respectivamente. A equação matricial de estado resultante é, então, definida em seguida.

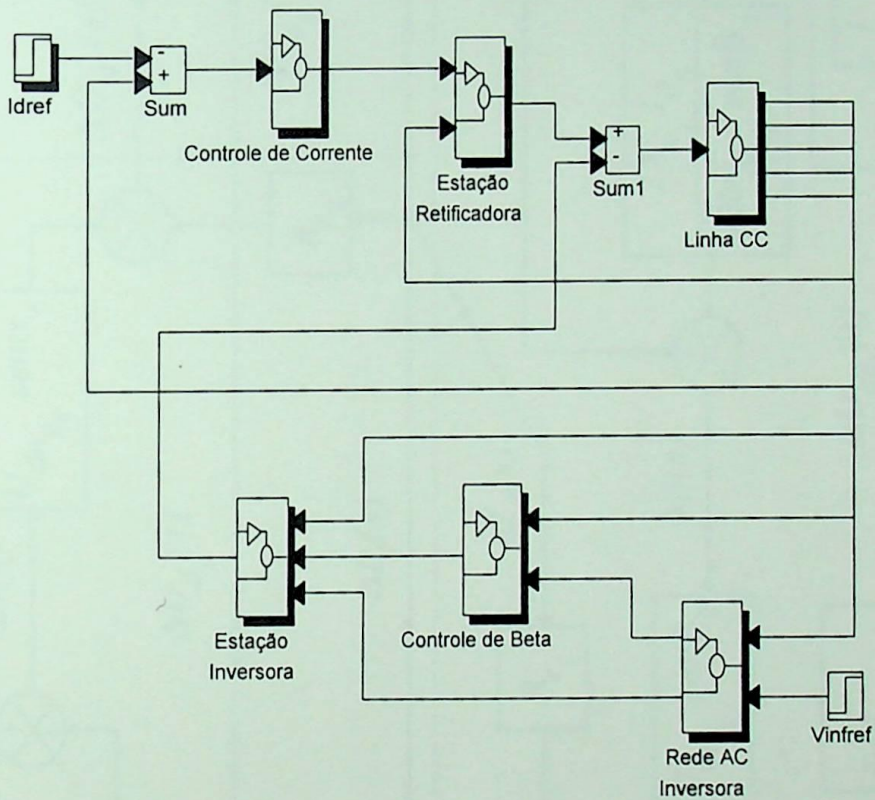


Figura 4.3(a) - Diagrama esquemático do sistema ponto-a-ponto.

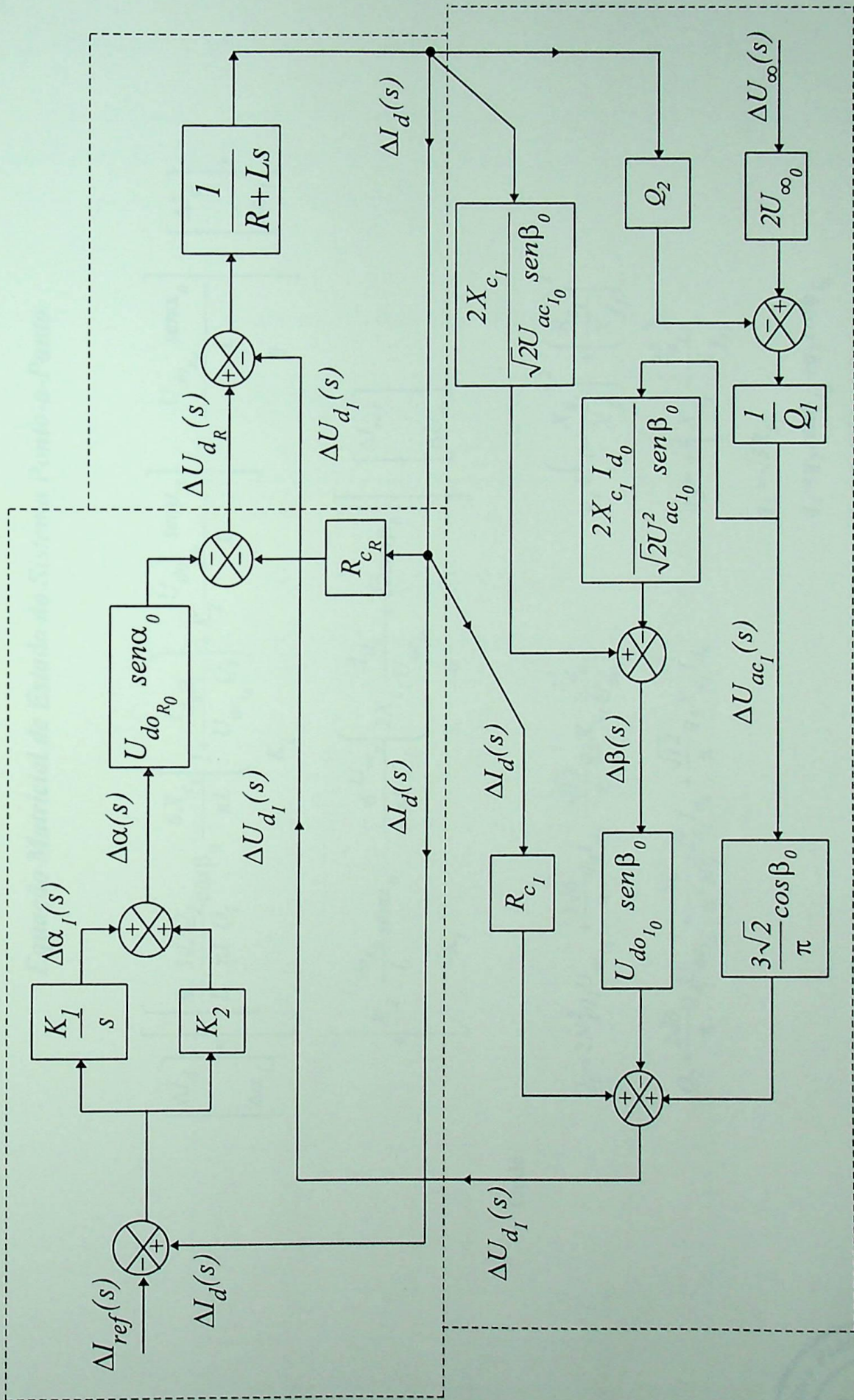


Figura 4.3(b) - Diagrama de blocos detalhado do sistema ponto-a-ponto.

Equação Matricial de Estado do Sistema Ponto-a-Ponto

$$\begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} \frac{3\sqrt{2}Q_2}{\pi L Q_1} \cos \beta_0 - \frac{6X_{c1}}{\pi L} \left(1 + \frac{I_{d0}Q_2}{U_{ac10}Q_1} \right) + K_2 & \frac{U_{doR0} \operatorname{sen} \alpha_0}{L} \\ K_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_{doR0} \operatorname{sen} \alpha_0}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{U_{doR0}}{L} \operatorname{sen} \alpha_0 \\ -K_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{6}{\pi L} \frac{U_{\infty 0}}{Q_1} \left(2X_{c1} \frac{I_{d0}}{U_{ac10}} + \sqrt{2} \cos \beta_0 \right) \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{ref} \\ \Delta U_{\infty} \end{bmatrix}$$

Onde:

$$Q_1 = 2N_I^2 q_1 U_{ac10} + \frac{2\sqrt{6}}{\pi} q_4 I_{d0} - \frac{\sqrt{12}}{\pi} q_5 X_{c1} U_{ac10} \frac{I_{d0}^2}{U_{ac10}}$$

$$Q_2 = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} q_4 U_{ac10} + \frac{36}{\pi^2 N_I^2} Z_{S1}^2 I_{d0} + \frac{\sqrt{12}}{\pi} q_5 X_{c1} I_{d0}$$

$$q_1 = \left(1 - \frac{X_{S1}}{X_{f1}} \right)^2 + \left(\frac{R_{S1}}{X_{f1}} \right)^2$$

$$q_2 = \sqrt{3} \left(X_{S1} - \frac{Z_{S1}^2}{X_{f1}} \right)$$

$$q_3 = \sqrt{3} R_{S1}$$

$$q_4 = q_2 \operatorname{sen} \phi_{I_0} + q_3 \cos \phi_{I_0}$$

$$q_5 = q_2 \cot \phi_{I_0} - q_3$$

4.2 - Dados dos Sistemas Elétrico e de Controle

As tabelas 1 e 2 listam os valores dos parâmetros de controle e elétricos empregados nas simulações de regime dinâmico de um polo do elo Foz-Ibiúna. A tabela 3 apresenta os valores das condições operativas nominais dos sistemas CA/CC.

Tabela 1 - PARÂMETROS DE CONTROLE

Parâmetros	Valores
K_1	16.72 rad/kA-seg
K_2	0.68 rad/kA

Tabela 2 - PARÂMETROS ELÉTRICOS

Parâmetros	Valores
R_{c_R}	4x5.86 [Ω]
r_{cv_R}	4x0.14 [Ω]
r_{a_R}	desprezível
r_{cc}	10.47 [Ω]
r_{a_I}	desprezível
r_{cv_I}	4x0.13 [Ω]
R_{c_I}	4x5.43 [Ω]
l_{cv_R}	4x0.04 [H]
l_{a_R}	0.27 [H]
l_{cc}	0.69 [H]
l_{a_I}	0.27 [H]
l_{cv_I}	4x0.03 [H]
R_{s_I}	2.86 [Ω]
X_{s_I}	32.73 [Ω]
X_{f_I}	122.10 [Ω] (975 MVar)

Tabela 3 - CONDIÇÕES INICIAIS

Parâmetros	Valores
U_{doR_0}	4x172.0 kV
α_0	15°
U_{doI_0}	4x164.7 kV
β_0	38.3°
I_{d_0}	2.61 kA
$\cos\phi_{I_0}$	0.87
U_{acI_0}	122.0 kV
U_{∞_0}	348.0 kV

4.3 - Verificação do Modelo do Elo CC

Para a avaliação do modelo linear do elo CC desenvolvido foram simuladas aplicações de degraus de $\pm 5\%$ na referência do controle de corrente do retificador em ambos os modelos; o não-linear do programa MICRODIN e o linear implementado no programa MATLAB; e comparadas as respostas transitórias da variável controlada I_d .

As condições iniciais de regime permanente nominal, necessárias para as simulações de desempenho dinâmico dos sistemas CA e CC, foram obtidas a partir do programa digital de fluxo de carga FLOWINT, versão PC do programa BIGPOWERMOD (PECO), também utilizado nos estudos do Planejamento da Operação Elétrica de FURNAS. O sistema elétrico adotado como caso base é apresentado pela figura 4.4. Os arquivos de dados de entrada e resultados do fluxo de potência da operação do elo CC em condições nominais encontram-se no Apêndice A.

4.3.1 - Simulação no MICRODIN:

O sistema elétrico adotado (figura 4.4) manteve a identidade da rede CA real do sistema retificador, substituindo apenas o modelo das máquinas síncronas da usina de Itaipu 50 Hz por um barra infinita (simplificação já justificada no capítulo 3). Quanto à rede CA receptora, ela foi representada por um equivalente estático, com os valores de indutância e resistência calculados de forma a obter o valor de 2,3 definido para SCR da SE Ibiúna e ângulo de amortecimento do sistema em torno de 85° .

O arquivo de dados de entrada do sistema de controle do elo CC, para a simulação do regime transitório das respostas a degraus na referência do controle de corrente da estação retificadora, está documentado no Apêndice A.

O comportamento das variáveis de interesse do sistema para a aplicação de degraus de $+5\%$ e -5% em I_{ref} estão respectivamente registradas pelos gráficos das figuras 4.6 (a), (b) e (c) e 4.7 (a), (b) e (c).

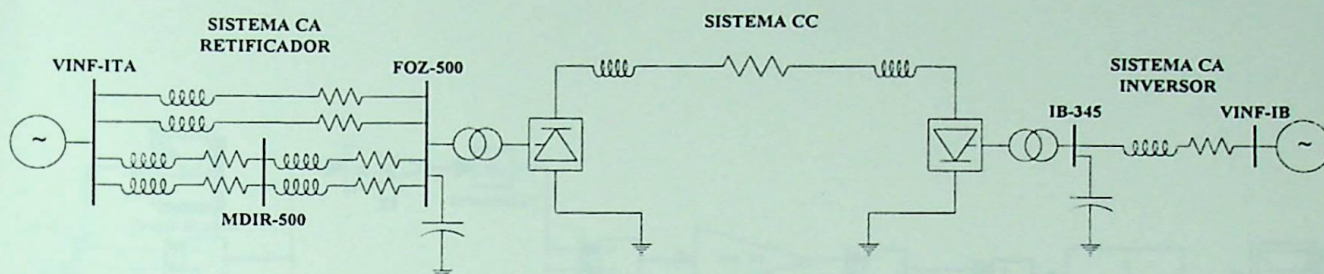


Figura 4.4 - Sistema elétrico representado no MICRODIN.

4.3.2 - Simulação no MATLAB:

A modelagem do elo CC desenvolvida no MATLAB é ilustrada pelo diagrama de blocos da figura 4.5. Nesta representação, a rede CA da estação retificadora foi reduzida a um barramento infinito, e a rede receptora incluída de forma semelhante à implementada no programa MICRODIN.

O arquivo (M-file) de cálculo das constantes, e seus significados, do modelo linear ponto-a-ponto, juntamente com o arquivo de desenvolvimento da equação matricial de estado, estão inseridos no Apêndice A.

As respostas da variável controlada I_d a degraus de +5% e -5% na referência de corrente estão respectivamente registradas pelos gráficos das figuras 4.6 (d) e 4.7 (d).

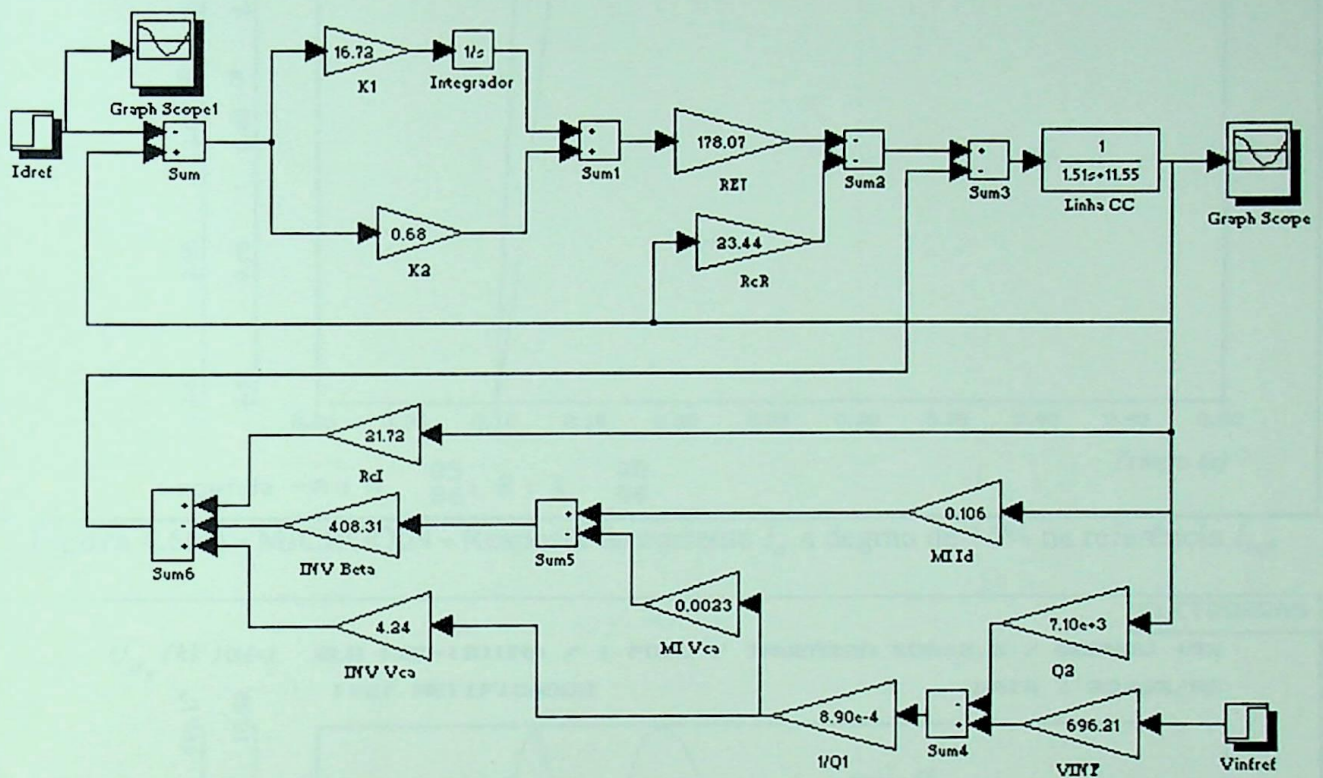


Figura 4.5 - Diagrama de blocos do sistema ponto-a-ponto desenvolvido no MATLAB.

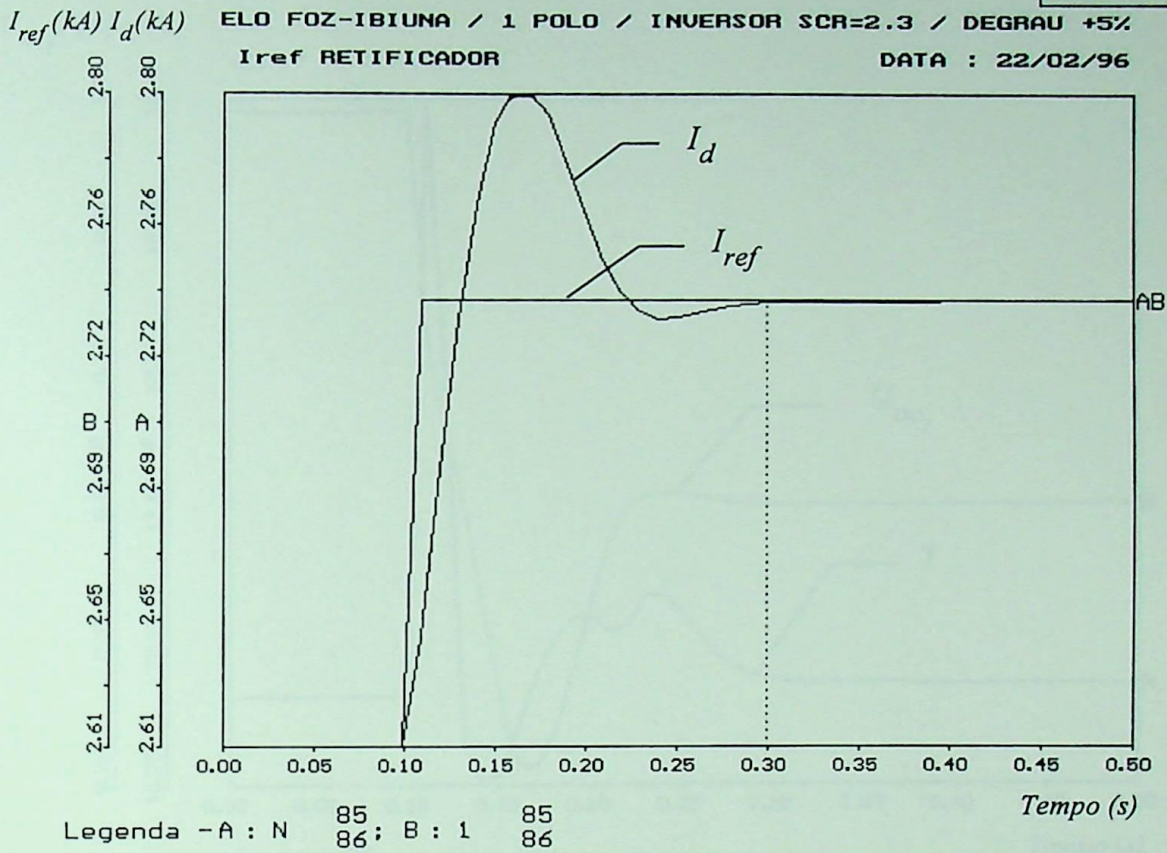


Figura 4.6(a) - MICRODIN - Resposta da corrente I_d a degrau de +5% na referência I_{ref}

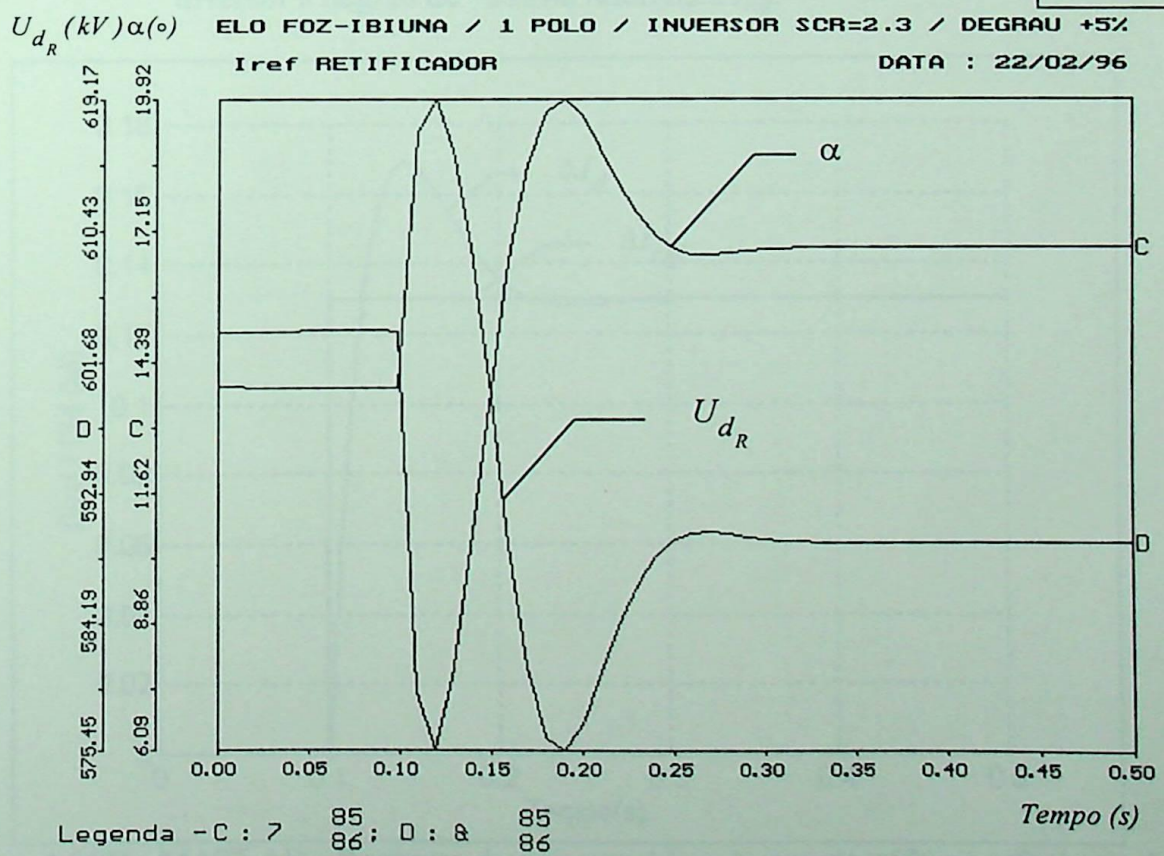


Figura 4.6(b) - MICRODIN - Resposta da tensão contínua e do ângulo de disparo do retificador a degrau de +5% na referência I_{ref}

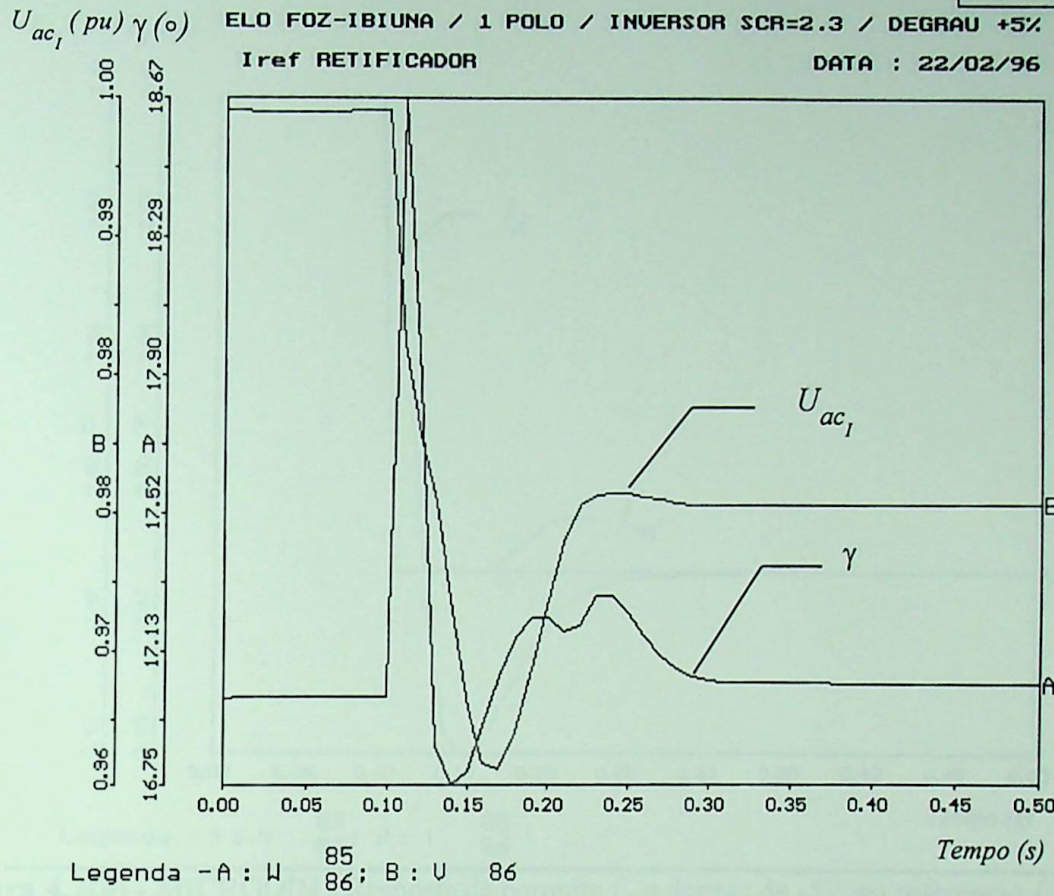


Figura 4.6(c) - MICRODIN - Resposta da tensão alternada e do ângulo de extinção do inversor a degrau de +5% na referência I_{ref} .

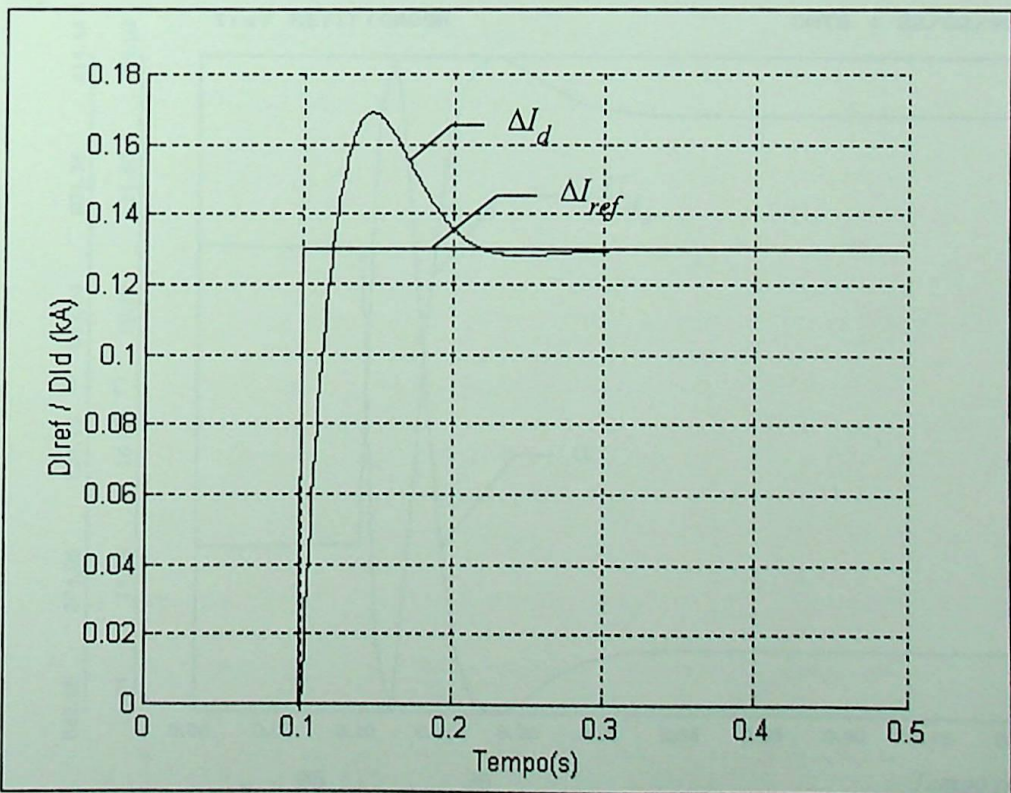


Figura 4.6(d) - MATLAB - Resposta da corrente ΔI_d a degrau de +5% na referência ΔI_{ref} .

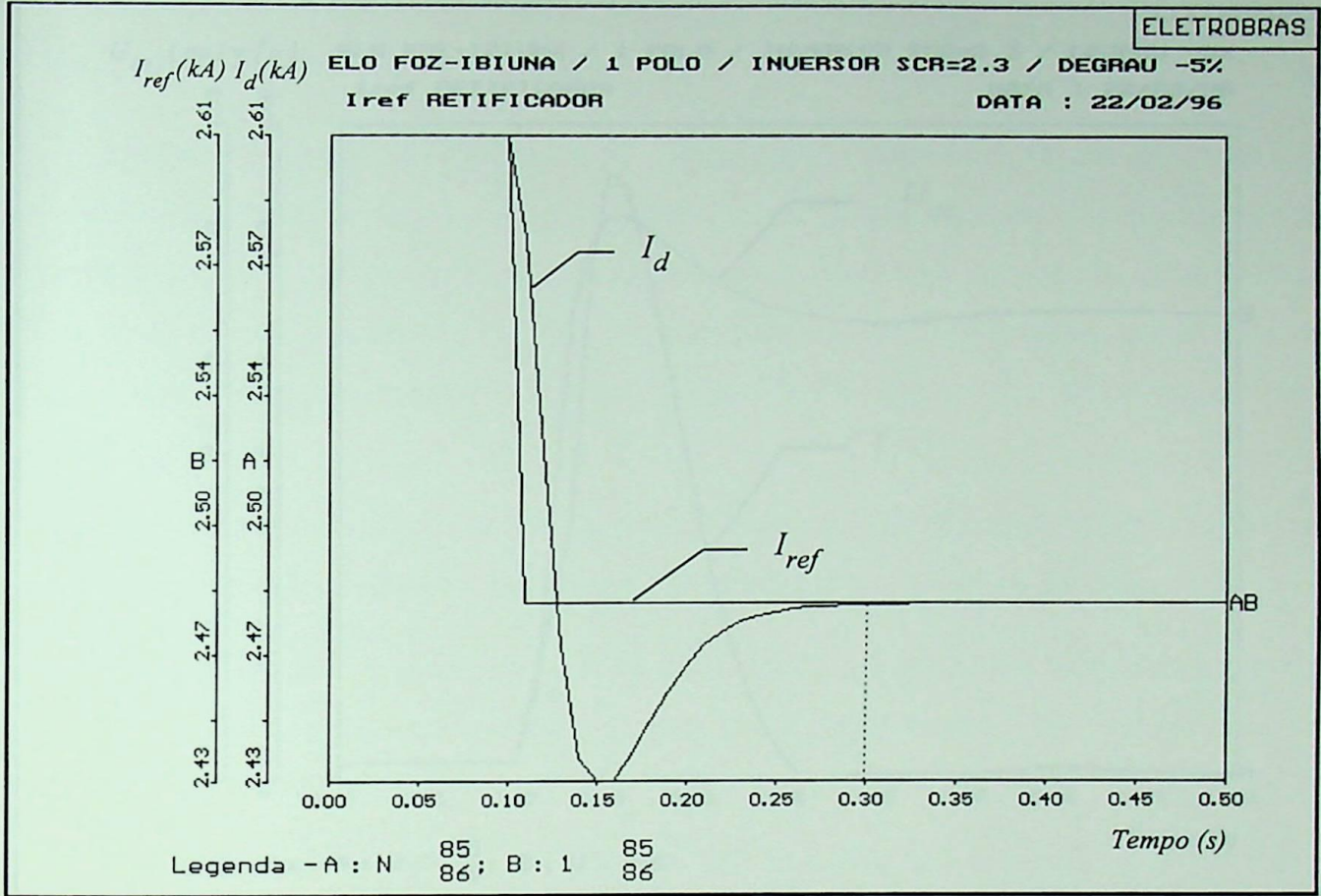


Figura 4.7(a) - MICRODIN - Resposta da corrente I_d a degrau de -5% na referência I_{ref} .

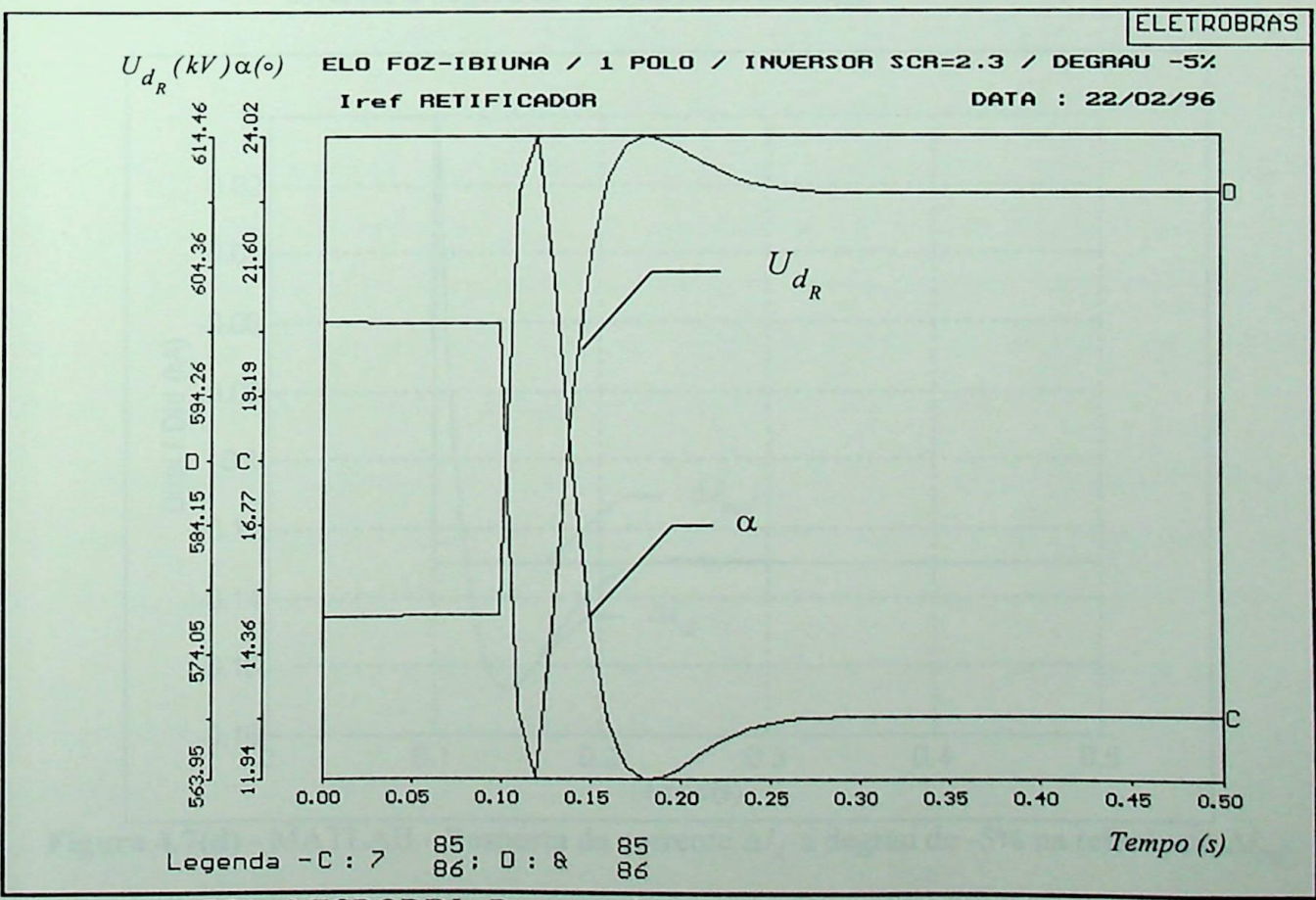


Figura 4.7(b) - MICRODIN - Resposta da tensão contínua e do ângulo de disparo do retificador a degrau de -5% na referência I_{ref} .

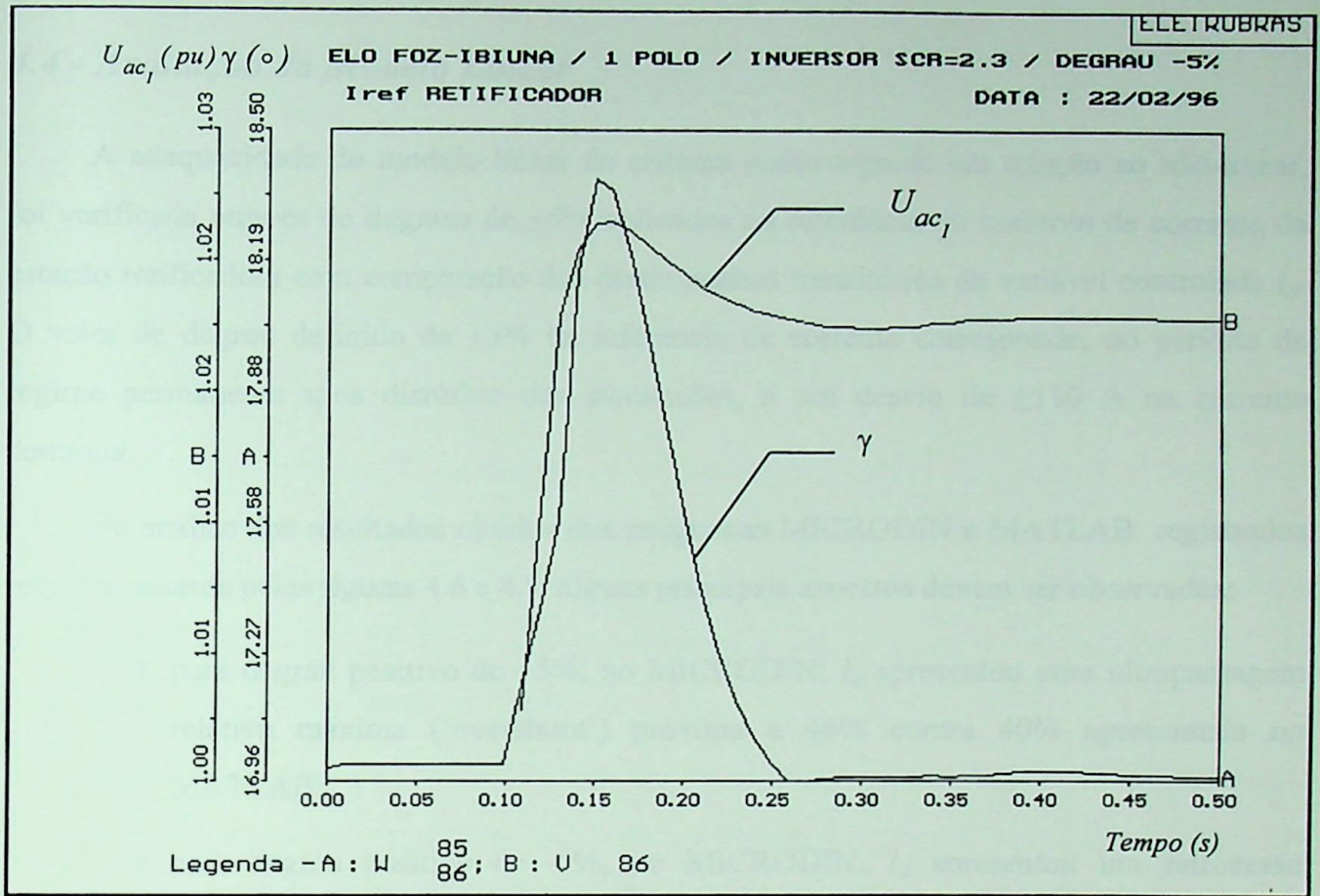


Figura 4.7(c) - MICRODIN - Resposta da tensão alternada e do ângulo de extinção do inversor a degrau de -5% na referência I_{ref} .

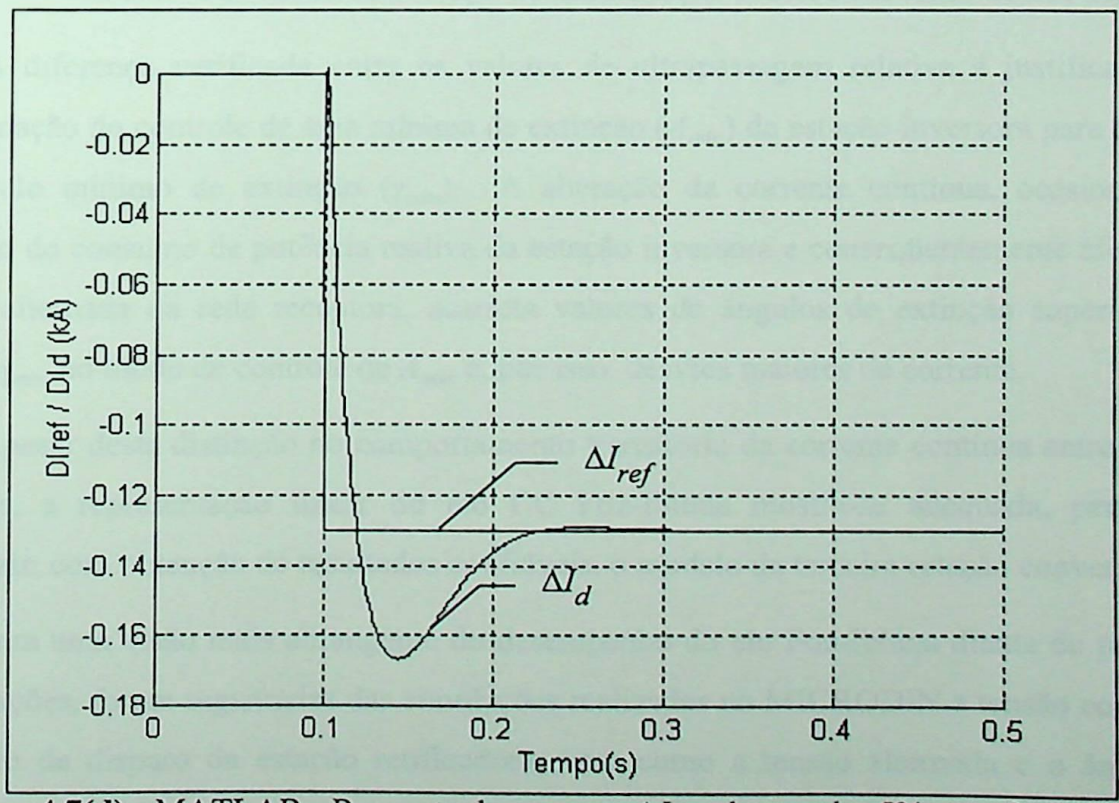


Figura 4.7(d) - MATLAB - Resposta da corrente ΔI_d a degrau de -5% na referência ΔI_{ref} .

4.4 - Avaliação do Modelo Linear

A adequacidade do modelo linear do sistema ponto-a-ponto em relação ao não-linear, foi verificada através de degraus de $\pm 5\%$ aplicados na referência do controle de corrente da estação retificadora com comparação dos desempenhos transitórios da variável controlada I_d . O valor de degrau definido de $\pm 5\%$ na referência de corrente corresponde, no período de regime permanente após distúrbio das simulações, a um desvio de ± 130 A na corrente contínua.

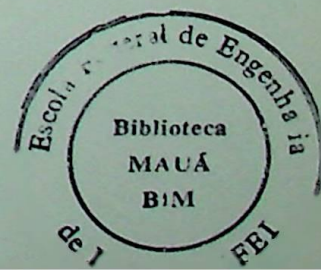
Da análise dos resultados obtidos dos programas MICRODIN e MATLAB, registrados respectivamente pelas figuras 4.6 e 4.7, alguns principais aspectos devem ser observados:

- ♦ para degrau positivo de $+5\%$, no MICRODIN, I_d apresentou uma ultrapassagem relativa máxima ('overshoot') próxima a 46% contra 40% apresentada no MATLAB;
- ♦ para degrau positivo de -5% , no MICRODIN, I_d apresentou um retrocesso ('undershoot') próximo a 37% contra 30% apresentado no MATLAB;
- ♦ em ambos os modelos o tempo de acomodação ocorreu em torno de 200 ms.

A diferença verificada entre os valores de ultrapassagem relativa é justificada pela aproximação do controle de área mínima de extinção (A_{min}) da estação inversora para controle de ângulo mínimo de extinção (γ_{min}). A alteração da corrente contínua, ocasionando a variação do consumo de potência reativa da estação inversora e conseqüentemente afetando a tensão alternada da rede receptora, acarreta valores de ângulos de extinção superiores ao ângulo γ_{min} no modo de controle de A_{min} e, por isso, desvios maiores de corrente.

Apesar desta distinção no comportamento transitório da corrente contínua entre os dois modelos, a representação linear do elo CC Foz-Ibiúna mostra-se adequada, permitindo introduzir, com obtenção de resultados confiáveis, o modelo da terceira estação conversora.

Para uma visão mais abrangente do desempenho do elo Foz-Ibiúna diante de pequenas perturbações, foram registradas das simulações realizadas no MICRODIN a tensão contínua e o ângulo de disparo da estação retificadora, bem como a tensão alternada e o ângulo de extinção da estação inversora.



Capítulo 5

Modelo Linear do Sistema Multiterminal em Corrente Contínua

5.1 - Introdução

Este trabalho visa, principalmente, a aplicação de técnicas de controle lineares para ajuste dos parâmetros de controle da estação conversora a ser incluída quando da extensão do elo Foz-Ibiúna para configuração a três terminais. Desse modo fica justificado o destaque dado neste capítulo aos princípios de operação do modo de controle de transmissões CC multiterminais na configuração paralela.

Para continuidade do objetivo desta pesquisa, neste mesmo capítulo, após apresentado o modo básico de controle de ligações em corrente contínua com três ou mais terminais, são apresentadas as características de operação da nova estação inversora da proposta ligação CC Foz-Ibiúna-Rio e, então, desenvolvido o modelo linear deste sistema multiterminal.

Ainda dentro deste mesmo tópico, são atribuídos os valores dos parâmetros elétricos dos novos elementos de transmissão inseridos na modelagem linear original e executado o estudo de fluxo de carga para determinação das condições operativas nominais do sistema de transmissão CC Foz-Ibiúna-Rio.

5.2 - Opções para a Expansão do Elo Foz-Ibiúna

A possibilidade de extensão do elo de corrente contínua do Projeto Itaipu até a área Rio, uma das hipóteses contemplada para o reforço ao sistema de abastecimento dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, compreendeu três opções de arranjo físico.

Esta diversidade de alternativas de configurações deveu-se, principalmente, ao fato do sistema CCAT existente ser composto de dois conversores de 12-pulsos em série em cada pólo, permitindo, com isso, que a extensão em corrente contínua pudesse ser realizada nos níveis de tensão de ± 300 kV ou ± 600 kV, conforme ilustrado pelas figuras 5.1 (a), (b) e (c).

Por razões técnico-econômicas apresentadas na referência [11], a alternativa de inclusão em paralelo de uma terceira estação conversora no nível de tensão de ± 600 kV na área Rio (figura 5.1 (a)) apresentou-se a mais atrativa e promissora, tornando-se, por isto, o motivo principal para a adoção do arranjo físico de três terminais paralelos no desenvolvimento do modelo linear do sistema MTCC.

Devem, também, ser informadas outras importantes características da extensão do elo Foz-Ibiúna já norteadas pela referência [11] e que independem da opção do arranjo físico CC. São elas: a conexão da terceira estação conversora ocorreria na subestação São José (RJ) do sistema FURNAS, com potência instalada de 1500 MW e interligada ao sistema CA pela rede de 500 kV que abastece a área Rio.

É interessante complementar que a redução da potência entregue na subestação Ibiúna não causaria grande déficit na área São Paulo pois, dentro do horizonte analisado, era prevista a entrada em operação de novas usinas.

Quanto ao desempenho dinâmico do elo CC espera-se a melhoria de comportamento transitório frente a distúrbios no sistema receptor da inversora Ibiúna, visto que para a mesma topologia de rede CA seria injetada menos potência ativa.

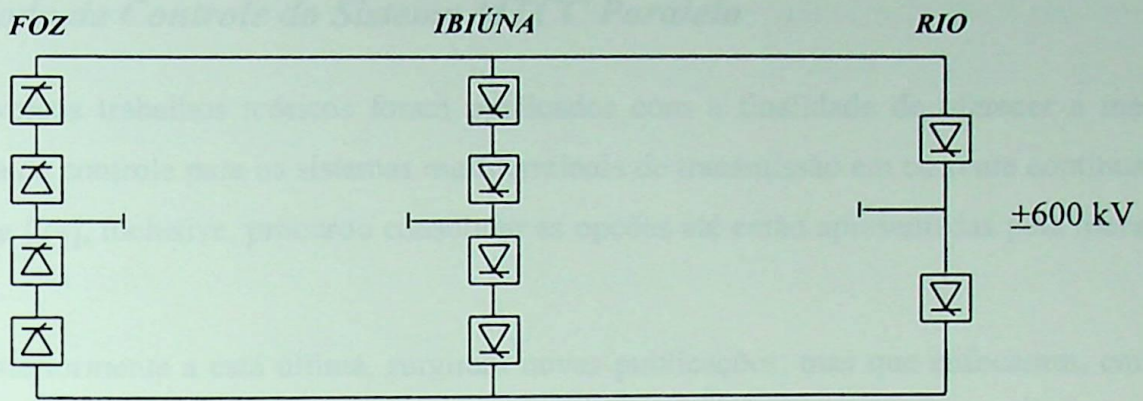


Figura 5.1(a) - Alternativa paralela ± 600 kV.

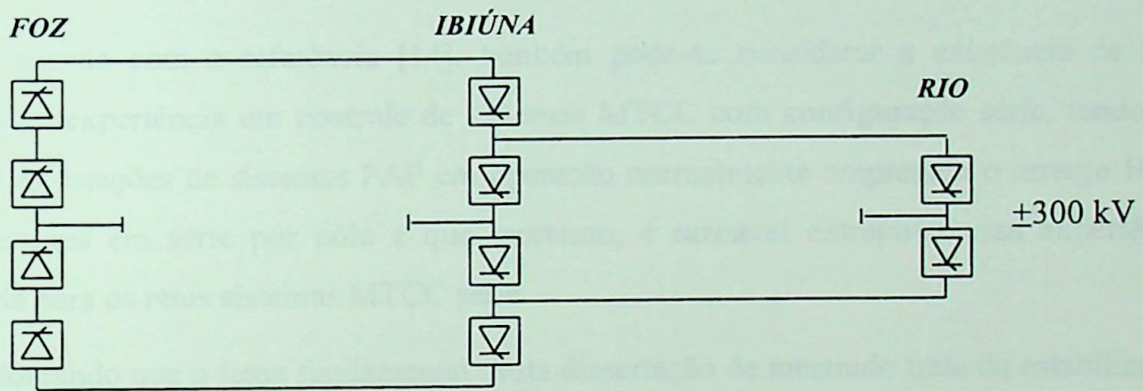


Figura 5.1(b) - Alternativa paralela ± 300 kV.

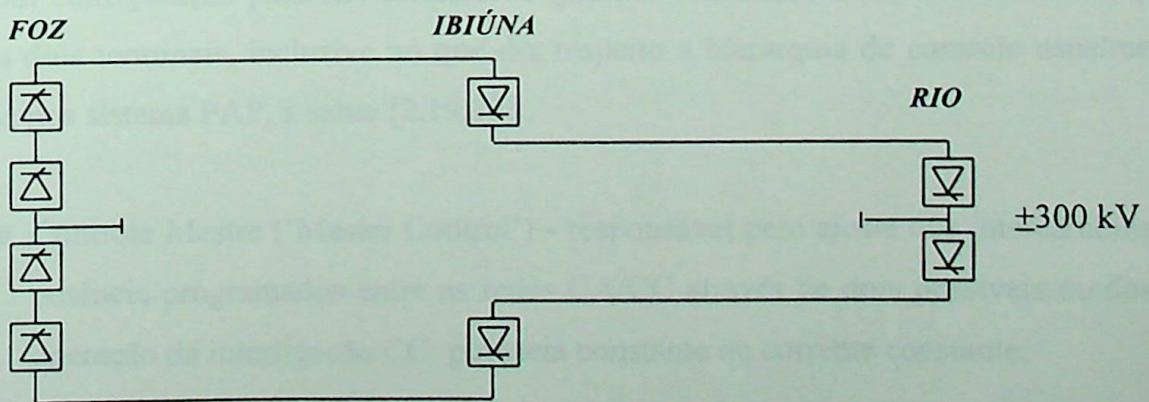


Figura 5.1(c) - Alternativa série ± 300 kV.

5.3 - Modo de Controle do Sistema MTCC Paralelo

Diversos trabalhos teóricos foram publicados com a finalidade de oferecer a melhor estratégia de controle para os sistemas multiterminais de transmissão em corrente contínua. A referência [24], inclusive, procurou consolidar as opções até então apresentadas pela literatura existente.

Posteriormente a esta última, surgiram novas publicações, mas que enfocaram, em sua maioria, a prática operativa dos sistemas ponto-a-ponto que incluem provisão de conexão em paralelo e/ou de reais sistemas multiterminais paralelos radiais que entraram em operação comercial (mencionados no capítulo 1). Estes artigos, que narram as experiências operativas adquiridas, contribuíram para validar as filosofias de controle desenvolvidas para o arranjo em paralelo das conversoras.

De acordo com a referência [14], também pode-se considerar a existência de uma considerável experiência em controle de sistemas MTCC com configuração série, tendo em vista que as estações de sistemas PAP em operação normalmente empregam o arranjo físico de conversores em série por pólo e que, portanto, é razoável extrapolar essa experiência acumulada para os reais sistemas MTCC série.

Reforçando que o tema fundamental desta dissertação de mestrado trata da estabilização da malha de controle de sistemas em corrente contínua a três terminais paralelos, não serão aqui mencionadas as características de controles de sistemas MTCC série, as quais podem ser encontradas, em caso de interesse, nas referências [2],[14], [24] e [25].

Do que se pode extrair da pesquisa à bibliografia existente sobre controles de sistemas MTCC com configuração paralela, constata-se grandes semelhanças àqueles utilizados para sistemas a dois terminais, inclusive no que diz respeito a hierarquia de controle usualmente empregada nos sistema PAP, a saber [2,19,22]:

- ◆ Controle Mestre ('Master Control') - responsável pelo ajuste dos intercâmbios de potência programados entre as redes CA/CC através de dois possíveis modos de operação da interligação CC: potência constante ou corrente constante;

- ◆ Controle de Pólo ('Pole Control') - mantém a tensão e a corrente da rede CC constantes e iguais a seus valores de referência. São controles rápidos que atuam diretamente no sistema de disparo das válvulas;
- ◆ Controle de Conversor ('Converter Control') - é basicamente constituído pelo complexo sistema de controle de disparo das pontes conversoras e, se for o caso, também por controles de modulação de potência.

O que deve ser observado é que os controles a serem aplicados em sistemas MTCC devem ser projetados para evitarem os problemas particulares deste tipo de transmissão, em adição aos requisitos usuais das transmissões PAP [26].

No tocante as diferenças entre os sistemas de transmissão PAP e MTCC paralelo, a principal delas concentra-se na maior importância assumida pela comunicação no desempenho desejado do controle mestre para a obtenção de uma operação coordenada entre as várias conversoras que compõem o sistema MTCC [14].

Ainda de acordo com a literatura sobre o tema, não há diferenças específicas no sistema de disparo das válvulas, mas há a necessidade de controles adicionais a nível de pólo para a operação devida dos sistemas MTCC com configuração paralela.

Como esta pesquisa busca um modelo linearizado do sistema de transmissão a três terminais em torno do ponto de operação nominal, apenas os níveis de controle de pólo e de conversor são incluídos na modelagem, da mesma forma que no modelo linear PAP elaborado. A razão desse fato é que são observados apenas pequenos desvios nas principais grandezas do sistema e em um período de análise que a atuação do controle mestre não mostra-se sensível.

Portanto, é imprescindível uma descrição detalhada da modalidade de controle de pólo adotada como solução pela referência [11] para a extensão do elo Foz-Ibiúna, o controle da margem de corrente, o qual é unanimemente empregado nos sistemas MTCC paralelos.

Baseado nas informações contidas principalmente nas referências [14], [27], [28] e [29] este modo de controle é descrito a seguir.

5.3.1 - Controle da Margem de Corrente

Como já introduzido anteriormente, a filosofia de controle de um sistema MTCC é uma extensão da estratégia convencional aplicada a sistemas PAP. Desse modo, o controle da margem de corrente, amplamente empregado nos sistemas multiterminais com arranjo em paralelo das conversoras, é similar ao utilizado no elo CC Foz-Ibiúna, já mencionado no capítulo 3.

Relembrando este modo de operação, a referência do amplificador de controle de corrente (CCA) do inversor é inferior a referência do CCA da retificadora de um valor ΔI_d ($I_{ref_R} - I_{ref_I} = \Delta I_d$). Como em condições normais de operação a estação retificadora tem o controle efetivo da corrente CC, haverá um erro de corrente em regime para o controlador da inversora que, por não poder corrigi-lo, operará em controle de disparo de área mínima e, conseqüentemente, determinará o nível de tensão da transmissão.

Num sistema multiterminal que emprega o método da margem de corrente, apenas uma conversora determina a tensão na linha CC. Esta estação conversora poderia ser uma estação retificadora ou inversora, se houvesse quatro ou mais terminais em paralelo, mas como na configuração específica desta pesquisa há somente três terminais, com apenas um retificador, a conversora responsável pelo controle da tensão CC será uma das estações inversoras. De qualquer forma, será obedecido o princípio de que:

$$\sum I_{ref_R} - \sum I_{ref_I} = \Delta I_d$$

Tratando-se de um projeto de ampliação, é sensato procurar minimizar as modificações que se façam necessárias ao sistema já existente. Assim pensando, e em concordância com as conclusões da referência [11], definiu-se a estação de Ibiúna como a conversora responsável pelo controle da tensão CC, de maneira a preservar o seu modo normal de operação em controle de área mínima de extinção e a redução da referência de seu amplificador de controle de corrente do valor da margem de corrente (ΔI_d).

Seguindo a filosofia do controle da margem de corrente aplicada a sistemas MTCC, uma vez determinada a estação que controlará a tensão, as demais estações paralelas deverão

operar em controle de corrente constante, garantido o princípio básico da lei das correntes de Kirchhoff que:

$$\sum I_{d_R} - \sum I_{d_I} = 0$$

Ao atender este requisito, fica caracterizado que a estação retificadora permanecerá em controle de corrente e que a condição normal de operação da estação inversora da área Rio também será em controle de corrente, de modo que:

$$I_{d_R} = \sum I_{d_I}$$

Descriminados os modos de controle das conversoras do proposto sistema MTCC Foz-Ibiúna-Rio, o ponto seguinte é o conhecimento de suas atuações, para então ser possível desenvolver corretamente a representação linear desta transmissão.

Uma forma fácil de entender o modo de operação de um sistema de transmissão CC é através da visualização da curva de sua característica estática no plano $U_d \times I_d$, a qual é constituída por diversos segmentos representativos dos modos de controle.

5.3.2 - Característica Estática do Sistema Multiterminal

A característica estática do proposto sistema MTCC possibilitará a compreensão das formas de atuação dos sistemas de controle, bem como a obtenção de suas formulações matemáticas nas diversas regiões de operação [16]. Ela é válida por tratar as variações contínuas que o sistema real está submetido, por uma sucessão de regimes estáticos.

A figura 5.2 apresenta a característica estática ($U_d \times I_d$) para a possível condição nominal do sistema Foz-Ibiúna-Rio. Deve ser observado que nesta situação as correntes contínuas (I_d) nas estações que operam no modo de controle de corrente deverão ser iguais as suas referências e na estação definida para o controle da tensão, I_d equivalerá a $I_{ref} + \Delta I_d$. No ponto de operação nominal (ponto A), será verificado o cumprimento da igualdade

$$I_{d_R} = \sum I_{d_I}$$

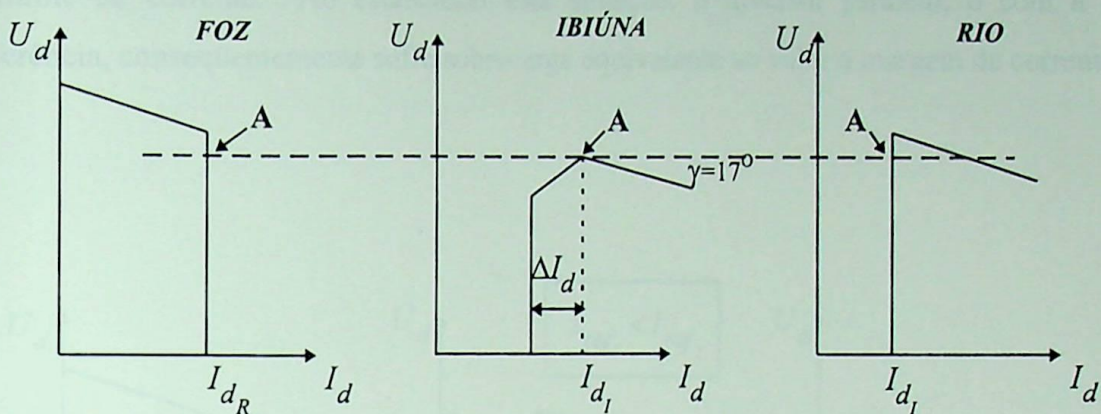


Figura 5.2 - Característica estática do sistema MTCC.

Da mesma forma que o sistema ponto-a-ponto, existem controles adicionais na estação inversora da área Rio que imporão limites a sua operação. Porém, as mesmas condições de contorno assumidas para o desenvolvimento do modelo linear do sistema a dois terminais serão aqui adotadas. Logo, os controles complementares não farão parte do escopo deste trabalho, mas podem ser encontrados nas referências [27], [28] e [29].

Todavia, existe uma função importante, intrínseca à operação de sistemas multiterminais paralelos, que merece ser comentada devido a sua influência na estabilidade e desempenho dinâmico do sistema.

É a função controle de balanço de corrente que, apesar de sua importância no desempenho da interligação, não prescinde ser incluída na modelagem a ser elaborada do sistema MTCC por ser analisado o comportamento do sistema frente apenas a pequenos desvios próximos ao ponto nominal de operação.

Para facilitar o entendimento deste controle adicional, vale observar a figura 5.3.

A característica estática da figura 5.3 retrata a operação do sistema MTCC com referências de corrente diferentes entre as duas estações inversoras. No exemplo, para manter o princípio básico de operação do sistema $\left(\sum I_{ref_R} - \sum I_{ref_I} = \Delta I_d \right)$ a estação responsável pelo controle da tensão, por ter a menor referência, transfere seu modo de operação para

controle de corrente. Ao estabelecer esta situação, o inversor paralelo, o com a maior referência, conseqüentemente sofre sobrecarga equivalente ao valor a margem de corrente.

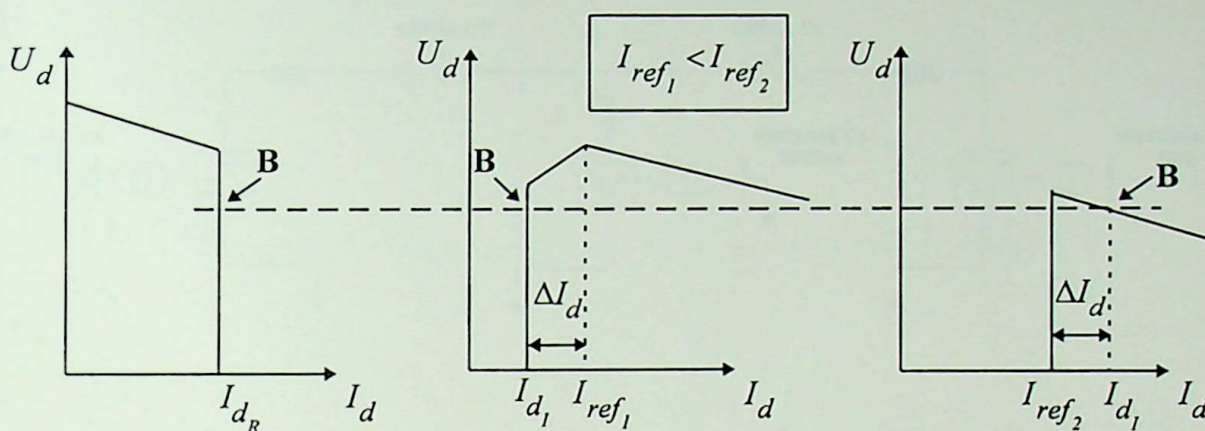


Figura 5.3 - Característica estática do sistema MTCC com referências de correntes diferentes entre inversores.

Ao controle de balanço de corrente é atribuída a responsabilidade de corrigir esta situação de desequilíbrio de correntes entre inversores. Na literatura ([24] a [29]) são propostas várias alternativas de atuação para esta função, contudo, independentemente da filosofia adotada, o produto final será o acréscimo do valor correspondente à margem de corrente ao inversor com referência inferior, de forma a eliminar a sobrecarga do inversor paralelo.

5.4 - Modelo Linear do Sistema MTCC

A configuração básica do sistema de transmissão MTCC Foz-Ibiúna-Rio estabelecida para a avaliação de desempenho dinâmico do modelo linear é ilustrada pela figura 5.4.

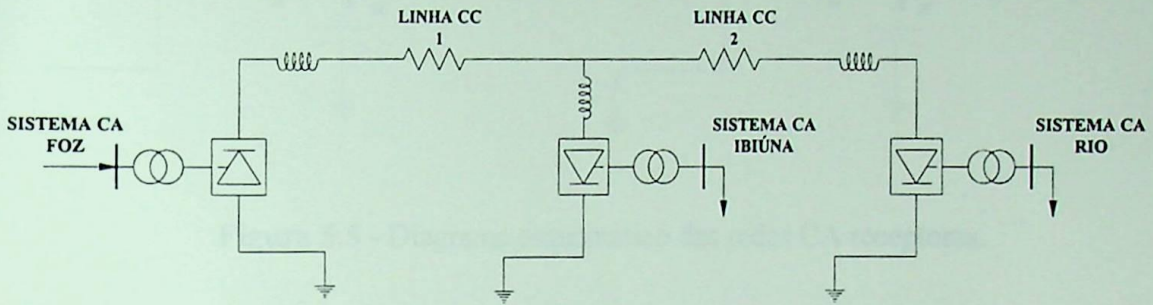


Figura 5.4 - Diagrama esquemático do sistema multiterminal.

O modelo linear da ligação CC entre as estações conversoras de Foz do Iguaçu e Ibiúna já foi desenvolvido e verificado em capítulos anteriores. Porém, com a extensão da linha de corrente contínua e a inclusão da estação inversora da área Rio de Janeiro, esta modelagem sofrerá algumas alterações de acordo com o objetivo principal de análise.

Como várias vezes esclarecido, o enfoque deste trabalho é a estabilização da malha de controle do sistema MTCC, e, portanto, aceitável a premissa que os sistemas receptores CA da ligação multiterminal são eletricamente distantes de modo a não interagirem durante pequenas perturbações em suas redes. Assim sendo, serão caracterizados apenas os fenômenos de interação entre os sistemas de controle.

A figura 5.5 retrata a definição das redes CA receptoras da ligação multiterminal, que daqui por diante terão o índice 'IB' designando as variáveis da estação de Ibiúna e o índice 'RI' as da estação Rio. O índice 'FO' denotará a estação Foz do Iguaçu.

Assim sendo, serão realizadas as seguintes alterações no modelo linear convencional:

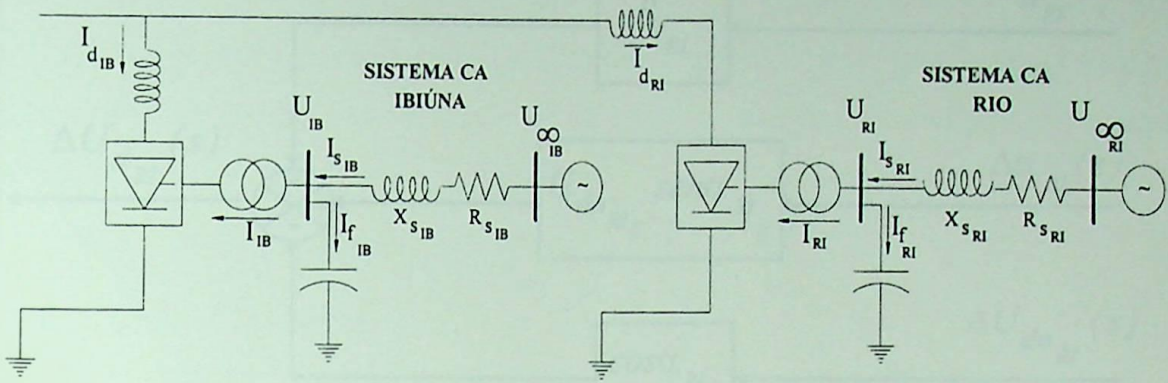


Figura 5.5 - Diagrama esquemático das redes CA receptoras.

5.4.1 - Estação Inversora Rio

A terceira conversora, tanto no sistema real quanto em sua representação, será composta por apenas uma ponte de Graetz de 12 pulsos e tensão contínua de 600 kV. O modelo desta estação também considerará o conjunto transformador conversor, válvula e reator de alisamento, conforme o item 3.2.1.

O modelo linear da ponte conversora da extensão Rio poderá ser definido a partir da representação matemática:

$$U_{d_{RI}} = -U_{do_{RI}} \cos\alpha + R_{c_{RI}} I_{d_{RI}} \quad (55)$$

Após linearizar a expressão (55) através da Série de Taylor, em função das variáveis independentes $U_{do_{RI}}$, α_{RI} e $I_{d_{RI}}$, obtêm-se a equação (56), tornando-se possível, então, construir o diagrama de blocos da figura 5.6.

$$\Delta U_{d_{RI}} = -\cos\alpha_{RI_0} \Delta U_{do_{RI}} + U_{do_{RI_0}} \operatorname{sen}\alpha_{RI_0} \Delta\alpha_{RI} - R_{c_{RI}} \Delta I_{d_{RI}} \quad (56)$$

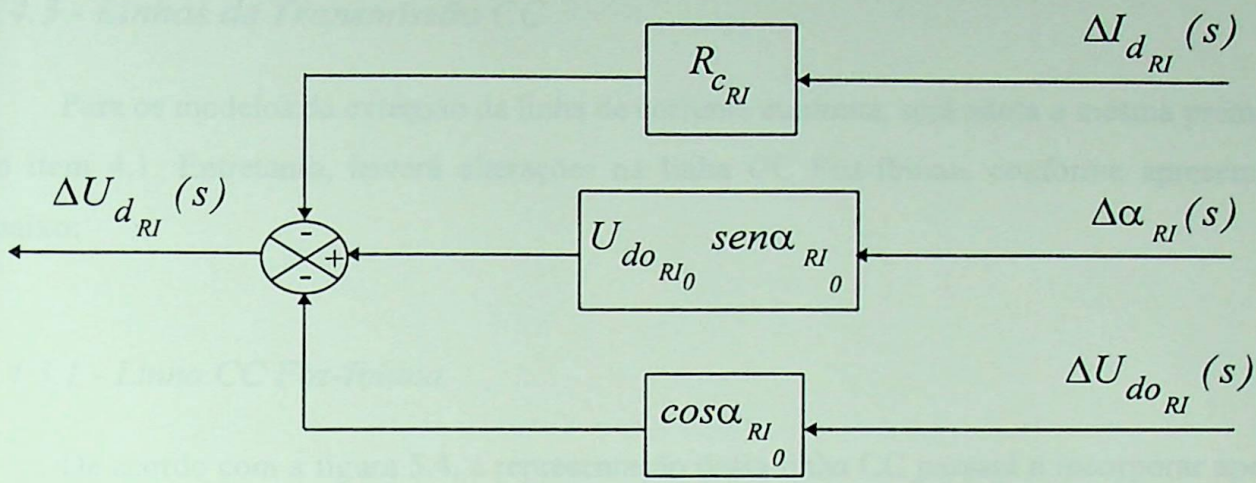


Figura 5.6 - Diagrama de blocos da ponte conversora Rio.

5.4.2 - Controle de Corrente da Inversora Rio

O modelo linear do controle de corrente da inversora Rio terá o mesmo desenvolvimento empregado para a estação retificadora (item 3.2.2.1). A figura 5.7 ilustrada a arquitetura deste controle.

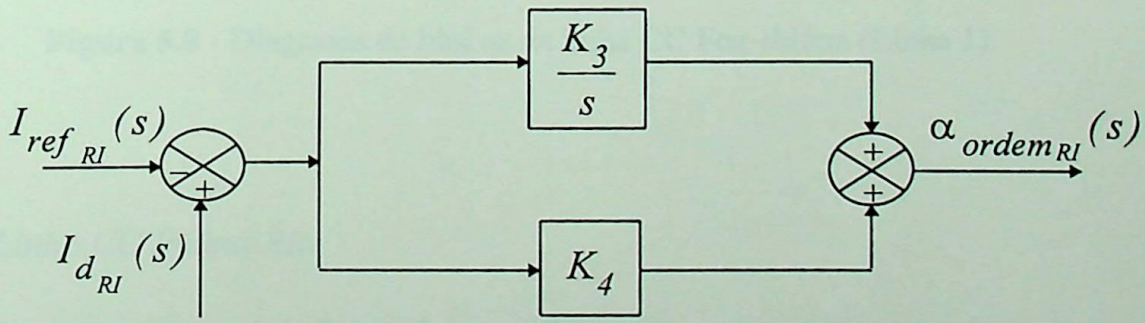


Figura 5.7 - Diagrama de blocos do controle de corrente da conversora Rio.

5.4.3 - Linhas de Transmissão CC

Para os modelos da extensão da linha de corrente contínua, será adota a mesma premissa do item 4.1. Entretanto, haverá alterações na linha CC Foz-Ibiúna, conforme apresentado abaixo:

5.4.3.1 - Linha CC Foz-Ibiúna

De acordo com a figura 5.4, a representação desta linha CC passará a incorporar apenas os seguintes parâmetros:

$$R_1 = r_{cv_{FO}} + r_{a_{FO}} + r_{cc_{FO}} \quad (57)$$

$$L_1 = l_{cv_{FO}} + l_{a_{FO}} + l_{cc_{FO}} \quad (58)$$

E seu diagrama de blocos será o apresentado pela figura 5.8.

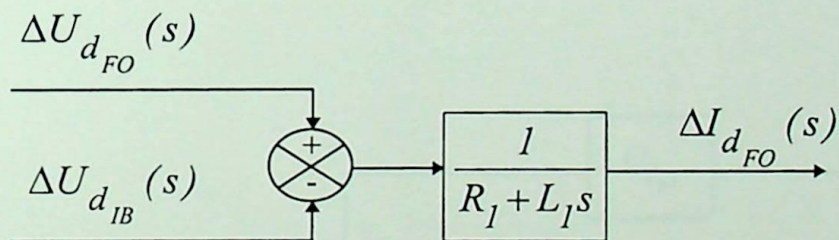


Figura 5.8 - Diagrama de blocos da linha CC Foz-Ibiúna (Linha 1).

5.4.3.2 - Linha CC Ibiúna-Rio

Também, ao observar a figura 5.4, verifica-se que a representação desta linha CC incorporará apenas os seguintes parâmetros:

$$R_2 = r_{cv_{RI}} + r_{a_{RI}} + r_{cc_{RI}} \quad (59)$$

$$L_2 = l_{cv_{RI}} + l_{a_{RI}} + l_{cc_{RI}} \quad (60)$$

E seu diagrama de blocos será o apresentado pela figura 5.9.

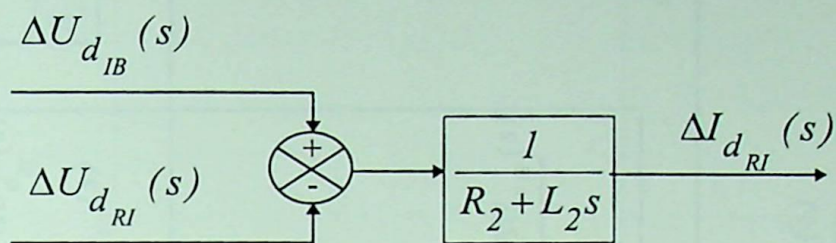


Figura 5.9 - Diagrama de blocos da linha CC Ibiúna-Rio (Linha 2).

5.4.4 - Sistema CA da área Rio

A representação linear do sistema receptor CA da inversora adicional será idêntica àquela desenvolvida para a rede de Ibiúna. Portanto, o diagrama de blocos será o apresentado pela figura pode se reportar à figura 5.10.

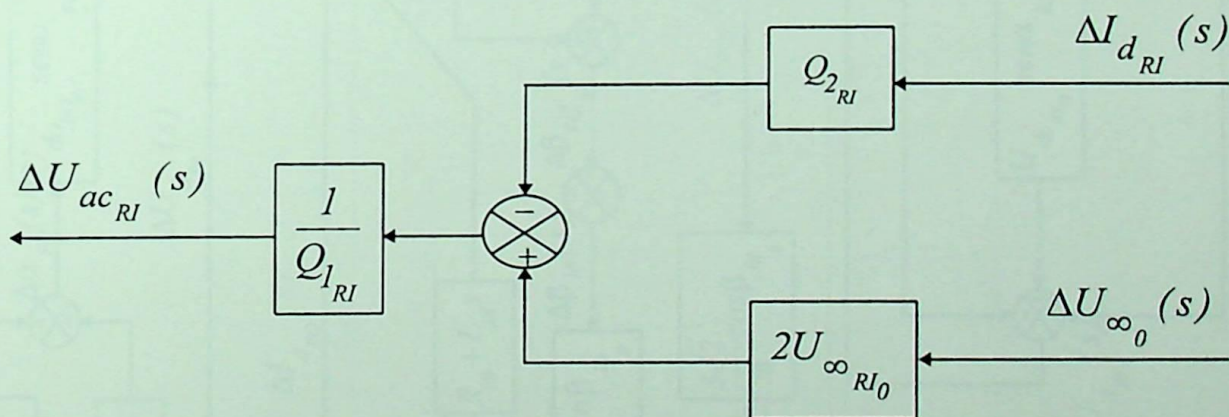


Figura 5.10 - Diagrama de blocos do sistema CA da inversora Rio.

O modelo linear completo do sistema multiterminal Foz-Ibiúna-Rio é apresentado através de diagrama de blocos pela figura 5.11.

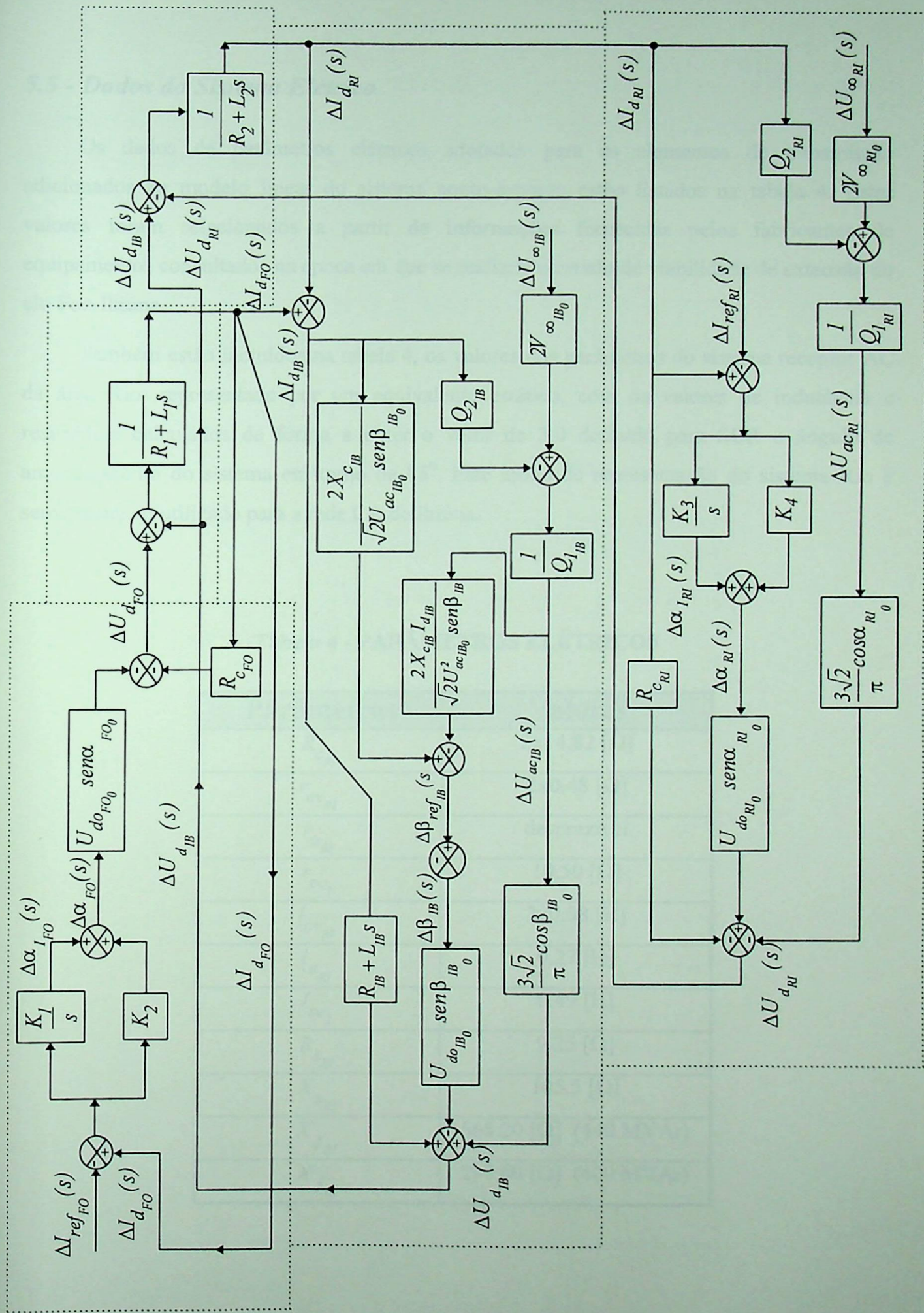


Figura 5.11 - Diagrama de blocos do sistema multiterminal.

5.5 - Dados do Sistema Elétrico

Os dados de parâmetros elétricos adotados para os elementos de transmissão adicionados ao modelo linear do sistema ponto-a-ponto estão listados na tabela 4. Estes valores foram selecionados a partir de informações fornecidas pelos fabricantes de equipamentos consultados na época em que se realizou o estudo de viabilidade de extensão do elo Foz-Ibiúna.

Também estão incluídos na tabela 4, os valores dos parâmetros do sistema receptor AC da área Rio, representado por um equivalente estático, com os valores de indutância e resistência calculados de forma a obter o valor de 3,0 definido para SCR e ângulo de amortecimento do sistema em torno de 85°. Este modo de representação do sistema Rio é semelhante ao utilizado para a rede CA de Ibiúna.

Tabela 4 - PARÂMETROS ELÉTRICOS

Parâmetros	Valores
$R_{c_{RI}}$	2x14.82 [Ω]
$r_{cv_{RI}}$	2x0.48 [Ω]
$r_{a_{RI}}$	desprezível
r_{cc_2}	10.50 [Ω]
$l_{cv_{RI}}$	2x0.08 [H]
$l_{a_{RI}}$	0.27 [H]
l_{cc_2}	0.49 [H]
$R_{s_{RI}}$	9.25 [Ω]
$X_{s_{RI}}$	105.5 [Ω]
$X_{f_{RI}}$	568.20 [Ω] (440 MVar)
$X_{f_{IB}}$	297.60 [Ω] (400 MVar)

As condições iniciais de regime permanente nominal, necessárias para as simulações de desempenho dinâmico dos sistemas CA e CC, foram obtidas a partir do programa digital de fluxo de potência ANAREDE, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, que inclui modelos de sistemas CC multiterminais.

Os arquivos de dados de entrada e resultados do fluxo de carga da operação em regime normal do sistema MTCC compõem o Apêndice B, e a tabela 5 apresenta os valores das condições operativas nominais dos sistemas CA/CC de um pólo da interligação Foz-Ibiúna-Rio.

Tabela 5 - CONDIÇÕES INICIAIS

Parâmetros	Valores
$U_{do_{FO0}}$	4x172.0 kV
α_{FO0}	15.0°
$I_{d_{FO0}}$	2.61 kA
$U_{do_{IB0}}$	4x164.7 kV
β_{IB0}	30.0°
$I_{d_{IB0}}$	1.305 kA
$\cos\phi_{IB0}$	0.91
$U_{ac_{IB0}}$	122.0 kV
$U_{\infty_{IB0}}$	340.2 kV
$U_{do_{RI0}}$	2x322.0 kV
α_{RI0}	143.8°
$I_{d_{RI0}}$	1.305 kA
$\cos\phi_{RI0}$	0.87
$U_{ac_{RI0}}$	238.5 kV
$U_{\infty_{RI0}}$	504.5 kV



Capítulo 6

Ajuste dos Parâmetros de Controle da Estação Conversora Rio

6.1 - Diretrizes

Desenvolvido o modelo linear do sistema de transmissão multiterminal Foz-Ibiúna-Rio, definido o modo de controle da terceira estação conversora e estabelecidas as condições nominais de operação do sistema em regime permanente, os passos subsequentes são o ajuste dos parâmetros variáveis do novo controlador Proporcional-Integral (PI) e as simulações de resposta a degrau para análise de desempenho do sistema.

O emprego de controladores PI nos sistemas de controle de corrente constante é prática bem estabelecida, uma vez que apresenta a propriedade de eliminar o erro em regime permanente que porventura exista. Entretanto, lembra-se que o efeito integral geralmente deteriora o comportamento transitório, em relação ao que é obtido com controle proporcional puro.

Para a realização das duas etapas seguintes serão adotados o procedimento sistemático para introdução e ajuste de controladores proporcional-integral proposto nas referências [35] e [36] e os algoritmos computacionais baseados na teoria do Lugar das Raízes (LR) apresentado na referência [33].

A forma alternativa de estabilização e ajuste de sistemas de controle lineares, oferecida pelo primeiro trabalho acima referenciado, permitirá maximizar a eficiência do uso do controlador PI, e a utilização dos algoritmos computacionais do LR proporcionará grande facilidade para a seleção dos valores de parâmetros que mais convenham para o ajuste da malha de controle da estação Rio.

Antes, porém, de iniciar os procedimentos de ajuste e análise do sistema de controle, é necessário o estabelecimento do diagrama de blocos ilustrando as interconexões dos subsistemas, e da matriz de funções de transferência relacionando diretamente as saídas com as entradas, ambos do sistema de corrente contínua a três terminais. Estes tópicos são, então, abordados nos próximos itens.

6.2 - Diagrama de Blocos do Sistema Multiterminal

Afim de facilitar a interpretação e o reconhecimento dos subsistemas físicos que constituem o sistema MTCC, o diagrama de blocos detalhado da figura 5.11 sofreu modificações e simplificações, chegando-se à forma final ilustrada pela figura 6.1, a qual foi gerada pela rotina gráfica SIMULINK do programa MATLAB.

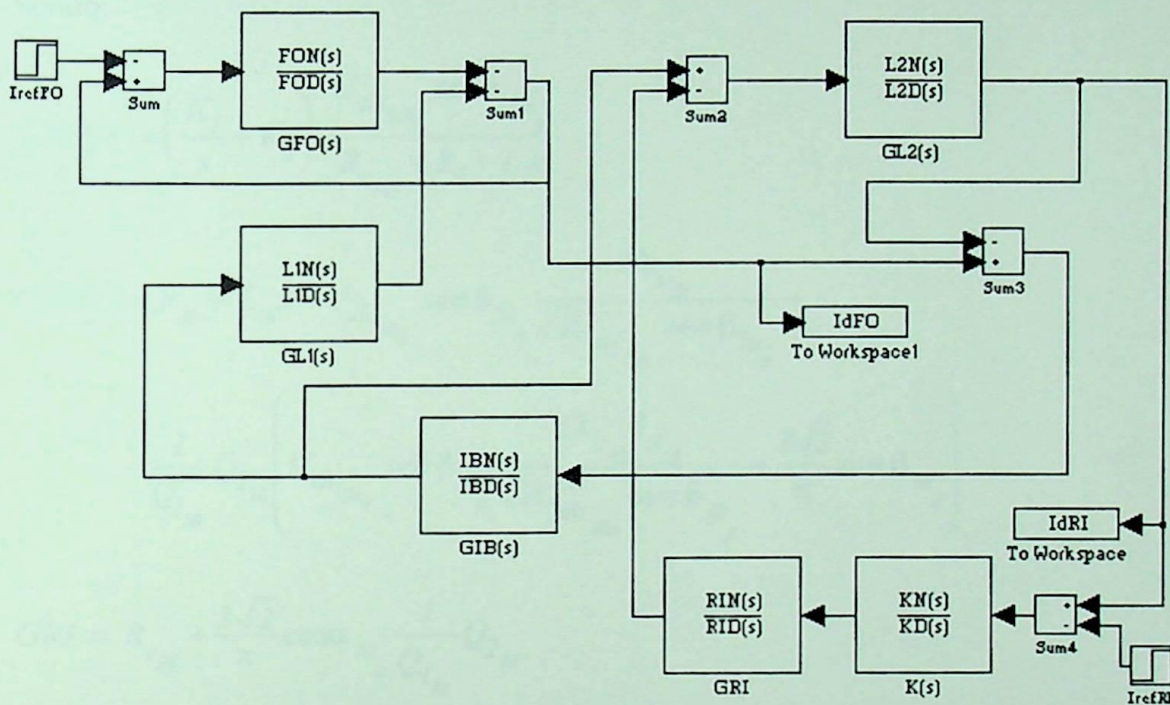


Figura 6.1 - Diagrama de blocos do sistema multiterminal.

As funções de transferências indicadas na figura 6.1, editadas por relações polinomiais, possuem os seguintes significados:

$$\frac{FON(s)}{FOD(s)} = GFO(s) = \text{função de transferência da estação retificadora Foz do Iguaçu}$$

$$\frac{IBN(s)}{IBD(s)} = GIB(s) = \text{função de transferência da estação inversora Ibiúna};$$

$$\frac{RIN(s)}{RID(s)} = GRI = \text{função de transferência da estação inversora Rio de Janeiro};$$

$\frac{L1N(s)}{L1D(s)} = GL1(s) = \text{funç \~{a}o de transfer\~{e}ncia da linha de corrente de cont\~{i}nua Foz - Ibiú na}$

$\frac{L2N(s)}{L2D(s)} = GL2(s) = \text{funç \~{a}o de transfer\~{e}ncia da linha de corrente de cont\~{i}nua Ibiú na- Rio;}$

$\frac{KN(s)}{KD(s)} = K(s) = \text{funç \~{a}o de transfer\~{e}ncia do controle de corrente da estaç \~{a}o Rio.}$

Sendo:

$$GFO(s) = \left(\frac{K_1}{s} + K_2 \right) \frac{U_{do_{FO_0}} \text{sen} \alpha_{FO_0}}{R_{c_{FO}} + R_1 + L_1 s}$$

$$GIB(s) = R_{IB} + L_{IB} s - U_{do_{IB_0}} \text{sen} \beta_{IB_0} \frac{2X_{c_{IB}}}{\sqrt{2} U_{ac_{IB_0}} \text{sen} \beta_{IB_0}} -$$

$$- \frac{1}{Q_{1_{IB}}} Q_{2_{IB}} \left(U_{do_{IB_0}} \text{sen} \beta_{IB_0} \frac{2X_{c_{IB}} I_{d_{IB}}}{\sqrt{2} U_{ac_{IB_0}}^2 \text{sen} \beta_{IB_0}} + \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \text{sen} \beta_{IB_0} \right)$$

$$GRI = R_{c_{RI}} + \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \text{cos} \alpha_{RI} \frac{1}{Q_{1_{RI}}} Q_{2_{RI}}$$

$$GL1(s) = \frac{1}{R_1 + L_1 s}$$

$$GL2(s) = \frac{1}{R_2 + L_2 s}$$

$$K(s) = \left(\frac{K_3}{s} + K_4 \right) U_{do_{IB_0}} \text{sen} \alpha_{IB_0}$$

6.3 - Equação Matricial de Entrada-Saída do Sistema Multiterminal

A descrição de um sistema através da relação entre suas variáveis de excitação e saída é um alternativa de modelo bastante importante para a análise de estabilidade e de outras características dinâmicas.

A partir do diagrama de blocos da figura 6.1, e manipulando as relações dos subsistemas da ligação MTCC, foi possível elaborar a equação matricial de entrada-saída do sistema, ilustrada pela figura 6.2.

$$\begin{bmatrix} I_{d_{FO}}(s) \\ I_{d_{RI}}(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{GM(s)} \begin{bmatrix} GM_{11}(s) & GM_{12}(s) \\ GM_{21}(s) & GM_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ref_{FO}}(s) \\ I_{ref_{RI}}(s) \end{bmatrix} \quad (61)$$

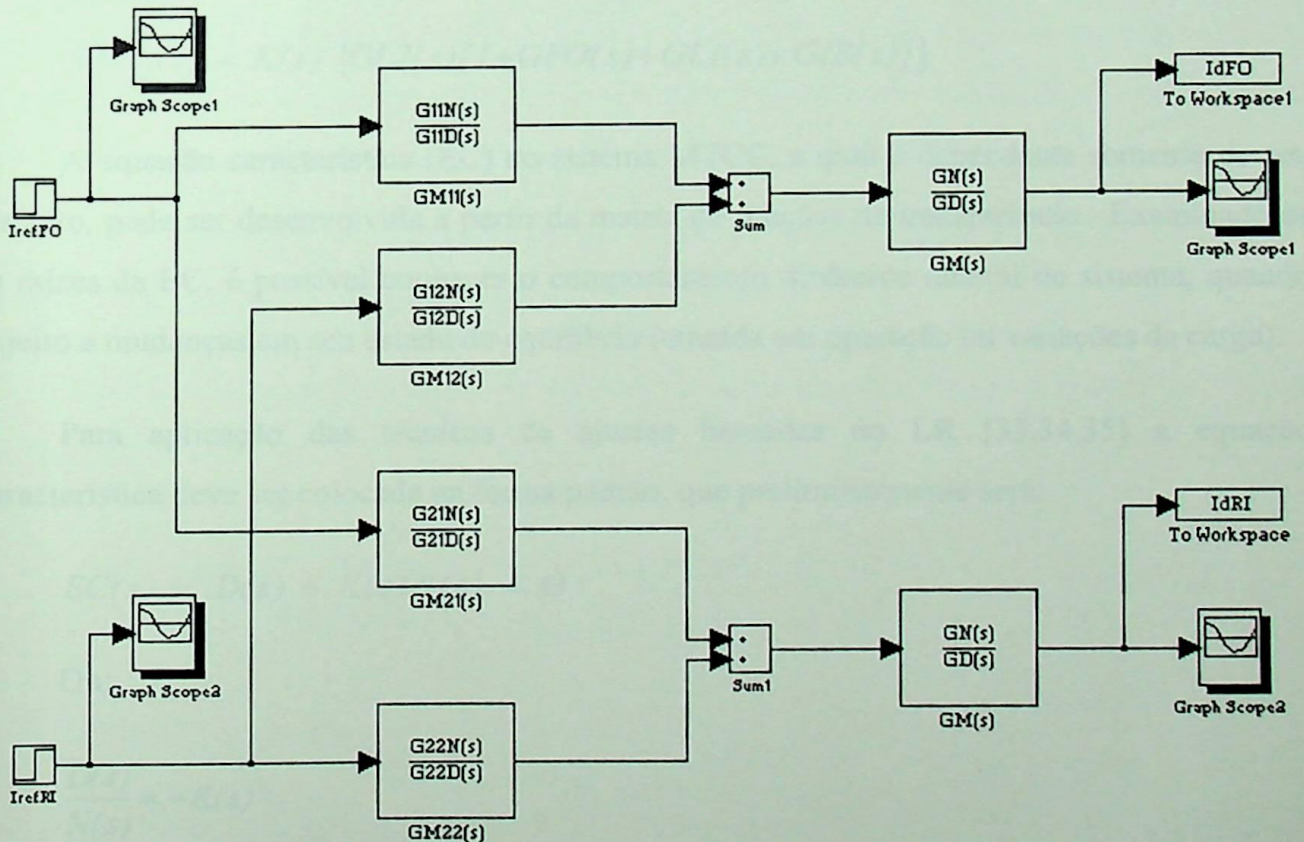


Figura 6.2 - Diagrama de blocos das entradas e saídas do sistema multiterminal.

Da equação de entrada-saída (61) é obtida a matriz de funções de transferência (MFT) do sistema a três terminais.

$$MFT(s) = \frac{1}{GM(s)} \begin{bmatrix} GM_{11}(s) & GM_{12}(s) \\ GM_{21}(s) & GM_{22}(s) \end{bmatrix}$$

Onde:

$$GM(s) = 1 + GFO(s) + GL1(s) \times GIB(s) + \\ + GL2(s) \{GRI(s) [1 + GFO(s)] + GIB(s) [1 + GFO(s) + GL1(s) \times GRI(s)]\} + \\ + K(s) \{GL2(s) [1 + GFO(s) + GL1(s) \times GIB(s)]\}$$

$$GM_{11}(s) = [1 + GL2(s) \times GRI(s) + GL2(s) \times GIB(s) + K(s) \times GL2(s)] GFO(s)$$

$$GM_{12}(s) = K(s) \times GL1(s) \times GL2(s) \times GIB(s)$$

$$GM_{21}(s) = GL2(s) \times GIB(s) \times GFO(s)$$

$$GM_{22}(s) = K(s) \{GL2(s) [1 + GFO(s) + GL1(s) \times GIB(s)]\}$$

A equação característica (EC) do sistema MTCC, a qual é dependente somente de seu circuito, pode ser desenvolvida a partir da matriz de funções de transferência. Examinado-se as raízes da EC, é possível conhecer o comportamento dinâmico natural do sistema, quando sujeito a mudanças em seu estado de equilíbrio (entrada em operação ou variações de carga).

Para aplicação das técnicas de ajustes baseadas no LR [33,34,35] a equação característica deve ser colocada na forma padrão, que preliminarmente será:

$$EC(s) = D(s) + K(s)N(s) = 0$$

Ou:

$$\frac{D(s)}{N(s)} = -K(s)$$

Sendo:

$$\begin{aligned}
D(s) = & FOD(s) \times IBD(s) \times RID(s) \times L1D(s) \times L2D(s) + \\
& + FON(s) \times IBD(s) \times RID(s) \times L1D(s) \times L2D(s) + \\
& + FOD(s) \times IBN(s) \times RID(s) \times L1N(s) \times L2D(s) + \\
& + L2N(s) \left\{ \begin{array}{l} RIN(s) [FOD(s) \times IBD(s) \times L1D(s) + FON(s) \times IBD(s) \times L1D(s)] + \\ IBD(s) [FOD(s) \times RID(s) \times L1D(s) + FON(s) \times RID(s) \times L1D(s)] + \\ + FOD(s) \times RIN(s) \times LIN(s) \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

$$K(s)N(s) = \frac{KN(s)}{KD(s)} \times L2N(s) \left[\begin{array}{l} FOD \times IBD(s) \times RID(s) \times L1D(s) + \\ FON(s) \times IBD(s) \times RID(s) \times L1D(s) + \\ FOD \times IBN \times RID \times LIN \end{array} \right]$$

No processo de ajuste dos parâmetros variáveis do controlador PI da estação Rio aplicando a técnica alternativa da referência [35], é interessante manter a função de transferência $K(s)$ explicitada, pois o ajuste será realizado em duas etapas distintas. Na primeira se substituirá o controlador PI por um proporcional puro e se ajustará o ganho K_4 , e na segunda etapa se somará o ramo integral e se definirá o ganho K_3 .

Para melhor compreensão dos passos a serem tomados, a figura 6.3 ilustra o diagrama de blocos particularizado da função $K(s)$.

Portanto, ao explicitar $K(s)$ e colocar a equação característica básica na forma polinomial, têm-se:

$$K(s) = \frac{2,0451s^4 + 180,08s^3 - 486,33s^2 - 296390s - 5246400}{1,6912s^3 + 179,78s^2 + 7265,7s + 102630} \quad (62)$$

Sendo $K(s)$ expressa por:

$$K(s) = \left(\frac{K_3}{s} + K_4 \right) U_{do_{IB_0}} \operatorname{sen} \alpha_{IB_0} \quad (63)$$

6.4 - Ajuste dos Parâmetros de Controle

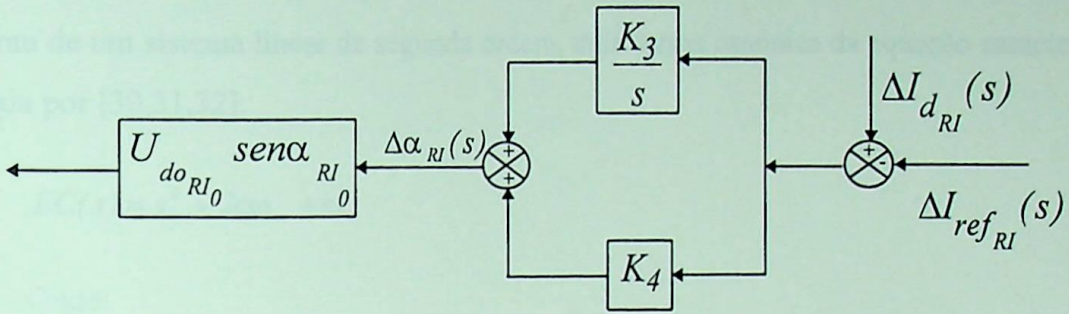


Figura 6.3 - Diagrama de blocos do subsistema $K(s)$.

6.4 - Ajuste dos Parâmetros de Controle

Antes de iniciar o procedimento de ajuste, vale rever as características de resposta a degrau de um sistema linear de segunda ordem, cuja forma canônica da equação característica é dada por [30,31,32]:

$$EC(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$$

Onde:

s = variável complexa $\sigma + j\omega$;

ζ = relação de amortecimento;

ω_n = frequência natural não-amortecida.

Normalmente se permite que o sistema apresente um desempenho ligeiramente oscilatório, o que implica ajustar os parâmetros variáveis do sistema de modo que $0 < \zeta < 1$ [30,31,32]:

Para esta situação as raízes da EC são da forma:

$$s_1 = -\zeta\omega_n + j\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n = -\zeta\omega_n + j\omega_d = \omega_n \angle 180^\circ - \eta$$

$$s_2 = s_1^*$$

Sendo ζ a relação de amortecimento do par de raízes e ω_d a frequência natural amortecida do sistema.

Para a resposta a degrau, são usualmente considerados os seguintes índices de desempenho transitórios para os sistemas lineares de 2ª ordem [33]:

◆ Tempo de Subida ('rise time') (t_r):

$$t_\alpha = \min \left\{ t_a \mid \frac{y(t_a)}{y(\infty)} = \alpha \right\}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (t_r = t_{0,9})$$

Significa o tempo necessário para que a resposta $y(t)$ atinja 90% do valor final pela primeira vez.

- ◆ Tempo de Pico (t_p):

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}$$

- ◆ Ultrapassagem Máxima ('overshoot') (M_o):

$$M_o = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$$

- ◆ Tempo de Acomodação (t_s):

$$t_s = \min \left\{ t_b \mid \left| \frac{y(t)}{y(\infty)} - 1 \right| \leq \varepsilon, \forall t \geq t_b \right\}$$

Normalmente faz-se $\varepsilon = 0,02$ (2%) ou $\varepsilon = 0,05$ (5%).

- ◆ Período de Oscilação (T_{osc}):

$$T_d = \min \left\{ T \mid y(t_0 + T) = y(t_0), \frac{y(t_0 + T)}{y(\infty)} > 0 \right\}$$

6.4.1 - Controle Proporcional Puro:

Quando o controlador for proporcional puro tem-se $K_3 = 0 \text{ rad/kA}$ e a função de transferência $K(s)$ se tornará, de acordo com o diagrama de blocos da figura 6.2 e com a equação (63), o parâmetro variável:

$$K = U_{do_{R10}} \operatorname{sen} \alpha_{R10} K_4 = 380,35 K_4 \quad (64)$$

Substituindo a expressão (64) em (62), os coeficientes da equação característica para o controlador proporcional, calculados através da rotina 'blocopr' implantada no MATLAB, serão:

» blocopr

DS =

2.0451e+000 1.8008e+002 -4.8633e+002 -2.9639e+005 -5.2464e+006

NS =

6.4325e+002 6.8380e+004 2.7635e+006 3.9034e+007

Ou seja, EC será:

$$-K_4 = \frac{2,0451s^4 + 180,08s^3 - 486,33s^2 - 296390s - 5246400}{643,25s^3 + 68380s^2 + 2763500s + 39034000} = \frac{D(s)}{N(s)} \quad (65)$$

As raízes da equação D(s) são os zeros e as raízes da equação N(s) são os pólos da relação polinomial [30,31,32]. Utilizando o programa MATLAB, foram obtidos os seguintes zeros e pólos:

» roots (NS)

ans =

-37.7636 +23.3587i

-37.7636 -23.3587i

-30.7768

» roots (DS)

ans =

-68.7382

41.0226

-30.7768

-29.5598

Conhecidos os pólos e zeros da relação polinomial, é possível traçar o lugar geométrico das raízes da equação característica do sistema com controlador proporcional puro, o qual é apresentado na figura 6.4:

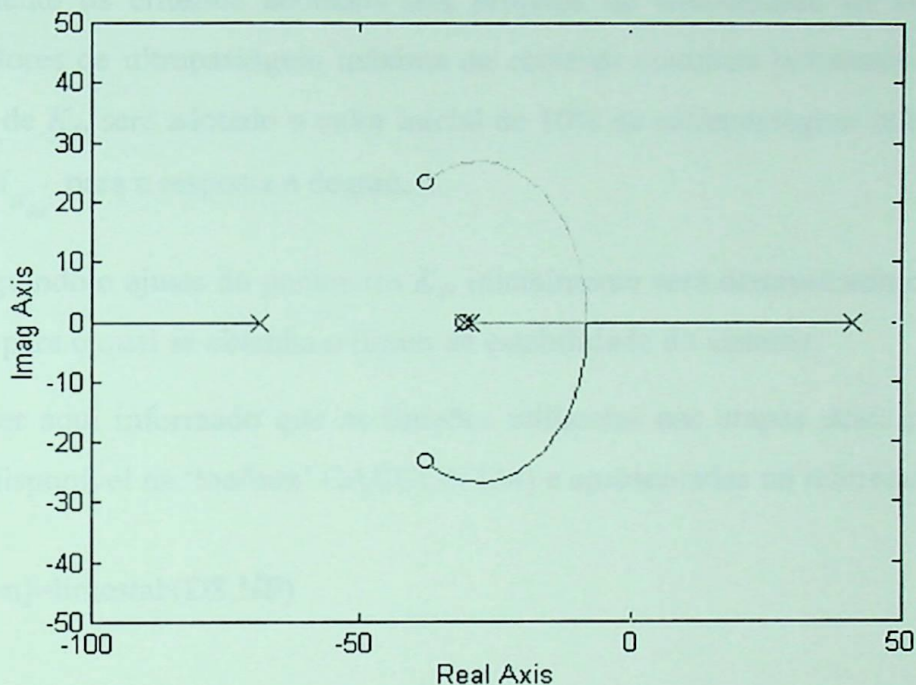


Figura 6.4 - Lugar das raízes do sistema MTCC com controle proporcional puro.

O lugar das raízes (LR), ferramenta bastante utilizada para análise e controle de parâmetros de sistemas de controle lineares [30,31], permite avaliar o efeito da variação de parâmetros do sistema sobre sua estabilidade e comportamento dinâmico.

A análise do LR possibilita visualizar as faixas de valores de um parâmetro variável, com todos os demais fixos, para a qual o sistema é estável.

Ao observar o lugar das raízes do sistema MTCC com controlador proporcional puro na estação Rio, verifica-se o cancelamento de um polo com um zero da relação polinomial. Este fato é resultado do procedimento utilizado na álgebra de blocos para a obtenção da equação característica do sistema, o qual acarretou um aumento artificial na ordem da equação característica.

Para o ajuste eficiente do controlador proporcional, conforme orientação da referência [35], o ganho K_r deve promover uma ultrapassagem máxima (M_o) da corrente contínua da linha Ibiúna-Rio inferior a desejada.

O motivo dessa condição é que a adição do integrador causará a deterioração do comportamento transitório do sistema, podendo inclusive, se ajustado de maneira descuidada, provocar instabilidade.

Atualmente os critérios adotados nos projetos de transmissão de corrente contínua estipulam valores de ultrapassagem máxima de corrente contínua inferiores a 30 %. Então, para o ajuste de K_f , será adotado o valor inicial de 10% de ultrapassagem máxima da variável controlada $\Delta I_{d_{RI}}$ para a resposta a degrau.

Prosseguindo o ajuste do parâmetro K_f , inicialmente será determinado o valor do ganho proporcional para o qual se obtenha o limite de estabilidade do sistema.

Deve ser aqui informado que as funções utilizadas nas etapas deste procedimento de ajuste estão disponível na 'toolbox' CACCON [34] e apresentadas na referência [33].

» [k4,wn]=limestab(DS,NS)

k4 =

0.1344

wn =

0

Do resultado acima e da inspeção do LR conclui-se que K_f deve ser superior a $0,1344 \text{ rad/kA}$ para assegurar que todas as raízes da EC tenham partes reais negativas e, conseqüentemente, a estabilidade do sistema.

Em seguida se calculará, através da equação (66), o valor do parâmetro K_f de modo a obter um par de raízes da EC com relação de amortecimento (ζ) especificada para o 'overshoot' de 10%.

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + [\pi / \ln(M_o)]^2}} \quad (66)$$

Logo:

» zetapr=zetafmo(10)

zetapr =

0.5912

Baseada nas equações (65) e (66), a função 'kzeta' calculará o valor de K_4 para a relação de amortecimento especificada de $\zeta = 0.5912$:

» [k4,wn]=kzeta(DS,NS,zetapr)

k4 =

0.2434 0.1957

wn =

25.5363 19.9789

Como é indicado obter valores elevados de ω_n , por significar velocidades de resposta maiores, será assumido $K_4=0.2434 \text{ rad/kA}$. Com este valor de ganho proporcional, obtêm-se a resposta mostrada na figura 6.5 para um degrau de +5 % (em $t=0.1 \text{ s}$) na referência de corrente do controlador da estação Rio, o qual corresponde a um acréscimo de $\Delta I_{ref} = 0.065 \text{ kA}$.

A partir da simulação de resposta a degrau, a real ultrapassagem relativa máxima (M_o) da variável controlada ($\Delta I_{d_{RI}}$) da estação Rio deve ser calculada. Como o valor de ultrapassagem máxima também pode ser definido como:

$$M_o = \frac{\Delta I_{d_{RI}}(t_p)}{\Delta I_{d_{RI}}(\infty)}$$

onde:

$\Delta I_{d_{RI}}(\infty)$ = valor de regime permanente de $\Delta I_{d_{RI}}(t)$.

Este deve, então, ser determinado, empregando para tal, o teorema do valor final da transformada de Laplace (expressão (67)) [30,31,32]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta I_{d_{RI}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta I_{d_{RI}}(s) \quad (67)$$

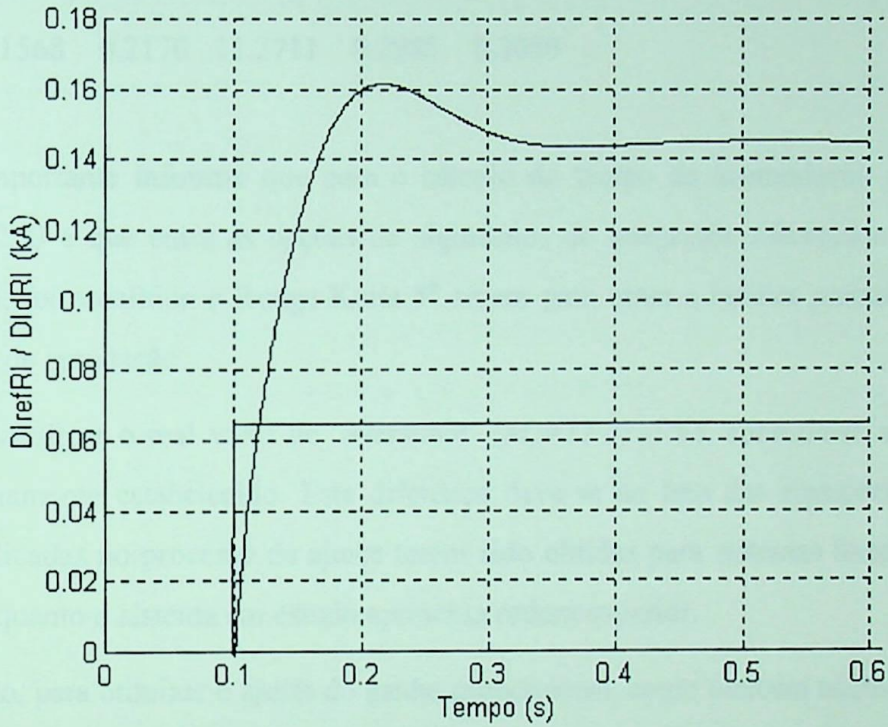


Figura 6.5 - Resposta de $\Delta I_{d_{RI}}$ a degrau de +5% em $\Delta I_{ref_{RI}}$ ($K_4=0.2434$).

Para o cálculo do valor final de $\Delta I_{d_{RI}}(\infty)$ e do erro de regime permanente (e_{rp}) da variável $\Delta I_{d_{RI}}(t)$, foi desenvolvida a função 'regperpr' no programa MATLAB, cujo arquivo está apresentado no Apêndice C juntamente com os arquivos de rotinas de cálculo dos parâmetros da matriz de função de transferência, também desenvolvidas no MATLAB.

» regperpr

IdRIrp =

0.1452

eIdRIrp =

-0.0802

Após conhecido o valor de regime permanente de $\Delta I_{d_{RI}}(\infty)$, emprega-se a função “caracrd” para cálculo dos cinco índices de desempenho ($desemp = [tr \ tp \ Mo \ ts \ Tosc]$):

» $desemp = caracrd(t, IdRI, IdRIrp, eps)$

$desemp =$

0.1568 0.2170 11.2711 0.2985 0.3050

É importante informar que para o cálculo do tempo de acomodação (t_s) foi adotado $\varepsilon = 0.02$ (2%) e que entre as opções de algoritmos de integração oferecidos pelo programa MATLAB, foi escolhido o Runge-Kutta 5ª ordem para obter a melhor precisão possível dos resultados de simulação.

Ao verificar o real valor de ‘overshoot’ ($M_o = 11.2711\%$), constata-se ser superior aos 10% previamente estabelecido. Esta diferença deve-se ao fato das equações de resposta a degrau aplicadas no processo de ajuste terem sido obtidas para sistemas lineares de segunda ordem, enquanto o sistema em estudo apresenta ordem superior.

Então, para otimizar o ajuste do ganho proporcional, como também adquirir sensibilidade sobre a influência deste parâmetro no sistema, será feita uma pesquisa de valores de K_4 para os quais serão observados os valores de tempo de pico, ‘overshoot’, tempo de acomodação e erro de regime permanente da variável controlada $\Delta I_{d_{RI}}$ para a resposta a degrau. A faixa de variação do ganho abrangerá [0.14; 1.5] rad/kA.

Para essa verificação simultânea de índices de desempenho em função da variação dos valores de K_4 foi elaborado um processo iterativo no programa MATLAB denominado ‘indicepr’, cujo o arquivo também se encontra no Apêndice C.

A figura 6.6 apresenta, nesta ordem, os gráficos que relacionam os quatro índices de desempenho transitório do sistema em função dos valores de ganho proporcional: $K_4 \times t_p$; $K_4 \times M_o$; $K_4 \times t_s$ e $K_4 \times e_{rp}$. Em seguida, a tabela 6 apresenta seus respectivos valores, obtidos da simulação, para avaliação de resultados.

Antes, porém, da análise de resultados, verificou-se que a diferença entre o número de pólos e zeros da relação polinomial é igual à 1, o que, também de acordo com a estrutura do LR, traduz que o aumento de K_4 conduz os pólos do sistema a se aproximarem dos zeros ou se tornarem reais negativos. Isto significa dizer que o crescimento do valor do ganho proporcional é acompanhado da redução dos valores de tempo de pico, 'overshoot', tempo de acomodação e erro de regime permanente da variável controlada $\Delta I_{d_{RI}}$.

Ao analisar os resultados matemáticos obtidos da simulação, são, então, verificadas as proposições acima, concluindo-se, portanto, que o valor limite do ganho proporcional será o próprio limite físico do controlador. Por essa razão, a escolha do valor adequado de K_4 baseou-se no valor a partir do qual não há sensibilidade de desempenho a variações de ganho e, também, nos valores usualmente adotados na prática. Por estes critérios, o valor do ganho proporcional que se mostra mais indicado é $K_4 = 0.7 \text{ rad/kA}$.

O gráfico da figura 6.7 ilustra a resposta da variável $\Delta I_{d_{RI}}$ a degrau de +5% (em $t=0 \text{ s}$) na referência do controle de corrente da inversora Rio com o parâmetro K_4 ajustado com o valor de 0.7 rad/kA .

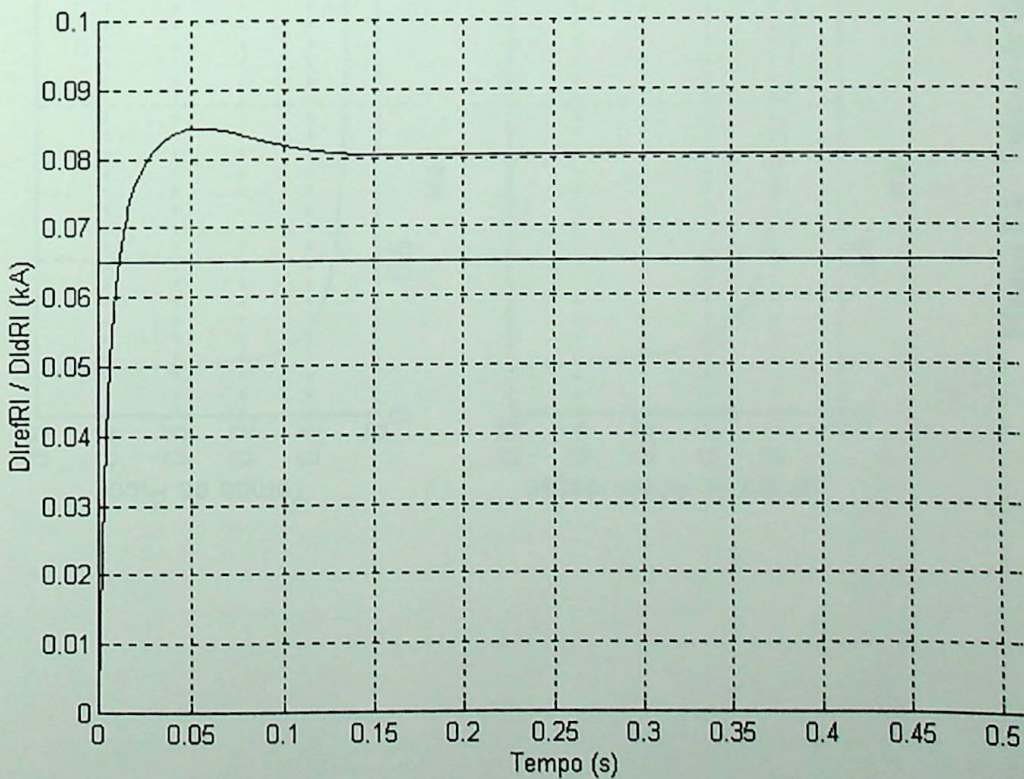


Figura 6.7 - Resposta de $\Delta I_{d_{RI}}$ a degrau de +5% em $\Delta I_{ref_{RI}}$ ($K_4=0.7$).

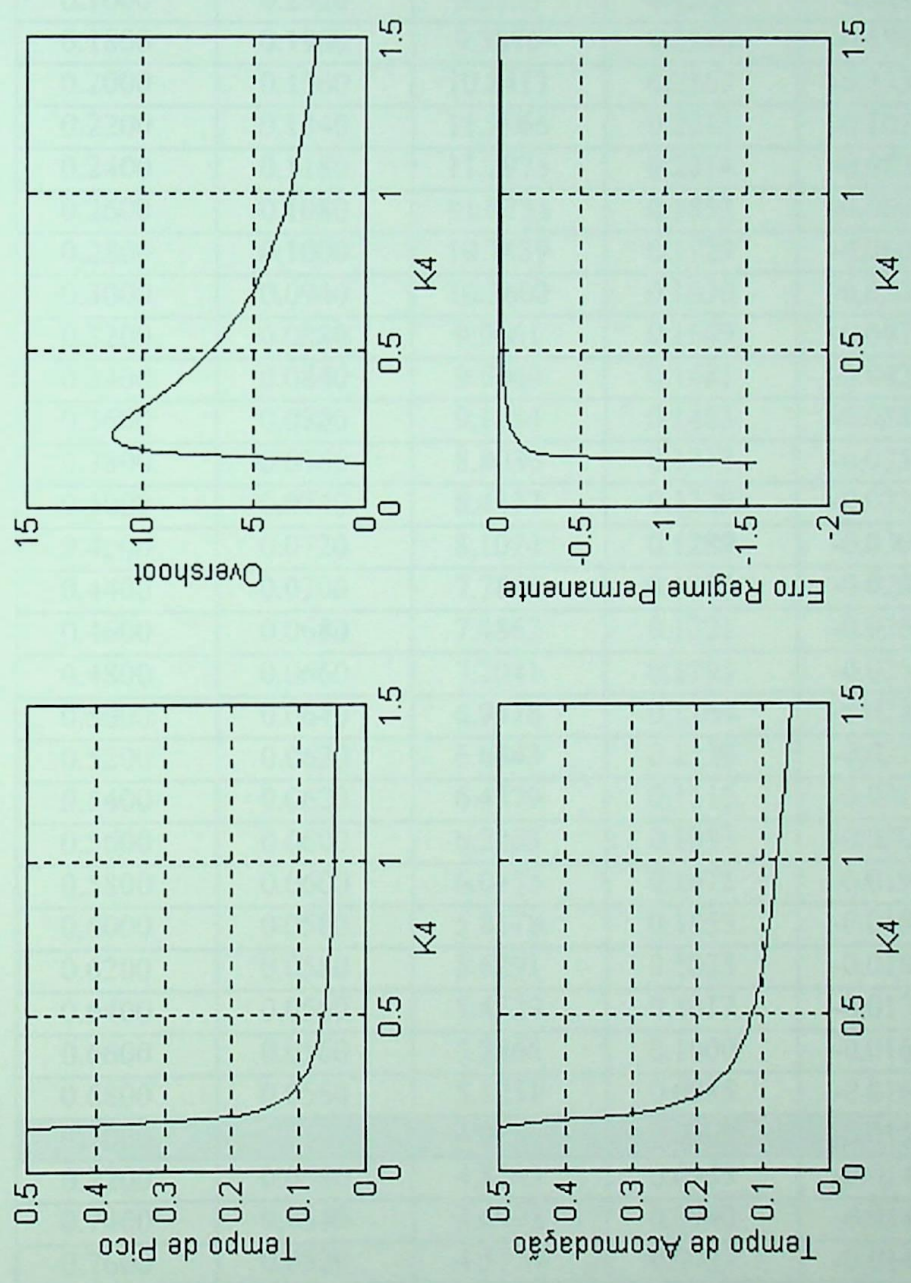


Figura 6.6 - Índices de desempenho em função do ganho proporcional.

**Tabela 6 - VALORES DE ÍNDICES DE DESEMPENHO
PARA CONTROLE PROPORCIONAL PURO**

$K_4(\text{rad/kA})$	$t_p(\text{s})$	$M_o(\%)$	$t_s(\text{s})$	$e_{rp}(\text{kA})$
0.1400	0.5000	0	0.5000	-1.587
0.1600	0.2920	5.5155	0.4224	-0.3413
0.1800	0.1960	9.3870	0.3110	-0.1916
0.2000	0.1560	10.8413	0.2563	-0.1332
0.2200	0.1340	11.2966	0.2235	-0.1021
0.2400	0.1180	11.2973	0.2014	-0.0827
0.2600	0.1080	11.0753	0.1853	-0.0696
0.2800	0.1000	10.7439	0.1729	-0.0600
0.3000	0.0940	10.3602	0.1630	-0.0528
0.3200	0.0880	9.9661	0.1549	-0.0471
0.3400	0.0840	9.5660	0.1481	-0.0425
0.3600	0.0800	9.1784	0.1423	-0.0387
0.3800	0.0760	8.8036	0.1373	-0.0356
0.4000	0.0740	8.4477	0.1329	-0.0329
0.4200	0.0720	8.1074	0.1289	-0.0306
0.4400	0.0700	7.7868	0.1253	-0.0286
0.4600	0.0680	7.4862	0.1221	-0.0268
0.4800	0.0660	7.2041	0.1191	-0.0253
0.5000	0.0640	6.9378	0.1164	-0.0239
0.5200	0.0620	6.6843	0.1139	-0.0227
0.5400	0.0620	6.4479	0.1115	-0.0215
0.5600	0.0600	6.2263	0.1093	-0.0205
0.5800	0.0600	6.0135	0.1073	-0.0196
0.6000	0.0580	5.8178	0.1053	-0.0188
0.6200	0.0580	5.6291	0.1035	-0.0180
0.6400	0.0560	5.4529	0.1017	-0.0173
0.6600	0.0560	5.2866	0.1000	-0.0166
0.6800	0.0560	5.1251	0.0985	-0.0160
0.7000	0.0540	4.9780	0.0969	-0.0154
0.7200	0.0540	4.8363	0.0955	-0.0149
0.7400	0.0540	4.6992	0.0940	-0.0144
0.7600	0.0520	4.5714	0.0927	-0.0140
0.7800	0.0520	4.4512	0.0913	-0.0135
0.8000	0.0520	4.3349	0.0901	-0.0131
0.8200	0.0520	4.2228	0.0888	-0.0127
0.8400	0.0500	4.1166	0.0876	-0.0124
0.8600	0.0500	4.0179	0.0864	-0.0120
0.8800	0.0500	3.9225	0.0853	-0.0117
0.9000	0.0500	3.8304	0.0842	-0.0114
0.9200	0.0500	3.7416	0.0831	-0.0111

0.9400	0.0500	3.6560	0.0820	-0.0108
0.9600	0.0480	3.5760	0.0810	-0.0106
0.9800	0.0480	3.4999	0.0800	-0.0103
1.0000	0.0480	3.4263	0.0790	-0.0101
1.0200	0.0480	3.3552	0.0780	-0.0099
1.0400	0.0480	3.2865	0.0770	-0.0096
1.0600	0.0480	3.2201	0.0760	-0.0094
1.0800	0.0480	3.1560	0.0751	-0.0092
1.1000	0.0480	3.0941	0.0742	-0.0090
1.1200	0.0460	3.0359	0.0732	-0.0089
1.1400	0.0460	2.9800	0.0723	-0.0087
1.1600	0.0460	2.9260	0.0714	-0.0085
1.1800	0.0460	2.8736	0.0705	-0.0084
1.2000	0.0460	2.8228	0.0696	-0.0082
1.2200	0.0460	2.7736	0.0688	-0.0080
1.2400	0.0460	2.7259	0.0679	-0.0079
1.2600	0.0460	2.6797	0.0670	-0.0078
1.2800	0.0460	2.6348	0.0661	-0.0076
1.3000	0.0460	2.5913	0.0653	-0.0075
1.3200	0.0460	2.5491	0.0644	-0.0074
1.3400	0.0460	2.5081	0.0635	-0.0072
1.3600	0.0440	2.4692	0.0626	-0.0071
1.3800	0.0440	2.4317	0.0617	-0.0070
1.4000	0.0440	2.3951	0.0608	-0.0069
1.4200	0.0440	2.3596	0.0600	-0.0068
1.4400	0.0440	2.3251	0.0590	-0.0067
1.4600	0.0440	2.2914	0.0581	-0.0066
1.4800	0.0440	2.2587	0.0571	-0.0065
1.5000	0.0440	2.2268	0.0562	-0.0064

Após o ajuste do ganho proporcional, cujo valor selecionado ($K_4=0.7 \text{ rad/kA}$) propiciou um desempenho dinâmico satisfatório do sistema multiterminal, será repetido o mesmo procedimento de ajuste para a determinação do ganho integral K_3 .

6.4.2 - Controle Proporcional-Integral:

Nesta etapa será inserido o ramo integral no canal direto do controle de corrente da estação Rio e realizado o ajuste de seu parâmetro variável K_3 , para o valor de ganho proporcional já definido.

A partir da figura 6.3, a qual define a malha completa do controlador, será atualizada a função de transferência $K(s)$ e dela extraída a real equação característica do sistema.

Para $K_4 = 0.7 \text{ rad/kA}$ e de acordo com a equação (63), a função de transferência $K(s)$ será expressa pelo parâmetro variável:

$$K(s) = 380,35 \frac{K_3}{s} + 380,35 \times 0.7 \quad (68)$$

Ao substituir a expressão (68) na equação (62) obtêm-se os seguintes coeficientes da equação característica, calculados pela rotina 'blocopi' implementada no MATLAB, para o sistema multiterminal com o controle PI na estação inversora Rio:

» blocopi

DS =

2.0451e+000 6.3035e+002 4.7380e+004 1.6381e+006 2.2078e+007 0

NS =

6.4325e+002 6.8380e+004 2.7635e+006 3.9034e+007

Ou de outra forma, EC será expressa por:

$$-K_3 = \frac{2,0451s^5 + 630,35s^4 + 47380s^3 + 1638100s^2 + 22078000s}{643,25s^3 + 68380s^2 + 2763500s + 39034000} \quad (69)$$

Utilizando o programa MATLAB, foram obtidos os seguintes zeros e pólos da relação polinomial:

» roots (NS)

ans =

-3.7764e+001+ 2.3359e+001i

-3.7764e+001- 2.3359e+001i

-3.0777e+001

» roots (DS)

ans =

0

-2.1764e+002

-2.9904e+001+ 2.6784e+001i

-2.9904e+001- 2.6784e+001i

-3.0777e+001

Conhecidos os pólos e zeros da relação polinomial, é possível traçar o lugar geométrico das raízes da equação característica do sistema com controlador PI, o qual é apresentado na figura 6.8.

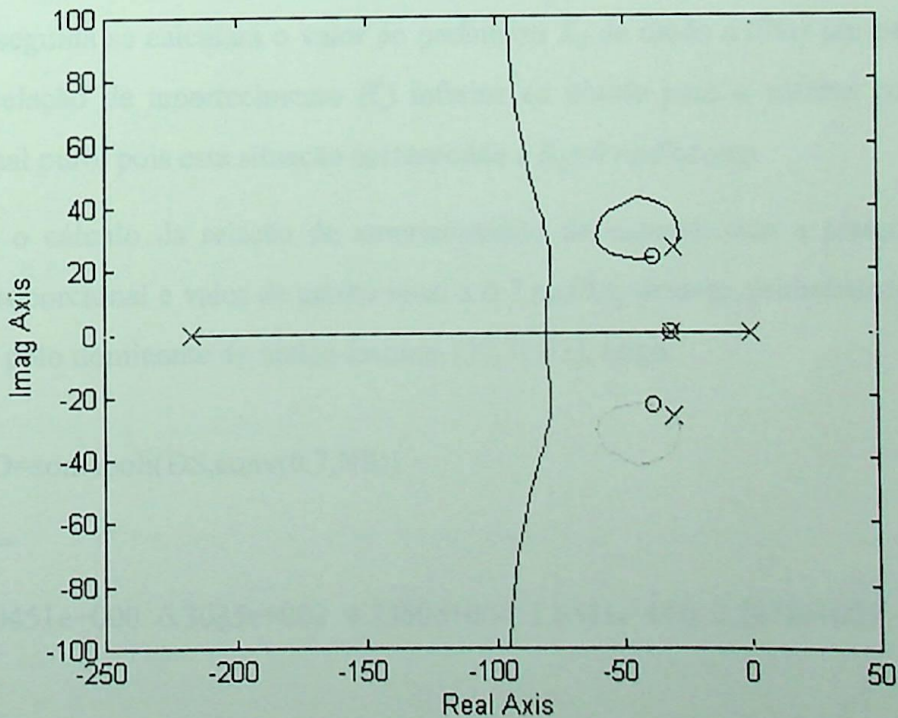


Figura 6.8 - Lugar das raízes do sistema MTCC com controle PI.

Ao observar o lugar das raízes do sistema MTCC com controlador PI na estação Rio, também verifica-se o cancelamento de um pólo com um zero da relação polinomial. Este fato, como já esclarecido anteriormente, é resultado do procedimento utilizado na álgebra de blocos para a obtenção da equação característica do sistema, o qual acarretou o aumento de ordem da equação característica.

Iniciando o ajuste do parâmetro K_3 , será primeiramente determinado o valor do ganho integral para o qual se obtenha o limite de estabilidade do sistema.

» [k3,wn]=limestab (DS,NS)

k3 =

0

wn =

0

O resultado $K_3 = 0 \text{ rad/kA-seg}$, somado à inspeção do LR, mostra que todas as raízes da EC possuem partes reais negativas para qualquer valor de ganho integral positivo, e que, portanto o sistema será estável.

Em seguida se calculará o valor do parâmetro K_3 de modo a obter um par de raízes da EC com relação de amortecimento (ζ) inferior ao obtido para o sistema com o controle proporcional puro, pois esta situação corresponde a $K_3=0 \text{ rad/kA-seg}$.

Para o cálculo da relação de amortecimento do sistema, com a presença apenas do controle proporcional e valor de ganho igual a 0.7 rad/kA , deve-se, primeiramente determinar o valor do pólo dominante de malha fechada [30,31,32]. Logo:

» GD=somapoli(DS,conv(0.7,NS))

GD =

2.0451e+000 6.3035e+002 4.7380e+004 1.6381e+006 2.2078e+007

As raízes desse polinômio será:

» rGD = roots (GD)

rGD =

-2.1764e+002

-2.9904e+001+ 2.6784e+001i

-2.9904e+001- 2.6784e+001i

-3.0777e+001

Para os pólos dominantes do sistema $(-2.9904e+001+ 2.6784e+001i$ e $-2.9904e+001- 2.6784e+001i)$, o valor correspondente de ζ é:

» zetapr = zeta (rGD(2))

zetapr =

7.4490e-001

Então, baseada nas equações (66) e (69), a função 'kzeta' calculará o valor de K_3 para a relação de amortecimento inicialmente especificada de $\zeta = 0,74$:

» [k3,wn]=kzeta(DS,NS,0.7)

k3 =

6.6240e+001 4.1003e+001 8.4935e-001

wn =

1.2652e+002 6.2528e+001 4.0154e+001

Ao examinar os resultados, percebe-se valores bastantes distintos de resposta para a mesma relação de amortecimento. Esta situação gera dúvidas na escolha da melhor solução, pois o critério de utilizar o maior valor de ganho talvez, neste caso, possa impor esforços ao controlador.

Para assegurar a escolha correta do ganho integral, foi também implantado no MATLAB um processo iterativo para cálculo simultâneo dos índices de desempenho do sistema MTCC com o controle PI na estação Rio. O arquivo contendo esta função ('indicepi') também se encontra no Apêndice C.

Ao aplicar a função 'indicepi' serão gerados, nesta ordem, gráficos que relacionam os três principais índices de desempenho transitório do sistema em função dos valores de ganho integral: $K_3 \times t_p$; $K_3 \times M_o$; e $K_3 \times t_s$; dentro da faixa de variação [0.8; 40] rad/kA-seg do ganho integral. Os gráficos obtidos estão mostrados na figura 6.9.

Ao analisar o comportamento dos índices de desempenho em função da variação do K_3 , observa-se que existe um ponto de 'overshoot' mínimo para um valor de ganho integral que se encontra dentro da faixa de pouca sensibilidade do tempo de subida. Então, este valor de K_3 (mínimo M_o e pouca variação de t_s), seria o melhor ajuste para o controlador PI.

Para determinar o valor do ganho correspondente ao 'overshoot' mínimo será empregada a função:

```
» [momin,imin]=min(moIdRI)
```

```
momin =
```

```
26.8109
```

```
imin =
```

```
69
```

```
» K3(69)
```

```
ans =
```

```
14.4000
```

Para o critério adotado de menor 'overshoot' da variável controlada $\Delta I_{d_{RI}}$ para resposta a degrau, o ajuste do ganho integral do controlador PI da estação Rio será $K_3 = 14.4 \text{ rad/kA-seg}$.

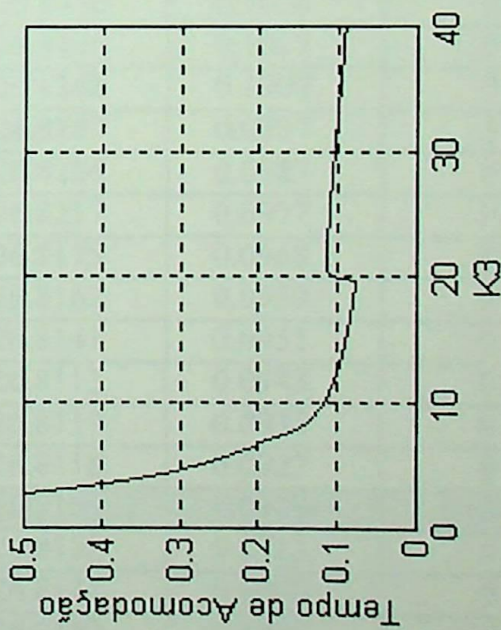
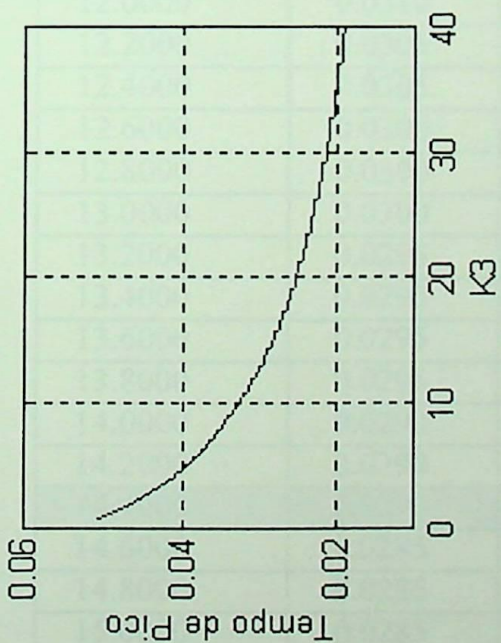
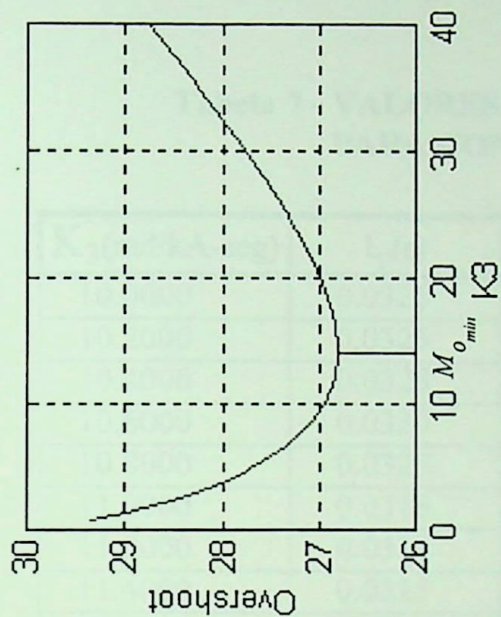


Figura 6.9 - Índices de desempenho em função do ganho integral.



A tabela 7 apresenta apenas os valores de índices obtidos dentro do intervalo [10;20]rad/kA-seg do ganho K_3 , por ser esta a faixa de interesse. À esta tabela, foi acrescida a coluna do erro de regime permanente (e_{rp}), apesar de ser sempre nulo.

Tabela 7 - VALORES DE ÍNDICES DE DESEMPENHO PARA CONTROLE PROPORCIONAL-INTEGRAL

K_3 (rad/kA-seg)	t_p (s)	M_o (%)	t_s (s)	e_{rp} (kA)
10.0000	0.0325	26.9504	0.1172	0
10.2000	0.0325	26.9372	0.1153	0
10.4000	0.0325	26.9232	0.1136	0
10.6000	0.0320	26.9114	0.1120	0
10.8000	0.0320	26.8998	0.1105	0
11.0000	0.0315	26.8884	0.1091	0
11.2000	0.0315	26.8793	0.1077	0
11.4000	0.0315	26.8693	0.1064	0
11.6000	0.0310	26.8613	0.1051	0
11.8000	0.0310	26.8539	0.1040	0
12.0000	0.0310	26.8456	0.1028	0
12.2000	0.0305	26.8405	0.1017	0
12.4000	0.0305	26.8348	0.1007	0
12.6000	0.0300	26.8287	0.0997	0
12.8000	0.0300	26.8256	0.0987	0
13.0000	0.0300	26.8217	0.0977	0
13.2000	0.0295	26.8175	0.0968	0
13.4000	0.0295	26.8162	0.0959	0
13.6000	0.0295	26.8141	0.0951	0
13.8000	0.0295	26.8113	0.0943	0
14.0000	0.0290	26.8119	0.0935	0
14.2000	0.0290	26.8118	0.0927	0
14.4000	0.0290	26.8109	0.0919	0
14.6000	0.0285	26.8122	0.0912	0
14.8000	0.0285	26.8141	0.0905	0
15.0000	0.0285	26.8152	0.0898	0
15.2000	0.0280	26.8166	0.0891	0
15.4000	0.0280	26.8205	0.0884	0
15.6000	0.0280	26.8236	0.0878	0
15.8000	0.0280	26.8261	0.0872	0
16.0000	0.0275	26.8304	0.0865	0
16.2000	0.0275	26.8357	0.0859	0
16.4000	0.0275	26.8403	0.0854	0
16.6000	0.0275	26.8442	0.0848	0

16.8000	0.0270	26.8505	0.0842	0
17.0000	0.0270	26.8573	0.0837	0
17.2000	0.0270	26.8634	0.0831	0
17.4000	0.0270	26.8689	0.0826	0
17.6000	0.0265	26.8765	0.0821	0
17.8000	0.0265	26.8849	0.0816	0
18.0000	0.0265	26.8926	0.0811	0
18.2000	0.0265	26.8997	0.0806	0
18.4000	0.0260	26.9076	0.0801	0
18.6000	0.0260	26.9176	0.0796	0
18.8000	0.0260	26.9271	0.0792	0
19.0000	0.0260	26.9359	0.0787	0
19.2000	0.0260	26.9440	0.0783	0
19.4000	0.0255	26.9548	0.0778	0
19.6000	0.0255	26.9661	0.0774	0
19.8000	0.0255	26.9767	0.0770	0
20.0000	0.0255	26.9867	0.1108	0

O gráfico da figura 6.10 ilustra a resposta da variável $\Delta I_{d_{RI}}$ a degrau de +5% (em $t=0$ s) na referência do controle de corrente da inversora Rio com o parâmetro K_3 ajustado com o valor de 14.4 rad/kA-seg . O degrau aplicado corresponde a um acréscimo de $\Delta I_{ref} = 0.065 \text{ kA}$.

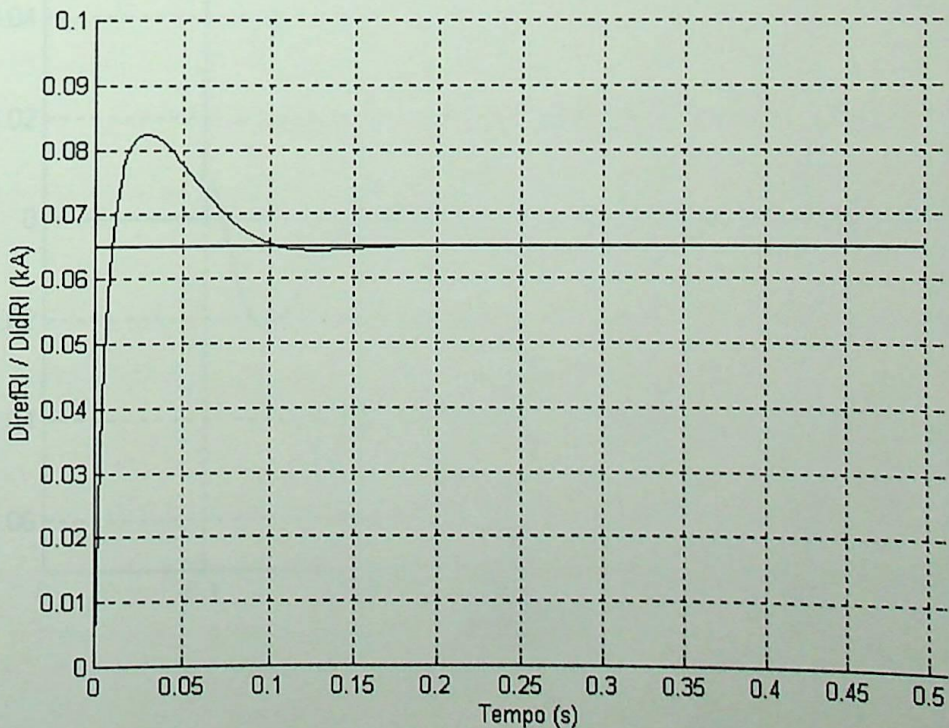


Figura 6.10 - Resposta de $\Delta I_{d_{RI}}$ a degrau de +5% em $\Delta I_{ref_{RI}}$ ($K_3=14.4$ e $K_4=0.7$).

6.5 - Simulações

Este item trata da verificação do ajuste adotado para o controlador PI da inversora Rio frente à ocorrência de pequenas variações de carga em seu sistema receptor e, alternadamente, no sistema receptor da estação Ibiúna, por serem estas as ocorrências de maior incidência na operação diária do sistema elétrico. Estas variações são representadas através de desvios negativos na referência de tensão das barras infinitas das áreas Rio ($\Delta U_{ref_{RI}}$) e Ibiúna ($\Delta U_{ref_{IB}}$). Para estas situações, são observadas tanto a variável controlada $\Delta I_{d_{RI}}$ como a variável de interação $\Delta I_{d_{FO}}$.

Antes, porém, dessas simulações, é interessante conhecer o comportamento da corrente contínua da estação Foz para o mesmo degrau de 5% em $\Delta I_{ref_{RI}}$ a fim de observar se seu desempenho é adequado. A resposta a degrau de $\Delta I_{d_{FO}}$ está ilustrada na figura 6.11.

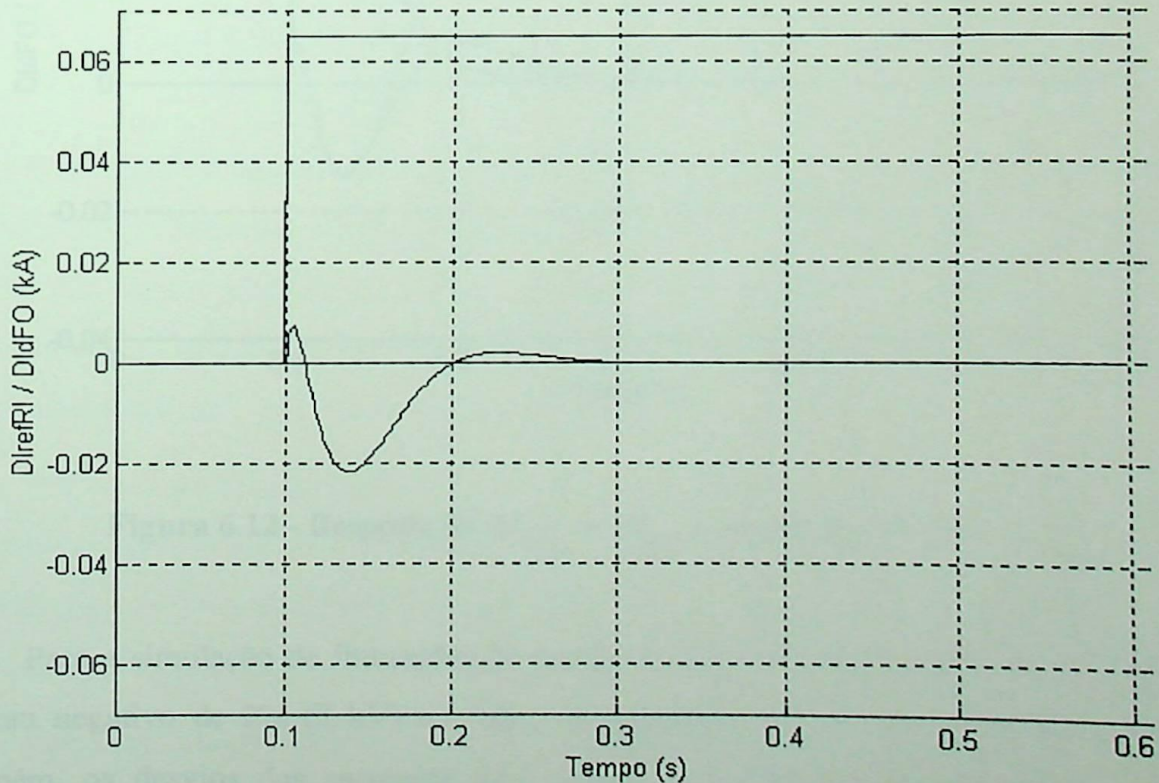


Figura 6.11 - Resposta de $\Delta I_{d_{FO}}$ a degrau de +5% em $\Delta I_{ref_{RI}}$ ($K3=14.4$ e $K4=0.7$).

A figura 6.11 mostra que a corrente da estação Foz tem a mesma duração de período transitório (200 ms) da corrente da estação Rio (figura 6.9). Além disso, mostra que a amplitude máxima de $\Delta I_{d_{FO}}$ atinge um valor inferior a 1% de sua corrente nominal (2.61 kA).

Para a simulação de flutuações de tensão na rede CA da área Rio, foi aplicado um degrau negativo de 2% (10 kV) no valor de referência de sua barra infinita e registrados os desvios das correntes $\Delta I_{d_{FO}}$ e $\Delta I_{d_{RI}}$. A figura 6.12 apresenta os resultados obtidos.

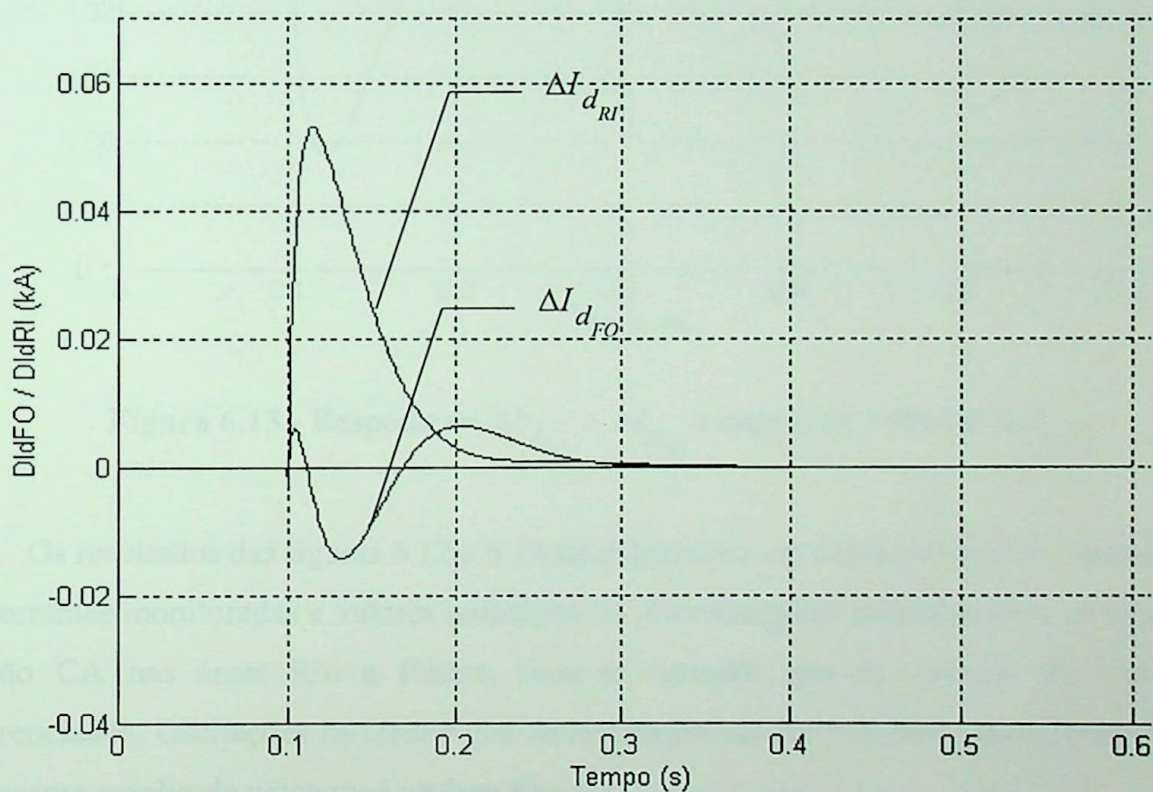


Figura 6.12 - Resposta de $\Delta I_{d_{FO}}$ e $\Delta I_{d_{RI}}$ a degrau de +2% em $\Delta U_{ref_{RI}}$.

Para a simulação de flutuações de tensão na rede CA da área Ibiúna, foi aplicado um degrau negativo de 2% (7 kV) no valor de referência de sua barra infinita e registrados, também, os desvios das correntes $\Delta I_{d_{FO}}$ e $\Delta I_{d_{RI}}$. A figura 6.12 apresenta os resultados obtidos.

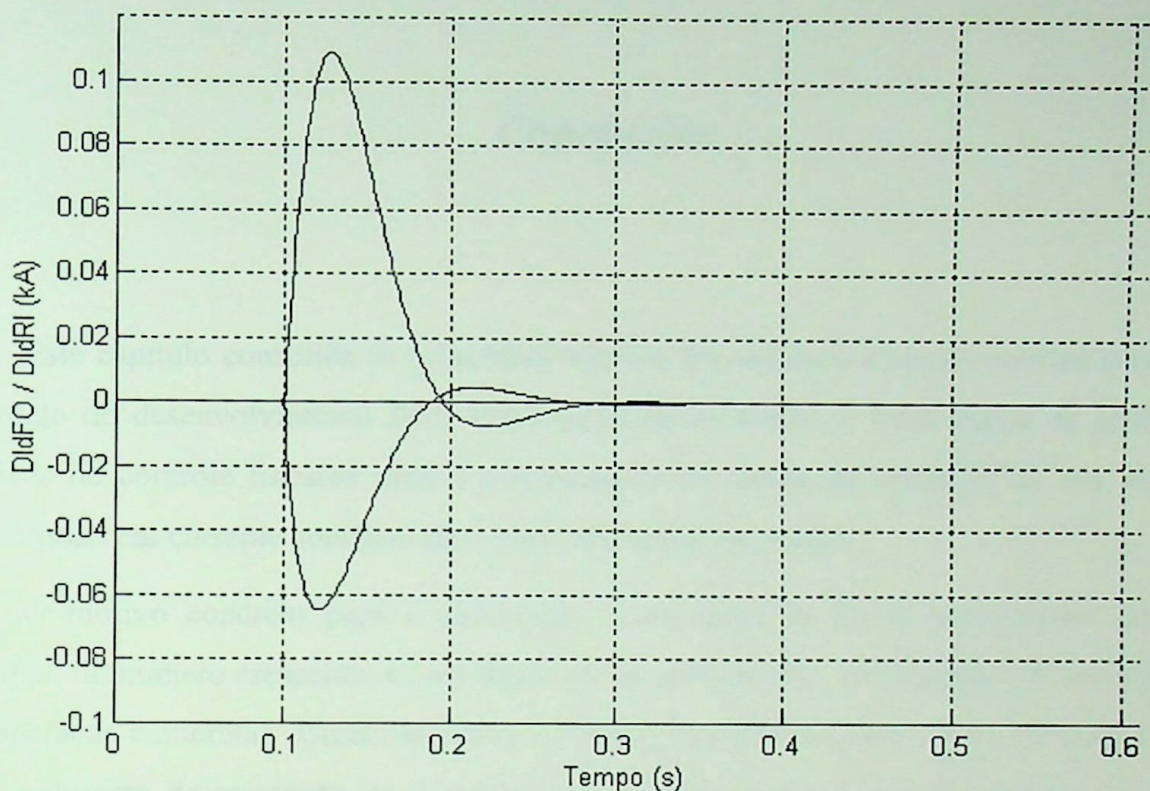


Figura 6.13 - Resposta de $\Delta I_{d_{FO}}$ e $\Delta I_{d_{RI}}$ a degrau de +2% em $\Delta U_{ref_{IB}}$.

Os resultados das figuras 6.12 e 6.13 também mostram o mesmo período transitório para as correntes monitoradas e valores reduzidos de ultrapassagens máximas para as variações de tensão CA nas áreas Rio e Ibiúna. Nota-se também que os desvios de corrente são diferenciados. Oscilações na tensão CA de Ibiúna provocam maiores desvios que oscilações de mesma amplitude percentual na área Rio.

Portanto, verifica-se que os valores ajustados para os parâmetros do controlador PI da estação conversora Rio são adequados, pois o ajuste efetuado não produziu qualquer prejuízo para as malhas de controle das estações retificadora e inversora Ibiúna. Ou seja, a interação existente entre as malhas é desprezível.

Estes resultados também mostram a eficiência do método iterativo de cálculo dos índices de desempenho transitório em função de variações dos ganhos dos controladores. De forma rápida e simples foi possível obter um conhecimento amplo do comportamento do sistema em estudo, para então decidir com segurança o valor final de ajuste do controlador PI.

Capítulo 7

Conclusões

Este capítulo consolida as principais orientações, análises e contribuições apresentadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação de mestrado, a qual tratou da aplicação de técnicas de controle lineares para a estabilização da malha de controle de um sistema de transmissão em corrente contínua na configuração multiterminal.

O motivo concreto para a elaboração deste trabalho foi a constatação, no cenário mundial, do número crescente, e com desempenho satisfatório, de sistemas CC multiterminais em operação comercial. Como decorrência abrem-se grandes perspectivas de novos projetos, principalmente da expansão de sistemas em corrente contínua ponto-a-ponto em operação para a configuração multiterminal.

O Brasil, atualmente detentor da maior ligação em corrente contínua a dois terminais, o projeto Itaipu, também busca no emprego de interligações MTCC uma alternativa de solução para os reforços necessários ao seu sistema de transmissão de energia elétrica.

A análise de viabilidade, já efetuada por FURNAS, da extensão do elo Foz-Ibiúna até o estado do Rio de Janeiro, que assim passaria à configuração de três terminais, foi o primeiro passo para a aplicação desta tecnologia de transmissão. Os resultados positivos alcançados por esta análise, reforçaram a importância de desenvolvimento de ferramentas computacionais que possibilitem aprofundar conhecimentos sobre os desempenhos dinâmico e transitório desta alternativa de transmissão de potência.

Nessa análise de viabilidade foram pesquisados, na bibliografia disponível sobre o tema, os principais arranjos físicos, propriedades e condições operativas de sistemas multiterminais, para então constatar que a configuração paralela radial das estações conversoras e o modo de operação em controle da margem de corrente são predominantemente empregados como estratégias de operação nos sistemas MTCC existentes.

Estendendo os estudos realizados em FURNAS, este trabalho mostra o desenvolvimento de um modelo linear de uma interligação em corrente contínua a três terminais, expansão do sistema CCAT do projeto Itaipu, empregado como caso exemplo. Para a fidelidade desta representação, considerou-se apenas os sistemas de controle e elementos de transmissão que determinam o desempenho dinâmico do sistema MTCC no período de análise de estabilidade transitória.

Na elaboração da modelagem, implantou-se um controlador Proporcional-Integral no controle de corrente constante da nova conversora. Esta decisão baseou-se no emprego deste tipo de controlador pela maioria dos sistemas MTCC em operação comercial.

No processo de ajuste da nova malha de controle, foi aplicada uma técnica alternativa de ajuste dos parâmetros variáveis do controlador PI, a qual comprovou ser bastante eficaz. Tal técnica emprega algoritmos computacionais baseados na teoria do lugar das raízes, que permitem conhecer o comportamento do sistema para valores definidos dos principais índices de desempenho transitório.

A partir deste estágio, construiu-se um processo iterativo, implantado no programa científico MATLAB, que efetuou, automaticamente, uma série de simulações do sistema para um conjunto de valores do ganho proporcional (K_p) e, após seu ajuste, outra série de simulações para um conjunto de valores do ganho integral (K_i). Em cada simulação, foram calculados os principais índices de desempenho ($[t_r, t_p, M_o, t_s, T_{osc}]$). Para a aplicação em estudo, os ajustes foram feitos com base na evolução dos valores de t_p , M_o e t_s .

Com a aplicação deste processo iterativo foi alcançado um conhecimento amplo sobre o comportamento do sistema em função da varredura dos parâmetros variáveis da malha de controle da estação Rio, o que permitiu uma escolha ótima dos valores dos ganhos, atendendo ao critério de 'overshoot' mínimo.

Com os valores adotados de $K_3=14.4 \text{ rd/kA-seg}$ e $K_4=0.7 \text{ rd/kA}$ foram realizadas simulações variando as referências do controle de corrente da estação Rio e das tensões das barras infinitas ligadas às estações Ibiúna e Rio, cujos resultados demonstram que a malha de controle ajustada da nova conversora não produz qualquer prejuízo para as malhas de controle originais das estações Foz e Ibiúna.

Portanto, o processo iterativo desenvolvido dispensa o projetista do procedimento penoso de atribuir vários valores aos parâmetros do controlador, realizar a inspeção visual das curvas de resposta e, a partir daí, decidir qual o ajuste mais adequado para os controladores diante de pequenas perturbações.

O processo iterativo de simulações com determinação dos índices de desempenho pertinentes ($[t_p \ M_o \ t_s]$), com a apresentação dos resultados em tabelas e gráficos mostrando a evolução dos índices em função dos parâmetros do controlador, orienta o projetista para uma tomada de decisão adequada e consistente.

A abordagem do problema mostrou-se adequada e espera-se que possa ser utilizada na solução de problemas semelhantes.

Bibliografia

- [1] BJORKLUND,H. and LISS,G.; *Present HVDC Technology for Multi-Terminal Schemes*; In: IX SNPTEE, Belo Horizonte, out., 1987.
- [2] PEIXOTO,C.A.O.; PORANGABA,H.D.; REIS,L.B. et al.; *Sistemas Multiterminais em CCAT - O Estado da Art.*; In: IX SNPTEE, Belo Horizonte, out., 1987.
- [3] HAMMAD,A.E.; *Practical Implementation of a Control Strategy for HVDC Transmission Multi-Terminal Operation*; s.n.t..
- [4] BOWELS,J.P.; LISS,G., MARTINS,C.J.B. et al.; *Control in HVDC System - The State of the Art - Part II: Multiterminal System*; In: International Conference on Large High Voltage Electric System, Paris, Aug.-Sept., 27-4, 1980. Paper 14-07.
- [5] McNICHOL,J.R.; RANADE,S.T.; RING,H. et al.; *Parallel Operation of Nelson River HVDC Bipoles 1 and 2 Control System - Simulator Studies*; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-101, n.3, Mar., 1982. p.653-661.
- [6] BUNCH,R.; LITZENBERGER,W.; REYNOLDS,M. et al.; *Completion and Initial Operation of the Expanded Four-Converter Southwest Intertie*; In: CIGRÉ, Sept., 1990. Paper 14-202.
- [7] MAZZOLDI,F.; TAISNE,J.P.; MARTIN,C.J.B. et al.; *Adptation of the Control Equipament to Permit 3-Terminal Operation of the HVDC Link between Sardinia, Corsica and Maintland Italy*; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 4, n.2, Mar., 1982. p.1296-1274.
- [8] HEGI,M.; BAHRMAN,M.; SCOTT,G. and LISS, G.; *Control of the Quebec- New England Multi-Terminal HVDC System*; In: CIGRÉ, Aug-Sept., 28-3, 1988. Paper 14-04.
- [9] Oliveira, I.M.; *Operação em Paralelo do Elo de Corrente Contínua de Itaipu*; FURNAS, Departamento de Estudos Elétricos. Rio de Janeiro, RJ, dez., 1987. Nota Técnica.
- [10] ASEA-PROMON HVDC CONSORTIUM; *Paralel Operation Dynamic Performance Study - Simulator Investigation Report*; Technical Report AP 159, Sweden, Ludvika, 88-12-08.
- [11] LIMA,M.P.; GUIMARÃES,E.B.; CARUSO,J.M., et al.; *Sistema Multiterminal de Itaipu - Avaliação Técnico-ecomômica*; In:XII SNPTEE, 03-07 out., 1993.
- [12] The Mathworks Inc.; *Matlab for Windows Personal Computers*; Natick, MA, EUA, 1990.
- [13] INSTITUT DE RECHERCHE D'HYDRO-QUEBEC; MANITOBA HVDC RESEARCH CENTRE; UNIVERSITY OF WISCONSIN AND JOHN REEVE CONSULTANTS LIMITED; *Methodology for the Integration of HVDC Links in Large AC Systems - Phase 2: Advanced Concepts*; Research Project 1964-2, EL-4365, volume 1. Final Report, Apr., 1987.

- [14] PEIXOTO,C.A.O.; *Aspectos da Transmissão em CCAT com Multiterminais*; In: Simpósio sobre Conversão CA/CC, Florianópolis, 30-03, nov.-dez., 1986.
- [15] SEVERINO,M.M.; *Uma Proposta para Inclusão de Sistemas Multiterminais de Transmissão em Corrente Contínua em Estudos de Fluxo de Carga*; UFU, Uberlândia, 11 out.,1991. Dissertação de Mestrado.
- [16] KIMBARK,E. W.; *Direct Current Transmission*; volume 1, Editora John Wiley & Sons, USA, 1971.
- [17] UHLMANN,E.; *Power Transmission by Direct Current*; Editora Springer-Verlag, USA, 1975.
- [18] OLIVEIRA,J.C.; *Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua*; UFU, Uberlândia, 1986.
- [19] ASEA Seminar on Modern HVDC Technology; *HVDC Control of ITAIPU Project*; Info-Nº LFS 285b/NLAS 2040a; Swedwen, Ludvika, May., 1979.
- [20] Ljungqvist,R. and Lindqvist,C.; *Convertor Firing Control for HVDC Convertor*; Technical Report TR LKS 81-038 ASEA, 82-02-05.
- [21] EKSTROM,A. and LISS,G.; *A refined HVDC Control System*; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-89, n.516, May/Jun., 1970.
- [22] LOPES,J.C.; *Modelagem de Ligações em Corrente Contínua*; COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1982. Dissertação de Mestrado.
- [23] PILOTTO,L.A.S.; *Modelagem de um elo de transmissão em corrente contínua por variáveis de estado e aplicações de controle ótimo*; COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1983. Dissertação de Mestrado.
- [24] REEVE,J.; *Multiterminal HVDC Power Systems*; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-99, n.2, Mar./Apr., 1980.
- [25] NAPOLI,R.; PIGLIONE,f.; TELLINI,A. and ZINI,A.; *Some Series Devices for Small Power Tapping from HVDC Transmission Systems*; In: CIGRÉ, Nov., 1985. Paper 310-07.
- [26] Kangisser,K.W.; Bowles,J.P.; Ekstrom,A. et al.; *HVDC Multiterminal Systems*; In: CIGRÉ, Aug., 1974.
- [27] LAMM,U.; UHLMANN,E. and DANFORS,P.; *Some Aspects on Tapping of HVDC Transmission System*; Direct Current, v.8, n.5, May., 1963.
- [28] BERGSTRÖM,L.; JUHLIN,L.E.; LISS,G. et al.; *Simulator Study of Multiterminal HVDC System Performance*; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; v. PAS-97; n.6; Nov./Dec.; 1980.
- [29] LONG,W.F.; REEVE,J.; McNICHOL,J.R. et al.; *Considerations for Implementing Multiterminal DC Systems*; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-104., n.9, Sept., 1985.
- [30] D'Azzo, J.J. & Houpis, C.H.; *Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares*; Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1984.

- [31] OGATA, K.; *Engenharia de Controle Moderno*; Editora Prentice/Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro, 1982.
- [32] COELHO, C.A.D.; *Análise e Simulação de Sistemas Dinâmicos*; EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Eletrônica, Itajubá/MG, 1995.
- [33] COELHO, C.A.D.; *Algoritmos Computacionais Baseados no Lugar das Raízes para Ajuste de Parâmetros de Sistemas de Controle*; In: VI Seminário de Pesquisa da EFEI, Itajubá/MG, maio, 1992, pp. 66/74.
- [34] COELHO, C.A.D.; *"Toolbox" de Controle CACCON para o Programa MATLAB – Manual do Usuário (Versão 2.0)*; EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá/MG, out., 1993.
- [35] COELHO, C.A.D.; *Uso Eficiente de Reguladores Proporcional-Integradores para Estabilização e Ajuste de Sistema de Controle Carga-Freqüência*; EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá/MG, agos., 1995.
- [36] COELHO, C.A.D.; *Effective Use of Proportional-Integral Controllers for Stabilization and Tuning of Load-Frequency Control Systems*; In: IV SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Foz do Iguaçu/PR, 23-27, maio, 1994, trabalho SP-10.

Este apêndice inclui:

• manual de índice de controle para o sistema de controle de qualidade

• manual de planejamento

• relatório de resultados de um programa de controle de qualidade

• outros estudos do programa

Apêndice A

• arquivo de índice de controle para o sistema de controle de qualidade

• CAVCC para o sistema de controle de qualidade

• arquivo (M-File) de controle de qualidade

no programa MATLAB®

• arquivo de controle de qualidade

programa MATLAB®



Este apêndice inclui:

- arquivo de dados de entrada para simulação de fluxo de potência do sistema CA/CC ponto-a-ponto do programa FLOWINT;
- arquivo de resultados de simulação de fluxo de potência do sistema CA/CC ponto-a-ponto obtidos do programa FLOWINT;
- arquivo de dados de entrada para simulação de desempenho dinâmico do sistema CA/CC ponto-a-ponto do programa MICRODIN;
- arquivo (M-file) de cálculo das constantes do modelo linear ponto-a-ponto implantado no programa MATLAB;
- arquivo da equação matricial de estado do sistema linear ponto-a-ponto para o programa MATLAB.

CORRENTE DC	PERDAS DC	AREA	MAX ITER		
2610.0 AMPS	71.3 MW	1	0		
			-----	TERMINAL RETIFICADOR	TERMINAL INVERSOR
				(FROM)	(TO)
			-----	-----	-----
ARRA TERMINAL			85		86
TENSAO AC			1.000 PU		1.000 PU
TENSAO DC			1.000 PU		0.954 PU
			600.00 KV		572.67 KV
POTENCIA DC			1566.00 MW		-1494.68 MW
CONSUMO DE REATIVO			836.02 MVAR		826.52 MVAR
ANGULO DE DISPARO E EXTINGUICAO			15.0 GRAUS		17.0 GRAUS
ANGULO DE COMUTACAO			23.1 GRAUS		21.3 GRAUS
FACTOR DE POTENCIA			0.88		0.87
RAZAO DO TRANSFORMADOR			1.005		1.045

*** ARRANJO MONOPOLAR

Te <PG DN> e <PG UP> Para Paginar Data :11/ 3/1996 Hora : 7:48:41

WINT V. 2.0 *** FLUXO DE POTENCIA DA AREA 1 *** ELETROBRAS

D A D O S D A B A R R A			X-----F L U X O S N A S			L I N H A S-----		
NOME			NO.	NOME	MW	MVAR	TAP	SHIF
FOZ-LINK-500			1101	ITAIPU50-500	-391.51	-84.08		
TENSAO	1.000	-2.3	1101	ITAIPU50-500	-391.51	-84.08		
GERACAO	0.0	0.0	1108	MDIREITA-500	-391.50	-84.06		
CARGA	0.0	0.0	1108	MDIREITA-500	-391.50	-84.06		
CAP/REAT		500.0						
-----			-----			-----		
IBIUNA---345			87	INFINITA-345	1494.68	148.46		
TENSAO	1.000	23.8						
GERACAO	0.0	0.0						
CARGA	0.0	0.0						
CAP/REAT		975.0						
-----			-----			-----		
INFINITA-345			86	IBIUNA---345	-1440.50	472.30		
TENSAO	1.009	0.0						
GERACAO	-1440.5	472.3						
CARGA	0.0	0.0						

Te <PG DN> e <PG UP> Para Paginar Data :11/ 3/1996 Hora : 7:56:22

DADOS DA BARRA		X		FLUXOS NAS LINHAS		MVAR TAP SHIF	
NOME		NO.	NOME	MW			
0 ITAIPU50-INF		1101	ITAIPU50-500	1566.53		358.39	
TENSAO	1.009				0.0		
GERACAO	1566.5				358.4		
CARGA	0.0				0.0		

1 ITAIPU50-500		85	FOZ-LINK-500	391.63		75.08	
TENSAO	1.002		85 Foz-LINK-500	391.63		75.08	
GERACAO	0.0		1100 ITAIPU50-INF	-1566.53		-300.81	1.000F
CARGA	0.0		1108 MDIREITA-500	391.63		75.10	
			1108 MDIREITA-500	391.63		75.10	

MDIREITA-500		85	FOZ-LINK-500	391.59		77.05	
TENSAO	1.001		85 Foz-LINK-500	391.59		77.05	
GERACAO	0.0		1101 ITAIPU50-500	-391.60		-77.09	
CARGA	0.0		1101 ITAIPU50-500	-391.60		-77.09	

e <PG DN> e <PG UP> Para Paginar Data :11/ 3/1996 Hora : 7:57:35

DADOS DA BARRA		X		FLUXOS NAS LINHAS		MVAR TAP SHIF	
NOME		NO.	NOME	MW			
SAIS DA AREA	X	GERACAO	X	X	CARGA	X	CAP/REAT
	MW	MVAR		MW	MVAR		MVAR
	126.0	830.7		0.0	0.0		1475.0

e <PG DN> e <PG UP> Para Paginar Data :11/ 3/1996 Hora : 7:58:51

C:\imo\trab\elolac.DIN COLUMNS 001 07
 AND INPUT ==> SCROLL ==> PAGE
 *** ***** INICIO DE DADOS *****
 001 3 ELO1AC.HST \eb3000\PCAPAD95.PAD
 002 20
 003 85 86 500. 345. 6.146 5.689
 004 1 100. 0.114 0.5 0.04 0.261 3.68 0.261 0.01
 005 2 0.27 0.34595 0.34595 0.0
 006 3 0.089 35.0 90.0 1.3 32. 0.01 0.030
 007 4 0.055 30.0 90.0 0.6 56. 0.008 0.005
 008 5 0.0 -0.2 0.1 1.0 5.0
 009 6 0.0 0.48 0.32 0.08 .053 13.0 0.1
 010 8 0.0 -.05 0.12 0.35
 011 9 0.0 1.0 63.0207 2.61 3.68
 012 9999
 013 16
 014 01100 0.01 0.010 0.01 1.0
 015 0 87 0.01 0.010 0.01 1.0
 016 9999
 017 19
 018 87 86
 019 86 87
 020 9999
 021 32
 AVAIL -> ↑ L 02 C

C:\imo\trab\elolac.DIN COLUMNS 001 07
 AND INPUT ==> SCROLL ==> PAGE
 022 25 1 1
 023 85 86 N A I REF RETIFI
 024 85 86 1 B CORRENTE CC
 025 85 86 7 C ALFA RETIFI
 026 85 86 & D TENSÃO CC RE
 027 9999
 028 25 2 1
 029 85 86 N E GAMA INVER
 030 86 V F TENSÃO AC IN
 031 9999
 032 26
 033 10 REGIME PERMANENTE .01 .001 .0
 034 21
 035 1 2 3 2.74
 036 9999
 037 26 2000
 038 40 11 DEGRAU 5% EM Iref RETIFICADOR .01 .001 .0
 039 30
 *** ***** FIM DE DADOS *****
 AVAIL -> ↑ L 02 C



```

% -----
%           Cálculo das Constantes
% ----- do Sistema Ponto-a-Ponto -----
%           1 Pólo
% -----
%
%
% Autora : Ivone Maria de Oliveira
%
%
help dadopolo

%
%*****Parâmetros Elétricos*****
%

RcR=5.86;
rcvR=0.14;
raR=0.00;
rcc=10.47;
raI=0.00;
rcvI=0.13;
RcI=5.43;
lcvR=0.04;
laR=0.27;
lcc=0.69;
laI=0.27;
lcvI=0.03;
XcI=5.69;
RsI=2.86;
XsI=32.73;
XfI=122.10;

%
%*****Condições Iniciais*****
%

UdoR0=172;
A0=15*pi/180;
UdoI0=164.7;
B0=(17+21.3)*pi/180;
Id0=2.610;
FP=0.87;
UacI0=122;
NI0=1.0;
TI=345/122;
Uinf0=1.009*345;

```

DADOPOLO.M

```

%
%*****Constantes para 1 pólo*****
%

RCR=4*RcR
RCI=4*RcI
R=raR+rcc+raI+4*(rcvR+rcvI)
L=laR+lcc+laI+4*(lcvR+lcvI)
RET=4*UdoR0*sin(A0)
INVB=4*UdoI0*sin(B0)
INVUac=4*3*sqrt(2)*cos(B0)/pi
MIId=2*RcI/(UdoI0*sin(B0))
MIUac=2*RcI*Id0/(UdoI0*UacI0*sin(B0))
q1=(1-XsI/XfI)^2+(RsI/XfI)^2;
ZsI=sqrt((RsI^2)+(XsI^2));
q2=sqrt(3)*(XsI-(ZsI^2/XfI));
q3=sqrt(3)*RsI;
D0I=acos(FP);
q4=q2*sin(D0I)+q3*cos(D0I);
q5=(q2*cos(D0I)/sin(D0I))-q3;
NI=NI0*TI;
Q1=2*NI^2*q1*UacI0+2*sqrt(6)*q4*Id0/pi-sqrt(12)*q5*XcI*Id0^2/(UacI0*pi);
Q2=2*sqrt(6)*q4*UacI0/pi+36*ZsI^2*Id0/(pi^2*NI^2)+sqrt(12)*q5*XcI*Id0/pi
Q=1/Q1
UINF=2*Uinf0
QI=Q*UINF

%
%*****Fim*****
%

```

```

% -----
%           Matriz de Estado
% ----- do Sistema Ponto-a-Ponto -----
%           1 Pólo
% -----
%
%
% Autora : Ivone Maria de Oliveira
%
```

```
help dadoequa
```

```

%
%*****Parâmetros Elétricos*****
%
```

```

RcR=5.86;
rcvR=0.14;
raR=0.00;
rcc=10.47;
raI=0.00;
rcvI=0.13;
RcI=5.43;
lcvR=0.04;
laR=0.27;
lcc=0.69;
laI=0.27;
lcvI=0.03;
XcI=5.69;
RsI=2.86;
XsI=32.73;
XfI=122.10;
```

```

%
%*****Condições Iniciais*****
%
```

```

VdoR0=172;
A0=15*pi/180;
VdoI0=164.7;
B0=(17+21.3)*pi/180;
Id0=2.610;
FP=0.87;
VacI0=122;
NI0=1.0;
TI=345/122;
Vinf0=1.009*345;
```

DADOEQUA.M

```

%
%*****Parâmetros de Controle*****
%

K1=16.72;
K2=0.68;

%
%*****Constantes para 1 pólo*****
%

R=raR+rcc+raI+4*(RcR+rcvR+rcvI+RcI);
L=laR+lcc+laI+4*(lcvR+lcvI);
q1=(1-XsI/XfI)^2+(RsI/XfI)^2;
ZsI=sqrt((RsI^2)+(XsI^2));
q2=sqrt(3)*(XsI-(ZsI^2/XfI));
q3=sqrt(3)*RsI;
D0I=acos(FP);
q4=q2*sin(D0I)+q3*cos(D0I);
q5=(q2*cos(D0I)/sin(D0I))-q3;
NI=NI0*TI;
Q1=2*NI^2*q1*VacI0+2*sqrt(6)*q4*Id0/pi-sqrt(12)*q5*XcI*Id0^2/(VacI0*pi);
Q2=2*sqrt(6)*q4*VacI0/pi+36*ZsI^2*Id0/(pi^2*NI^2)+sqrt(12)*q5*XcI*Id0/pi;

%
%*****Matriz de Estado*****
%

A1=(-R/L)+(12*sqrt(2)/(pi*L))*(Q2*cos(B0)/Q1)+(24*XcI/(pi*L))*(1+Id0*Q2/(VacI0*Q1))-
(4*K2*VdoR0*sin(A0)/L);
A2=-4*VdoR0*sin(A0)/L;
A3=K1;
A4=0;
%
%
B1=4*K2*VdoR0*sin(A0)/L;
B2=-(24*Vinf0/(pi*L*Q1))*(2*XcI*Id0/VacI0+(sqrt(2)*cos(B0)));
B3=-K1;
B4=0;
%
%
A=[A1 A2;A3 A4]
B=[B1 B2;B3 B4]
%

%*****Fim*****

```

Este apêndice inclui:

• arquivo de dados de entrada para o modelo de regressão logística

• matriz de covariância

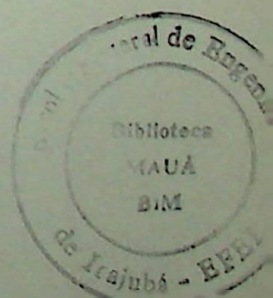
• arquivo de dados de entrada para o modelo de regressão logística

• matriz de covariância

Apêndice B

Este apêndice inclui:

- arquivo de dados de entrada para simulação de fluxo de potência do sistema CA/CC multiterminal do programa ANAREDE;
- arquivo de resultados de simulação de fluxo de potência do sistema CA/CC multiterminal obtido do programa ANAREDE.



AND INPUT ==>

SCROLL ==> PAGE

** ***** INICIO DE DADOS *****

```

01 TITU
02 ELO FOZ-IBIUNA-RIO / 1 POLO / INVER-IB SCR=2.3 / INVER-RI SCR=3.0
03 DCTE
04 BASE      100. DASE  1575. TEPA      1.5 EXST      4. TETP      5. TBPA      5.
05 TLPP      1. TEPR   1.5 QLST      4. TLPR      1. TLPQ      2. TSBZ     .01
06 TSBA      5. ASTP   .05 VSTP      5. TLVC      .01 TLTC     .1 TSFR     .01
07 ZMAX     500. TLPV    .5 VDVM     150. VDVN     50. TUDC     .01 TADC     .01
08 PGER     30. TPST   500. VFLD     70. ZMIN     .001 HIST    140 LFIT    10
09 ACIT     30 LFCV    3 DCIT      10 VSIT      10 LPIT     50 LFLP    10
10 PDIT     1 LCRT    30 LPRT      60
11 9999
12 DBAR
13 85      FOZ-LINK-500 1000 0.
14 86      IBIUNA---345 1000 12.
15 87      RIO      500 100017.6
16 88      2 INFINITA-345 986 0.-737.90.88-999999999
17 89      2 INFINITA-500 1009 0.-707.196.2-999999999
18 1100    2 ITAIPU50 INF 1000 0.1566.836.7-999999999
19 9999
20 DLIN
21 86      88 1      .24 2.75
AVAIL -> ↑

```

L 02 C

AND INPUT ==>

SCROLL ==> PAGE

```

22 87      89 1      .37 4.22
23 1100    85 1      .001 .001
24 9999
25 DARE
26 1      0.      ***** FURNAS *****
27 9999
28 DELO
29 1      600. 1575. ELO FOZ-IBIUNA-RIO
30 9999
31 DCBA
32 1      1+RETIFICADOR 600.
33 2      +INVERSOR 572.7
34 3      +INVERSOR 559.1
35 4      ONEUTRO 0.
36 5      ONEUTRO 0.
37 6      ONEUTRO 0.
38 9999
39 DCLI
40 1      2 1 F 10.47 692.
41 2      3 1 F 10.45 429.
42 9999
43 DCNV
AVAIL -> ↑

```

L 02 C

T C:\imo\trab\MULTI.PWF COLUMNS 001 07
 MAND INPUT ==> SCROLL ==> PAGE

044	1	85	1	4 R 4	2610.	17.8	127.4	470.	0.
045	2	86	2	5 I 4	2610.	17.2	122.	450.	0.
046	3	87	3	6 I 2	1305.	12.	238.5	440.	0.
047	9999								
048	DCCV								
049	1	C	2610.	2610.	2610.	15.	5.	163.	.925 1.25
050	2	F C	0.	0.	0.	17.	17.	79.	.925 1.25
051	3	C	1305.	1305.	1305.	22.	22.	75.	.925 1.25
052	9999								
053	FIM								
*** ***** FIM DE DADOS *****									

AVAIL ↑

L 10 C 02

ELO FOZ-IBIUNA-RIO / 1 POLO /INVER-IB SCR=2.3 / INVER-RI SCR=3.0

CASO BASE

RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 * ***** FURNAS *****

BARRA NUM.	TENSAO TIPO	GERACAO MOD/ ANG	INJ MW/ MVAR	EQV MW/ MVAR	FATOR GER % EQV %	CARGA MW/ MVAR	ELO CC MW/ MVAR	SHUNT MVAR/ EQUIV	MOTOR MW/ MVAR
85	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	1566.0	0.0	0.0
FOZ-LINK-500		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	836.6	0.0	0.0
86	0	1.001	0.0	0.0	0.0	0.0	-747.3	400.9	0.0
IBIUNA---345		11.9	0.0	0.0	0.0	0.0	333.7	0.0	0.0
87	0	0.998	0.0	0.0	0.0	0.0	-729.5	438.2	0.0
RIO	500	17.8	0.0	0.0	0.0	0.0	414.7	0.0	0.0
88	2	0.986	-733.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
INFINITA-345		0.0	87.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
89	2	1.009	-709.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
INFINITA-500		0.0	202.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1100	2	1.000	1566.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ITAIPU50 INF		0.0	837.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

ELO FOZ-IBIUNA-RIO / 1 POLO /INVER-IB SCR=2.3 / INVER-RI SCR=3.0

CASO BASE

RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 * ***** FURNAS *****

DA BARRA NUM.	TENSAO TIPO	MOD	PARA BARRA NUM.	NOME	NC	FLUXOS MW	MVAR	TAP	DEFAS	TIE
85	0	1.000								
FOZ-LINK-500		0.0	1100	ITAIPU50 INF	1	-1566.0	-836.8			
86	0	1.001								
IBIUNA---345		11.9	88	INFINITA-345	1	747.3	67.1			
87	0	0.998								
RIO	500	17.8	89	INFINITA-500	1	729.5	23.6			
88	2	0.986								
INFINITA-345		0.0	86	IBIUNA---345	1	-733.9	87.3			
89	2	1.009								
INFINITA-500		0.0	87	RIO	500	1	-709.7	202.2		
1100	2	1.000								
ITAIPU50 INF		0.0	85	FOZ-LINK-500	1	1566.2	836.9			

TOTAIS DA AREA 1

GERACAO MW/ MVAR	INJ EQV MW/ MVAR	CARGA MW/ MVAR	ELO CC MW/ MVAR	SHUNT MVAR/ EQUIV	EXPORT MW/ MVAR	IMPORT MW/ MVAR	PERDAS MW/ MVAR
122.8	0.0	0.0	89.1	839.1	0.0	0.0	33.4
1126.6	0.0	0.0	1585.0	0.0	0.0	0.0	380.4

ELO FOZ-IBIUNA-RIO / 1 POLO / INVER-IB SCR=2.3 / INVER-RI SCR=3.0

CASO BASE

RELATORIO DE BARRAS CC DO SISTEMA * ELO 1 * ELO FOZ-IBIUNA-RIO *

NUM.	BARRA NOME	POLO	TP	MODULO DA (PU)	TENSAO (KV)	CORRENTE (PU)	INJETADA (A)
1	RETIFICADOR	+	1	1.000	600.0	0.994	2610.0
2	INVERSOR	+	0	0.954	572.7	-0.497	-1305.0
3	INVERSOR	+	0	0.932	559.0	-0.497	-1305.0
4	NEUTRO	N	0	0.000	0.0	-0.994	-2610.0
5	NEUTRO	N	0	0.000	0.0	0.497	1305.0
6	NEUTRO	N	0	0.000	0.0	0.497	1305.0

ELO FOZ-IBIUNA-RIO / 1 POLO / INVER-IB SCR=2.3 / INVER-RI SCR=3.0

CASO BASE

RELATORIO DE LINHAS CC DO SISTEMA * ELO 1 * ELO FOZ-IBIUNA-RIO *

DA BARRA NUM.	NOME	P/ NUM.	BARRA NOME	CIRC NUM.	CORRENTE (A)	POTENCIA DA BARRA	(MW) P/ BARRA	PERDAS
1	RETIFICADOR	2	INVERSOR	1	2610.0	1565.99	-1494.67	71.32
2	INVERSOR	3	INVERSOR	1	1305.0	747.33	-729.54	17.80

ELO FOZ-IBIUNA-RIO / 1 POLO / INVER-IB SCR=2.3 / INVER-RI SCR=3.0

CASO BASE

RELATORIO DE CONVERSORES DO SISTEMA * ELO 1 * ELO FOZ-IBIUNA-RIO *

CONV	BARRAS	CA	CONTROLE	VALORES	UNID	VALOR	UN	TAP	ANGULO
NUM.	NUM.	CC		ATUAIS		ESPEC		ATUAL	DISP/EXT
TIPO	NUM.	NEUTRA							COMUT.
1	85	FOZ-LINK-500	CORRENTE	2610.0	A	2610.0	A	1.005	15.00
RET	1	RETIFICADOR		1566.0	MW				23.10
	4	NEUTRO		836.6	MVAR				
2	86	IBIUNA---345	CORRENTE	-1305.0	A	0.0	A	1.050	17.00 I
INV	2	INVERSOR	FOLGA	-747.3	MW				13.00
	5	NEUTRO		333.7	MVAR				
3	87	RIO 500	CORRENTE	-1305.0	A	-1305.0	A	0.997	22.00 I
INV	3	INVERSOR		-729.5	MW				14.17
	6	NEUTRO		414.7	MVAR				

Apêndice C

Este apêndice inclui:

- arquivos de cálculo das constantes do modelo linear multiterminal implantado no programa MATLAB;
- arquivo de cálculo do valor final e erro de regime permanente da resposta a degrau do modelo linear multiterminal implantado no programa MATLAB;
- arquivos de cálculo iterativo dos índices de desempenho da resposta a degrau do modelo linear multiterminal implantado no programa MATLAB.

```

% -----
%           Cálculo das Constantes da
% -----Matriz de Funções de Transferência-----
%           do Sistema Multiterminal
% -----
%
%
% Autora : Ivone Maria de Oliveira
%
%
help dadobloc

%
%*****Parâmetros Elétricos*****
%

% FOZ %
RcFO=5.86;
rcvFO=0.14;
raFO=0.00;
rcc1=10.47;
lcvFO=0.04;
laFO=0.27;
lcc1=0.69;
% IBIUNA %
raIB=0.00;
rcvIB=0.13;
RcIB=5.43;
laIB=0.27;
lcvIB=0.03;
XcIB=5.69;
RsIB=2.86;
XsIB=32.73;
XfIB=297.60;
% RIO %
rcc2=10.50;
raRI=0.00;
rcvRI=0.48;
RcRI=14.82;
lcc2=.490;
laRI=0.27;
lcvRI=0.08;
XcRI=15.50;
RsRI=9.25;
XsRI=105.5;
XfRI=568.20;

```

%
 %*****Condições Iniciais*****
 %

% FOZ %
 UdoFO0=172;
 AFO0=15*pi/180;
 IdFO0=2.610;
 % IBIUNA %
 UdoIB0=164.7;
 BIB0=(17+13)*pi/180;
 IdIB0=1.30;
 FPIB=0.91;
 UacIB0=122;
 NIB0=1.0;
 TIB=345/122;
 UinfIB0=0.986*345;
 % RIO %
 UdoRIO=322.0;
 ARI0=(180-14.2-22)*pi/180;
 IdRIO=1.30;
 FPRI=0.87;
 UacRIO=238.5;
 NRI0=1.0;
 TRI=500/238.5;
 UinfRIO=1.009*500;

%
 %*****Parâmetros de Controle*****
 %

K1=16.72;
 K2=0.68;
 K3=14.40;
 K4=0.70;

%
 %*****Constantes para 1 pólo*****
 %

R1=4*rcvFO+raFO+rccl;
 L1=4*lcvFO+laFO+lcc1;
 R2=rccl2+raRI+2*rcvRI;
 L2=lcc2+laRI+2*lcvRI;

 RETFO=4*UdoFO0*sin(AFO0);
 RCFO=4*RcFO;



```

RCIB=4*RcIB;
RIB=raIB+4*rcvIB+RCIB;
LIB=laIB+4*lcvIB;
INVIB=4*UdoIB0*sin(BIB0);
INVUacIB=4*3*sqrt(2)*cos(BIB0)/pi;
MIIdIB=2*RcIB/(UdoIB0*sin(BIB0));
MIUacIB=2*RcIB*IdIB0/(UacIB0*UdoIB0*sin(BIB0));
q1IB=(1-XsIB/XfIB)^2+(RsIB/XfIB)^2;
ZsIB=sqrt((RsIB^2)+(XsIB^2));
q2IB=sqrt(3)*(XsIB-(ZsIB^2/XfIB));
q3IB=sqrt(3)*RsIB;
D0IB=acos(FPIB);
q4IB=q2IB*sin(D0IB)+q3IB*cos(D0IB);
q5IB=(q2IB*cos(D0IB)/sin(D0IB))-q3IB;
NIB=NIB0*TIB;
Q1IB=2*NIB^2*q1IB*UacIB0+2*sqrt(6)*q4IB*IdIB0/pi-
sqrt(12)*q5IB*XcIB*IdIB0^2/(UacIB0*pi);
Q2IB=2*sqrt(6)*q4IB*UacIB0/pi+36*ZsIB^2*IdIB0/(pi^2*NIB^2)+sqrt(12)*q5IB*XcIB*Id
IB0/pi;
QIB=1/Q1IB;
UINFIB=2*UinfIB0;

```

```

RCRI=2*RcRI;
INVRI=2*UdoRI0*sin(ARI0);
INVUacRI=2*3*sqrt(2)*cos(ARI0)/pi;
q1RI=(1-XsRI/XfRI)^2+(RsRI/XfRI)^2;
ZsRI=sqrt((RsRI^2)+(XsRI^2));
q2RI=sqrt(3)*(XsRI-(ZsRI^2/XfRI));
q3RI=sqrt(3)*RsRI;
D0RI=acos(FPRI);
q4RI=q2RI*sin(D0RI)+q3RI*cos(D0RI);
q5RI=(q2RI*cos(D0RI)/sin(D0RI))-q3RI;
NRI=NRIO*TRI;
Q1RI=2*NRI^2*q1RI*UacRI0+2*sqrt(6)*q4RI*IdRI0/pi-
sqrt(12)*q5RI*XcRI*IdRI0^2/(UacRI0*pi);
Q2RI=2*sqrt(6)*q4RI*UacRI0/pi+36*ZsIB^2*IdRI0/(pi^2*NRI^2)+sqrt(12)*q5RI*XcRI*Id
RI0/pi;
QRI=1/Q1RI;
UINFRI=2*UinfRI0;

```

```

%
%*****Fim*****
%
```

```

% -----
%           Diagrama de Blocos
% -----Controle Proporcional-----
%           do Sistema Multiterminal
% -----
%
%
% Autora : Ivone Maria de Oliveira
%
%
help blocopr

dadobloc

%
%*****Diagrama de Blocos*****
%

K4=0.7;

R1=RCFO+R1;
L1=L1;
R2=R2;
L2=L2;

FON=RETFO*somapoli(K1,conv(K2,[1 0]));
FOD=conv([L1 R1],[1 0]);

L1N=1;
L1D=[L1 R1];

L2N=1;
L2D=[L2 R2];

RIB=RIB-INVIB*MIIdIB-QIB*Q2IB*(INVIB*MIUacIB+INVUacIB);
IBN=[LIB RIB];
IBD=1;

RIN=RCRI+INVUacRI*QRI*Q2RI;
RID=1;

GN1=conv(conv(FOD,IBD),RID);
GN=conv(conv(GN1,L1D),L2D);
A1=conv(conv(FON,IBD),RID);
A=conv(conv(A1,L1D),L2D);
B1=conv(conv(FOD,IBN),RID);
B=conv(conv(B1,L1N),L2D);

```

```

C2=conv(conv(FOD,IBD),L1D);
C1=conv(FON,conv(IBD,L1D));
C=conv(RIN,somapoli(C2,C1));
D3=conv(conv(FOD,RID),L1D);
D2=conv(conv(FON,RID),L1D);
D1=conv(conv(FOD,RIN),L1N);
D=conv(IBN,somapoli(somapoli(D3,D2),D1));
E=conv(L2N,somapoli(C,D));
F3=conv(conv(conv(FOD,IBD),RID),L1D);
F2=conv(conv(conv(FON,IBD),RID),L1D);
F1=conv(conv(conv(FOD,IBN),RID),L1N);
F=conv(L2N,somapoli(somapoli(F3,F2),F1));
K=K4*INVRI;

```

```

GN=GN;
GD1=somapoli(somapoli(somapoli(GN,A),B),E);
GD=somapoli(GD1,K*F);

```

```

DS=GD1
NS=INVRI*F

```

```

G11N4=conv(conv(IBD,RID),L2D);
G11N3=conv(conv(IBD,RIN),L2N);
G11N2=conv(conv(IBN,RID),L2N);
G11N1=K*conv(conv(IBD,RID),L2N);
G11N=conv(FON,somapoli(somapoli(somapoli(G11N4,G11N3),G11N2),G11N1));
G11D=conv(GN1,L2D);
G12N=K*conv(conv(L1N,L2N),IBN);
G12D=conv(conv(L1D,L2D),IBD);
G21N=conv(conv(L2N,IBN),FON);
G21D=conv(conv(L2D,IBD),FOD);
G22N1=conv(conv(FOD,IBN),L1N);
G22N=K*conv(L2N,somapoli(somapoli(C2,C1),G22N1));
G22D=conv(conv(conv(FOD,IBD),L1D),L2D);

```

```
diagbloc
```

```

%
%*****Fim*****
%
```

```

% -----
%           Diagrama de Blocos
% -----Controle Proporcional-Integral-----
%           do Sistema Multiterminal
% -----
%
%
% Autora : Ivone Maria de Oliveira
%
%
help blocopi

dadobloc

%
%*****Diagrama de Blocos*****
%

K3=14.40;
K4=0.7;

R1=RCFO+R1;
L1=L1;
R2=R2;
L2=L2;

FON=RETFO*somapoli(K1,conv(K2,[1 0]));
FOD=conv([L1 R1],[1 0]);

L1N=1;
L1D=[L1 R1];

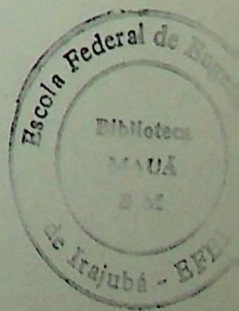
L2N=1;
L2D=[L2 R2];

RIB=RIB-INVIB*MII dIB-QIB*Q2IB*(INVIB*MIUacIB+INVUacIB);
IBN=[LIB RIB];
IBD=1;

RIN=RCRI+INVUacRI*QRI*Q2RI;
RID=1;

KN1=INVRI*conv(K4,[1 0]);
KN=somapoli(INVRI*K3,KN1);
KD=[1 0];

```



```

GN1=conv(conv(FOD,IBD),RID);
GN=conv(conv(GN1,L1D),L2D);
A1=conv(conv(FON,IBD),RID);
A=conv(conv(A1,L1D),L2D);
B1=conv(conv(FOD,IBN),RID);
B=conv(conv(B1,L1N),L2D);
C2=conv(conv(FOD,IBD),L1D);
C1=conv(FON,conv(IBD,L1D));
C=conv(RIN,somapoli(C2,C1));
D3=conv(conv(FOD,RID),L1D);
D2=conv(conv(FON,RID),L1D);
D1=conv(conv(FOD,RIN),L1N);
D=conv(IBN,somapoli(somapoli(D3,D2),D1));
E=conv(L2N,somapoli(C,D));
F3=conv(conv(conv(FOD,IBD),RID),L1D);
F2=conv(conv(conv(FON,IBD),RID),L1D);
F1=conv(conv(conv(FOD,IBN),RID),L1N);
F=conv(L2N,somapoli(somapoli(F3,F2),F1));

```

```

GN=conv(KD,GN);
GD2=somapoli(somapoli(A,B),E);
GD1=somapoli(GN,conv(KD,GD2));
GD=somapoli(GD1,conv(KN,F));

```

```

DS=somapoli(GD1,conv(KN1,F))
NS=INVRI*F

```

```

G11N4=conv(KD,conv(conv(IBD,RID),L2D));
G11N3=conv(KD,conv(conv(IBD,RIN),L2N));
G11N2=conv(KD,conv(conv(IBN,RID),L2N));
G11N1=conv(KN,conv(conv(IBD,RID),L2N));
G11N=sompoli(FON,somapoli(somapoli(somapoli(G11N4,G11N3),G11N2),G11N1));
G11D=conv(KD,conv(GN1,L2D));
G12N=conv(KN,conv(conv(L1N,L2N),IBN));
G12D=conv(KD,conv(conv(L1D,L2D),IBD));
G21N=conv(conv(L2N,IBN),FON);
G21D=conv(conv(L2D,IBD),FOD);
G22N1=conv(conv(FOD,IBN),L1N);
G22N=conv(KN,conv(L2N,somapoli(somapoli(C2,C1),G22N1)));
G22D=conv(KD,conv(conv(conv(FOD,IBD),L1D),L2D));

```

```
diagbloc
```

```
%
```

```
%*****Fim*****
```

```

% -----
%   Cálculo Iterativo de Índices de Desempenho
% -----da Variável Controlada IdRI -----
%   Sistema Multiterminal com Controle Proporcional
% -----
%
%
% Autora : Ivone Maria de Oliveira
%
%

help indicepr

dadobloc

%
%*****Diagrama de Blocos*****
%

R1=RCFO+R1;
L1=L1;
R2=R2;
L2=L2;

FON=RETFO*somapoli(K1,conv(K2,[1 0]));
FOD=conv([L1 R1],[1 0]);

L1N=1;
L1D=[L1 R1];

L2N=1;
L2D=[L2 R2];

RIB=RIB-INVIB*MIIdIB-QIB*Q2IB*(INVIB*MIUacIB+INVUacIB);
IBN=[LIB RIB];
IBD=1;

RIN=RCRI+INVUacRI*QRI*Q2RI;
RID=1;

GN1=conv(conv(FOD,IBD),RID);
GN=conv(conv(GN1,L1D),L2D);
A1=conv(conv(FON,IBD),RID);
A=conv(conv(A1,L1D),L2D);
B1=conv(conv(FOD,IBN),RID);
B=conv(conv(B1,L1N),L2D);

```

```

C2=conv(conv(FOD,IBD),L1D);
C1=conv(FON,conv(IBD,L1D));
C=conv(RIN,somapoli(C2,C1));
D3=conv(conv(FOD,RID),L1D);
D2=conv(conv(FON,RID),L1D);
D1=conv(conv(FOD,RIN),L1N);
D=conv(IBN,somapoli(somapoli(D3,D2),D1));
E=conv(L2N,somapoli(C,D));
F3=conv(conv(conv(FOD,IBD),RID),L1D);
F2=conv(conv(conv(FON,IBD),RID),L1D);
F1=conv(conv(conv(FOD,IBN),RID),L1N);
F=conv(L2N,somapoli(somapoli(F3,F2),F1));
GD1=somapoli(somapoli(somapoli(GN,A),B),E);
DS=GD1;
G11N4=conv(conv(IBD,RID),L2D);
G11N3=conv(conv(IBD,RIN),L2N);
G11N2=conv(conv(IBN,RID),L2N);
G11D=conv(GN1,L2D);

%
%*****Dados para resposta a degrau*****
%

IrefRI = 0.065;
t = [0:0.002:0.5]';

K4I = 0.14; DK4 = 0.02; K4F = 1.5;
K4 = K4I:DK4:K4F; contmax = length(K4);

%
%*****Início da Malha Iterativa*****
%

cont=0;
while(cont<contmax);
    cont=cont+1;
    K=K4(cont)*INVRI;
disp('Iteração = '); disp(cont);
    GD=somapoli(GD1,K*F);
    NS=INVRI*F;

    G11N1=K*conv(conv(IBD,RID),L2N);
    G11N=conv(FON,somapoli(somapoli(somapoli(G11N4,G11N3),G11N2),G11N1));
    G12N=K*conv(conv(L1N,L2N),IBN);
    G12D=conv(conv(L1D,L2D),IBD);

```

```
G21N=conv(conv(L2N,IBN),FON);
G21D=conv(conv(L2D,IBD),FOD);
G22N1=conv(conv(FOD,IBN),L1N);
G22N=K*conv(L2N,somapoli(somapoli(C2,C1),G22N1));
G22D=conv(conv(conv(FOD,IBD),L1D),L2D);
```

```
NMF22=conv(GN,G22N);
DMF22=conv(GD,G22D);
```

```
%
%*****Cálculo dos Índices*****
%
```

```
IdRI = IrefRI*step(NMF22,DMF22,t);
IN22 = length(NMF22); ID22 = length(DMF22);
IdRIrp = IrefRI*NMF22(IN22-1)/DMF22(ID22-1);
eIdRIrp(cont) = IrefRI - IdRIrp;
desemp = caracd(t,IdRI,IdRIrp,0.02);
tpIdRI(cont) = desemp(2);
moIdRI(cont)= desemp(3);
tsIdRI(cont) = desemp(4);
```

```
end
```

```
%
%*****Gráficos*****
%
```

```
disp('K4 tpIdRI moIdRI tsIdRI eIdRIrp')
A = [ K4' tpIdRI' moIdRI' tsIdRI' eIdRIrp']; disp(A)
```

```
whitebg;
subplot(221);
plot(K4,tpIdRI); grid; xlabel('K4'); ylabel('Tempo de Pico')
subplot(222);
plot(K4,moIdRI); grid; xlabel('K4'); ylabel('Overshoot')
subplot(223);
plot(K4,tsIdRI); grid; xlabel('K4'); ylabel('Tempo de Acomodação')
subplot(224);
plot(K4,eIdRIrp); grid; xlabel('K4'); ylabel('Erro Regime Permanente')
```

```
%
%*****Fim*****
```

```

% -----
% Cálculo Iterativo de Índices de Desempenho
% -----da Variável Controlada IdRI -----
% Sistema Multiterminal com Controle PI
% -----
%
%
% Autora : Ivone Maria de Oliveira
%
%

help indicepi

dadobloc

%
%*****Diagrama de Blocos*****
%

K4=0.7;

R1=RCFO+R1;
L1=L1;
R2=R2;
L2=L2;

FON=RETFO*somapoli(K1,conv(K2,[1 0]));
FOD=conv([L1 R1],[1 0]);

L1N=1;
L1D=[L1 R1];

L2N=1;
L2D=[L2 R2];

RIB=RIB-INVIB*MII dIB-QIB*Q2IB*(INVIB*MIUacIB+INVUacIB);
IBN=[LIB RIB];
IBD=1;

RIN=RCRI+INVUacRI*QRI*Q2RI;
RID=1;

KN1=INVRI*conv(K4,[1 0]);
KD=[1 0];

GN1=conv(conv(FOD,IBD),RID);
GN=conv(conv(GN1,L1D),L2D);

```

```

A1=conv(conv(FON,IBD),RID);
A=conv(conv(A1,L1D),L2D);
B1=conv(conv(FOD,IBN),RID);
B=conv(conv(B1,L1N),L2D);
C2=conv(conv(FOD,IBD),L1D);
C1=conv(FON,conv(IBD,L1D));
C=conv(RIN,somapoli(C2,C1));
D3=conv(conv(FOD,RID),L1D);
D2=conv(conv(FON,RID),L1D);
D1=conv(conv(FOD,RIN),L1N);
D=conv(IBN,somapoli(somapoli(D3,D2),D1));
E=conv(L2N,somapoli(C,D));
F3=conv(conv(conv(FOD,IBD),RID),L1D);
F2=conv(conv(conv(FON,IBD),RID),L1D);
F1=conv(conv(conv(FOD,IBN),RID),L1N);
F=conv(L2N,somapoli(somapoli(F3,F2),F1));

GN=conv(KD,GN);
GD2=somapoli(somapoli(A,B),E);
GD1=somapoli(GN,conv(KD,GD2));

DS=somapoli(GD1,conv(KN1,F))
NS=INVRI*F

G11N4=conv(KD,conv(conv(IBD,RID),L2D));
G11N3=conv(KD,conv(conv(IBD,RIN),L2N));
G11N2=conv(KD,conv(conv(IBN,RID),L2N));
G11D=conv(KD,conv(GN1,L2D));
G12D=conv(KD,conv(conv(L1D,L2D),IBD));
G21N=conv(conv(L2N,IBN),FON);
G21D=conv(conv(L2D,IBD),FOD);
G22N1=conv(conv(FOD,IBN),L1N);
G22D=conv(KD,conv(conv(conv(FOD,IBD),L1D),L2D));

%
%*****Dados para resposta a degrau*****
%

IrefRI = 0.065;
t = [0:0.0005:0.5]';

K3I = 0.8; DK3 = 0.2; K3F = 40;
K3 = K3I:DK3:K3F; contmax = length(K3);

```

INDICEPI.M

```

%
%*****Início da Malha Iterativa*****
%

cont=0;
while(cont<contmax);
    cont=cont+1;
    KN=somapoli(INVRI*K3(cont),KN1);
disp('Iteração = '); disp(cont);

    GD=somapoli(GD1,conv(KN,F));
    G11N1=conv(KN,conv(conv(IBD,RID),L2N));
    G11N=conv(FON,somapoli(somapoli(somapoli(G11N4,G11N3),G11N2),G11N1));
    G12N=conv(KN,conv(conv(L1N,L2N),IBN));
    G22N=conv(KN,conv(L2N,somapoli(somapoli(C2,C1),G22N1)));

    NMF22=conv(GN,G22N);
    DMF22=conv(GD,G22D);

%
%*****Cálculo dos Índices*****
%

IdRI = IrefRI*step(NMF22,DMF22,t);
IN22 = length(NMF22); ID22 = length(DMF22);
IdRIrp = IrefRI*NMF22(IN22-2)/DMF22(ID22-2);
eIdRIrp(cont) = IrefRI - IdRIrp;
desemp = caracrd(t,IdRI,IdRIrp,0.02);
tpIdRI(cont) = desemp(2);
moIdRI(cont)= desemp(3);
tsIdRI(cont) = desemp(4);

end

%
%*****Gráficos*****
%

disp('K3  tpIdRI  moIdRI  tsIdRI  eIdRIrp')
A = [ K3' tpIdRI'  moIdRI'  tsIdRI'  eIdRIrp']; disp(A)
disp('Digite qualquer tecla para continuar')
%pause

```

INDICEPI.M

```
whitebg;  
subplot(221);  
plot(K3,tpIdRI); grid; xlabel('K3'); ylabel('Tempo de Pico')  
subplot(222);  
plot(K3,moIdRI); grid; xlabel('K3'); ylabel('Overshoot')  
subplot(223);  
plot(K3,tsIdRI); grid; xlabel('K3'); ylabel('Tempo de Acomodação')  
  
%  
% *****Fim*****  
%
```

