TESE
377

ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA/CC, DESACOPLADA, EM SISTEMAS DE POTÊNCIA — ESTUDO PARA ITAIPU.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OSMAR MORAES COSTA

— 1983 —

OSMAR MORAES COSTA

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA/CC, DESACOPLADA, EM SISTEMAS DE POTENCIA - ESTUDO PARA ITAIPU

Orientador: Prof. Hector Arango
Co-Orientador: M.C. Paulo Abreu Leitão de Almeida

Trabalho de Dissertação apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Itajubá, out. 1983

CLASS. 621.3.024/.025: 621.316(043.2)
CUTT. C 837e
TOMBO 374

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 259 de 21 / 09/ 83, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Estimação estática de estado integrada CA/CC, desacoplada em sistemas de potência - Estudo para Itaipu".

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registros Acadêmicos) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à OSMAR MORAES COSTA.

Itajubá, 01 de outubro de 1983.

1º Examinador
Engº Paulo Abreu Leitão de Almeida
ELETROBRÁS

2º Examinador
Profº Djalma Mosqueira Falcão
- COPPE

3º Examinador
Prof. Júlio César Tibúrcio
EFEI

4º Examinador
Prof. Hector Arango
EFEI

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Estimação estática de estado integrada CA/CC, desacoplada em sistemas de potência - Estudo para Itaipu".

Autor: OSMAR MORAES COSTA

JULGAMENTO

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

Resultado médio: Conceito A, ou seja Aprovado

Observações:

Itajubá, 01 de outubro de 1983.

1º Examinador
Engº. Paulo Abreu Leitão de Almeida
ELETROBRÁS

2º Examinador
Prof. Djalma Mosqueira Falcão
COPPE

3º Examinador
Prof. Júlio César Tibúrcio
EFEI

4º Examinador
Prof. Hector Arango
EFEI

Viemos aqui para rir ou chorar?

Estamos morrendo ou nascendo?

Terra Nostra
Carlos Fuentes

AGRADECIMENTOS

Ao digníssimo Prof. Hector Arango, cuja colaboração como Orientador Acadêmico na EFEI (Escola Federal de Engenharia de Itajubá) muito tem contribuído para o desenvolvimento da pesquisa em nosso país, sem o qual também este trabalho não teria sido desenvolvido.

Ao caríssimo M. C. Paulo Abreu Leitão de Almeida, da ELETROBRÁS S.A., pela participação para o sucesso deste trabalho e cujo respaldo técnico, em parte da pesquisa, permitiu toda a estruturação da Tese.

Aos professores da Comissão de Pós-Graduação da EFEI, pela colaboração e incentivo que tornaram possível a execução de mais este trabalho.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e à ELETROBRÁS S.A., pelo suporte econômico, que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa.

Ao grande amigo M. C. Guilherme Jorge de Moraes Velho, da ELETROBRÁS S.A., cuja colaboração na definição do tema a desenvolver foi fundamental.

Ao amigo Engº Luiz Alves Correa da Silva, de FURNAS - Centrais Elétricas S.A., pelo material de consulta afim, referido, que foi gentilmente obtido, sem medir os esforços necessários para tal.

A todo o pessoal do CPD da EFEI, que tem sempre auxiliado aos tesistas, ao longo da implementação computacional

dos trabalhos.

Às Srtas. Márcia Storino e Júlia Maria Miranda, da Secretaria da CPG, pela amizade e carinho dedicados aos alunos, o que realmente sensibiliza-nos.

Aos meus familiares e amigos que, embora distantes fisicamente, estiveram prontos a atender aos apelos inerentes à firmação do profissional pelo seu trabalho.

A todos aqueles itajubenses, "nativos ou não", amigos verdadeiros, que se isentaram e, num gesto de amizade, incentivaram-me na consumação de um ideal.

(pelo universalismo das nossas idéias e
pelo fraternalismo das nossas opiniões)

ao meu Pai, à minha Mãe e
aos meus Irmãos.

INDICE

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 - ASPECTOS GERAIS DA ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA 1.3

1.1.1 - Necessidade da Estimação Estática de Estado para os Grandes Sistemas Interligados 1.3

1.1.2 - Necessidade da Inclusão do Elo de Corrente Contínua de Itaipu na Estimação Estática de Estado 1.4

1.2 - ANTECEDENTES HISTÓRICOS 1.5

1.2.1 - Trabalhos apresentados para a Estimação Estática de Estado como um todo 1.5

1.2.2 - Caso Específico da Estimação Estática de Estado do Elo de Corrente Contínua de Itaipu 1.6

1.3 - OBJETIVO PRINCIPAL DA TESE 1.7

1.3.1 - Introdução 1.7

1.3.2 - Descrição Sucinta dos Capítulos Posteriores 1.8

1.3.3 - Descrição Sucinta dos Apêndices 1.9

LISTA DE SÍMBOLOS PRINCIPAIS LS.1

CAPÍTULO 2 - ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC, DESACOPLADA, DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS

2.1 - INTRODUÇÃO 2.2

2.2 - ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS 2.2

2.2.1 - Introdução 2.3

2.2.2 - Formulação Geral da Estimação Estática de Estado dos Mínimos Quadrados Ponderados 2.3

2.3 - ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC, DESACOPLADA - ALGORITMO UTILIZADO 2.4

2.3.1 - Introdução 2.4

2.3.1 - O Desacoplamento do Modelo 2.5

2.3.3 - Técnicas do Desacoplamento para a Dedução dos Jacobianos de Foz do Iguaçu e São Roque 2.6

2.3.3.1 - Introdução 2.6

2.3.3.2 - Técnicas do Desacoplamento para a dedução dos Jacobianos de Foz do Iguaçu e de São Roque 2.6

2.3.4 - Algoritmo Utilizado para a Estimação Integrada CA-CC 2.9

2.3.4.1 - Introdução 2.9

2.3.4.2 - Algoritmo Utilizado 2.9

CAPÍTULO 3 - INCLUSÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU NA ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC, DESACOPLADA, EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.1 - INTRODUÇÃO 3.2

3.1.1 - Descrição Sucinta do Capítulo 3.2

3.1.2 - Introdução ao Modelo Básico de Análise 3.3

3.2 - HIPÓTESES BÁSICAS PARA O MODELO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA 3.6

3.2.1 - Introdução 3.6

3.2.2 - Requisitos Necessários para as Medidas 3.6

3.2.2.1 - Condições de Observabilidade Mínima 3.6

3.2.2.2 - Condições de Redundância das Telemedidas 3.8

3.3 - DESENVOLVIMENTO DO MODELO TEÓRICO 3.8

3.3.1 - Introdução 3.8

3.3.2 - Sistema Equivalente Idealizado 3.9

3.3.3 - Estado do Elo de Corrente Contínua para a Estimação Estática de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada 3.11

3.3.4 - Equações das Medidas do Sistema Integrado CA-CC 3.12

3.3.4.1 - Introdução 3.12

3.3.4.2 - Localização das Medidas 3.12

3.3.4.3 - Equações das Medidas do Sistema Integrado CA-CC 3.15

3.4 - REQUISITOS FÍSICOS OPERACIONAIS 3.16

3.4.1 - Introdução 3.16

3.4.2 - Condições Físicas Operacionais sob Análise 3.18

3.4.3 - Casos considerados sob contingências 3.32

CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU E TESTES

4.1 - INTRODUÇÃO 4.2

4.2 - APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO PARA TESTES NO FLUXO DE CARGA CC 4.2

4.2.1 - Modelo Equivalente utilizado para o Fluxo de Carga CC para a determinação do Caso Base 4.3

4.2.2 - Fluxograma Simplificado para o Fluxo de Carga CC 4.5

4.2.3 - Lista de Variáveis utilizadas pela implementação computacional para o Fluxo de Carga CC 4.6

4.2.4 - Apresentação dos Resultados para o Fluxo de Carga CC 4.7

4.3 - APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO PARA TESTES NO ESTIMADOR INTEGRADO CA-CC 4.21

4.3.1 - Sistema Elétrico e Sistema de Medição Associado 4.21

4.3.2 - Fluxograma Simplificado para o Estimador Integrado CA-CC 4.23

4.3.3 - Lista de Variáveis utilizadas pela implementação computacional para o Estimador Integrado CA-CC 4.24

4.3.4 - Apresentação dos Resultados para o Estimador Integrado CA-CC 4.27

4.4 - ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA O ESTIMADOR INTEGRADO CA-CC NOS 3 CASOS TESTES SIMULADOS 4.56

4.4.1 - Análise dos Resultados 4.56

4.4.2 - Comparação dos Resultados 4.59

4.5 - INDICADORES DE PERFORMANCE DO ESTIMADOR ESTÁTICO DO ESTADO INTEGRADO CA-CC, DESACOPLADO 4.60

4.5.1 - Resíduos da Estimação 4.61

4.5.2 - Valores das Funções de Custo 4.61

CAPÍTULO 5 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

5.1 - INTRODUÇÃO 5.2

5.2 - COMENTÁRIOS 5.2

5.3 - CONCLUSÕES 5.3

5.3.1 - Conclusões do trabalho, propriamente 5.3

5.3.2 - Sugestões para trabalhos futuros 5.4

APÊNDICE A - INCLUSÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU NO FLUXO DE CARGA

A.1 - INTRODUÇÃO A.2

A.2 - MODELAGEM DO CONVERSOR CA-CC A.2

A.3 - CONDIÇÕES DE CONTORNO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU A.3

A.4 - INCLUSÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA NO FLUXO DE CARGA A.4

A.5 - REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A INCLUSÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU NO FLUXO DE CARGA E ALGORITMO UTILIZADO A.6

APÊNDICE B - ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC, DESACOPLADA, EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

B.1 - INTRODUÇÃO B.2

B.2 - OS VETORES DE ESTADO E DE MEDIDAS B.2

B.2.1 - Para o Elo de Corrente Contínua de Itaipu B.2

B.2.1.1 - O Vetor de Estado B.2

B.2.1.2 - O Vetor de Medidas B.3

B.2.2 - Para o Sistema Integrado CA-CC B.3

B.2.2.1 - O Vetor de Estado B.3

B.2.2.2 - O Vetor de Medidas B.4

B.2.3 - Condições de Redundância dos Sistemas B.4

B.2.3.1 - Condição de Redundância em FOZ B.4

B.2.3.2 - Condição de Redundância em SRQ B.5

B.2.3.3 - Condições de Redundância no Sistema Integrado CA-CC B.6

B.3 - MATRIZ JACOBIANA DO SISTEMA INTEGRADO CA-CC B.6

B.3.1 - Matriz Jacobiana para FOZ B.6

B.3.2 - Matriz Jacobiana para SRQ B.8

B.3.3 - Matriz Jacobiana para o Sistema Integrado CA-CC B.11

B.4 - ALGORITMO DO ESTIMADOR INTEGRADO CA-CC UTILIZADO, OBTENÇÃO DAS MATRIZES "G" E CÁLCULO DOS RESÍDUOS DA ESTIMAÇÃO E DA FUNÇÃO DE CUSTO B.12

B.4.1 - Algoritmo do Estimador Integrado CA-CC, Desacoplado B.12

B.4.2 - Obtenção da Matriz "G" para o Sistema Integrado CA-CC, Desacoplado B.15

B.4.3 - Cálculo dos Resíduos da Estimação e da Função de Custo B.15

B.4.3.1 - Resíduos da Estimação B.16

B.4.3.2 - Cálculo das Funções de Custo B.17

APÊNDICE C - DEDUÇÃO DOS MODELOS DAS MEDIDAS - SISTEMAS POR UNIDADE

C.1 - INTRODUÇÃO C.2

C.2 - DEDUÇÃO DAS MEDIDAS CC C.2

C.3 - DEDUÇÃO DAS MEDIDAS CA C.5

C.3.1 - Medidas CA em FOZ C.5

C.3.2 - Medidas CA em SRQ C.6

C.4 - INTERDEPENDÊNCIA DAS MEDIDAS CA E CC C.8

C.5 - SISTEMAS POR UNIDADE C.10

REFERÊNCIAS R.1

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho concentra os esforços de pesquisa em um tema bastante atualizado, no que se refere aos grandes sistemas de potência modernos, interligados.

Tudo iniciou com a linha de transmissão somente, radial, uma carga e nada mais. Em seguida, uma nova linha, um outro consumidor, um outro mais (...). Surgiu assim o sistema em anel como alternativa de alimentação no momento de uma contingência, ampliando a confiabilidade no suprimento e a redundância na incerteza. E os sistemas cresceram, as interligações multiplicaram-se, aumentando em muitas vezes a complexidade do Controle e criando situações bem complexas que, sem o auxílio dos computadores e dos recursos de software existentes, fugiria do alcance da nossa capacidade de atender, simultaneamente, tantas situações adversas. Felizmente, criou-se o ferramental necessário a simular o problema, previamente, possibilitando assim a criação de instrumentos necessários ao restabelecimento do sistema sob contingência e - o mais importante - preparar os pacotes de decisão entregues à Operação do sistema, antes que a falha ocorresse. Por esta razão, a Supervisão da Rede se fez necessária, instrumento que conjugou as necessidades dos operadores do sistema de restabelecerem as partes faltosas e ampliou a confiabilidade dos sistemas.

Dado que a Supervisão da Rede pressupõe o conhecimento do status dos equipamentos associados, cujas características são normalmente telemedidas e enviadas ao Centro de Con-

trole dos Sistemas, é simples concluir que, se se conhecer de antemão todo o status do sistema: status das chaves, dos disjuntores, posição dos taps, etc., diante das diversas configurações, é possível estimar o Estado dos sistemas previamente. Daí originar-se a Estimação Estática de Estado, objetivo deste trabalho.

A seguir, analisa-se os Aspectos Gerais da Estimação Estática de Estado em Sistemas de Potência, momento em que, além de indicar-se a Necessidade da Estimação de Estado para os Grandes Sistemas Interligados, aborda-se a Necessidade da Inclusão do Elo de Corrente Contínua de Itaipu na Estimação de Estado. Em seguida, discorre-se acerca dos Antecedentes Históricos para a Estimação de Estado como um todo para, depois, enfocar-se o Caso Específico da Estimação Estática de Estado do Elo de Corrente Contínua de Itaipu. Finalmente, num outro item, apresenta-se a Descrição Sucinta dos Capítulos Posteriores bem como dos 3 Apêndices que compõem a Dissertação.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

1.1 - ASPECTOS GERAIS DA ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

1.1.1 - Necessidade da Estimação Estática de Estado para os Grandes Sistemas Interligados

Os Sistemas de Energia Elétrica têm crescido no Brasil e a necessidade premente de centralizar as decisões nos diversos Centros de Operação dos Sistemas do país é básica, para que se opere o sistema de transmissão e distribuidor, com segu

rança e uniformidade em todo o país. Assim, por compormos um imenso sistema energético, necessitamos, certamente, supervisioná-lo a todo instante, para obtermos o perfil de Módulos de Tensão e Ângulos de Fase das Tensões de barra, muito rapidamente, seja por Fluxos de Carga em intervalos de tempo pequenos, pré-estabelecidos, seja por estimativas de estado que desenvolve-se ao conhecer algumas configurações de carga, ou de simulações de contingências, para a proteção dos equipamentos de manobra.

Dessa maneira, há uma forma alternativa de analisar-se os sistemas de grande porte em que haja um bom nível de redundância nas telemedições, produzindo estimativas confiáveis, do estado do sistema, tão precisas quanto se queira, que é o procedimento da Estimação Estática de Estado.

1.1.2 - Necessidade da Inclusão do Elo de Corrente Contínua de Itaipu na Estimação Estática de Estado

A Estimação Estática de Estado visa produzir periodicamente o estado atual do sistema com o objetivo de atingir a solução completa da rede e, a partir dela, analisar a segurança do sistema em tempo real, conforme os objetivos do Centro de Supervisão e Controle (C.S.C.) e dos Centros de Operação dos Sistemas (C.O.S.) das empresas controladoras de área.

O Elo de Corrente Contínua de Itaipu vai transportar, em seu 6º e último estágio, 6300 Mw de potência - capacidade considerável no contexto Sul-Sudeste (os

2 maiores do país) - torna-se, de verdade, muito importante sua inclusão no processo de estimação a nível nacional. Isto, porque a simples possibilidade de perda da barra do Inversor, em São Roque, poderá vir comprometer parte do sistema Sul e parte considerável do sistema Sudeste. Por isto, justifica-se a necessidade da inclusão do Elo CC de Itaipu na Estimação Estática do Estado.

1.2 - ANTECEDENTES HISTÓRICOS

É muito importante, nesta altura, ressaltar que, dentre os trabalhos já apresentados para a Estimação Estática de Estado de Sistemas de Potência, este vai representar algo de pioneiro no assunto, já que o Elo de Corrente Contínua de Itaipu reúne características físicas operacionais sui generis que, adiante, assinala-se.

1.2.1 - Trabalhos apresentados para a Estimação Estática de Estado como um todo

Inúmeros trabalhos já foram desenvolvidos, e ainda se encontram em desenvolvimento no assunto, muito sérios e com vasta variedade de propósitos.

A pré-filtragem das medidas, por exemplo, desenvolvida por Schweppe e Handschin, deu partida ao processo da Detecção e Identificação dos Erros Grosseiros. A seguir, a conceituação da Observabilidade dos Sistemas de Potência, utilizando

a Topologia dos mesmos, vem sendo desenvolvida por Krumpholz, Clements e Davis. Além disso, a adoção do desacoplamento rápido aplicado à Estimação de Estado, desenvolvido por A. Garcia, A. Monticelli e P. Abreu, muito tem contribuído no tratamento com os grandes sistemas de potência. Mais recentemente, as técnicas de Rastreamento desenvolvidas por D. M. Falcão, P. A. Cooke e A. Brameller, vêm progredindo e resultará no aperfeiçoamento da estimação de estado em tempo real para os sistemas de potência, bem como a conceituação pesquisada por Van Cutsem, J.L. Howard e M. Ribbens Pavella sobre a Hierarquização dos Sistemas de Potência.

A interpretação básica é o tratamento dado às medidas que, no processo, serão consideradas mais ou menos erradas, de acordo com uma distribuição normal, gaussiana, de Desvio Padrão σ e Média 0, premissas que permitiram o tratamento estatístico da Detecção, Identificação e Eliminação dos Erros Grosseiros, aspectos ainda não enfocados por este trabalho, em particular.

1.2.2 - Caso Específico da Estimação Estática de Estado do Elo de Corrente Contínua de Itaipu

Muitos têm colaborado no desenvolvimento da Estimação Estática de Estado em todo o mundo, embora na grande maioria das vezes, em problemas teóricos propostos, que muito tem contribuído ao progresso da ciência e ao amadurecimento dos

técnicos do setor, estudiosos do assunto.

O nosso problema é um tanto complicado por tratar-se de uma primeira alternativa de pesquisa de um Elo de Corrente Contínua de grande capacidade de transmissão que, praticamente, comunica um grande parque gerador a um imenso centro de carga.

A configuração considerada visa atender uma necessidade primeira de se obter um modelo equivalente convenientemente dos sistemas sob estudo para uma melhor avaliação das consequências decorrentes das contingências que aleatoriamente simulamos. A nossa proposta vai bem delineada, não nos preocupando com resultados imediatistas pois, se assim fosse, todo um trabalho de pesquisa perderia seu sentido. A pesquisa deve prosseguir, adequando às situações, as soluções particulares.

Volta-se, portanto, a atenção, na definição da modelagem física do problema e na elaboração de equivalentes para o caso em estudo, configurando-os adequadamente às necessidades do Estimador para gerar Casos Base realistas. Para isso, implementa-se um Fluxo de Carga CC com o respaldo da conceituação básica de Newton-Raphson, que permita projeções para o Caso Base sob estudo.

1.3 - OBJETIVO PRINCIPAL DA TESE

1.3.1 - Introdução

Todo o trabalho de pesquisa reside em buscar

uma solução a um problema bem definido e que conclua de uma forma concisa porque assim resultou.

O problema em questão é a integração do Elo de Corrente Contínua de Itaipu na formulação geral da Estimação Estática de Estado de Corrente Alternada, analisando todas as implicações envolvidas para a Estimação conjunta CA-CC. Para tal, propõe-se uma modelagem simples do Elo em que, inicialmente, roda-se o Fluxo de Carga CC para gerar o Caso Base a estimar para, subsequentemente, com 7 Medidas para Foz do Iguaçu (FOZ) e 4 Variáveis de Estado (V.E.), obter-se 1.75 de Redundância para FOZ. Analogamente, com 11 Medidas para São Roque (SRQ) e 5 V.E., para obter-se 2.20 de Redundância para SRQ. Assim sendo, ao considerar-se a Ordem de Corrente I_D somente V.E. em FOZ e como parâmetro para SRQ, pode-se desacoplar o Modelo e, com 18 Medidas e 9 V.E., para o Sistema Integrado CA-CC, Desacoplado, obter-se 2.00 de Redundância Global para o Elo CC de Itaipu.

1.3.2 - Descrição Sucinta dos Capítulos Posteriores

Inicialmente, tenciona-se limitar o eventual sucesso ao considerar a Estimação Estática de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, em Sistemas de Potência, no Capítulo 2, onde descreve-se toda a metodologia utilizada, a fim de obter uma boa performance do modelo do Elo CC utilizado, tanto separado, quando conjuntamente ao sistema CA. A seguir, inclui-se o Elo de Corrente Contínua no processo da Estimação Estática de Estado, propriamente, onde modela-se o Elo e o sistema equivalente sob estudo, considerando-se todos os Requisitos Físicos Opera-

cionais, no Capítulo 3. O Capítulo 4 sim, é onde obtém-se os resultados procurados, após diversas simulações e testes das diversas configurações de carga e potência transmitida, com algumas formas de apresentação futuras. Finalmente, no Capítulo 5, conclui-se acerca das simulações e testes realizados comentando, portanto, o algoritmo de tratamento que melhor performance proporcionar, bem como colocando as sugestões para os trabalhos futuros.

1.3.3 - Descrição Sucinta dos Apêndices

O trabalho da Estimação Estática de Estado é, normalmente, árduo, por dever-se considerá-lo, de início, exaustivo, para que se esgote todas as possibilidades de contingências. Aí sim, teremos criado um bom Estimador de Estado. Por esta razão, é conveniente que respaldemos o que for preciso apresentando os diversos recursos necessários. Assim sendo, cuidou-se de gerar 3 Apêndices complementares ao problema da Estimação Estática de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, em Sistemas de Potência.

Inicia-se por considerar a Inclusão do Elo de Corrente Contínua no Fluxo de Carga e analisar todas as modificações introduzidas na Matriz Jacobiana, fornecido pelo Apêndice A. O Apêndice B cuida da Estimação Estática de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, em que apresenta-se as estimações de FOZ e SRQ, separadamente, com seus respectivos Vetores de Estado e de Medidas, terminando por integrar ambas as estimações e considerar, desacopladamente, o Elo CC como um todo. Finalmen

te, apresenta-se no Apêndice C, a Dedução dos Modelos das Medi das CA-CC, assim como uma breve descrição do Sistema por Unida de utilizado.

LISTA DE SÍMBOLOS PRINCIPAIS

LISTA DE SÍMBOLOS PRINCIPAIS

$\dot{U}_R = U_R \angle \Theta_R$ = fasor de Tensão Nodal CA de módulo U_R e Ângulo de Fase Θ_R, da barra CA adjacente ao conversor Retificador;

$\dot{U}_I = U_I \angle \Theta_I$ = fasor de Tensão Nodal CA de módulo U_I e Ângulo de Fase Θ_I, da barra CA adjacente ao conversor Inversor;

$\dot{U}_{TP} = U_{TP} \angle \Theta_{TP}$ = fasor de Tensão Nodal CA de módulo U_{TP} e Ângulo de Fase Θ_{TP}, da barra CA de Tijuco Preto;

U_{GR}, U_{INT} = módulos de Tensões Nodais CA das barras swing do sistema equivalente (1.0 pu);

V_{DR}, V_{DI} = módulos da Tensão Nodal CC dos conversores Retificador e Inversor, respectivamente;

I_D, I_{DN} = ordem de Corrente Contínua e Corrente Contínua Nominal do Elo CC, respectivamente;

Θ_{GR}, Θ_{ITP}, Θ_{IINT} = ângulos de Fase entre as Tensões Nodais CA U_{GR} e U_R, U_I e U_{TP} e U_I e U_{INT}, respectivamente;

t_R, t_I = relações de transformação dos transformadores conversores do conversor Retificador e conversor Inversor, respectivamente;

α_R, γ_I, ϕ_R e ϕ_I = ângulos de Disparo do Conversor Retificador, de Extinção do conversor Inversor e de fatores de potência dos Conversores Retificador e Inversor, respectivamente;

R_D, R_{CR}, R_{CI} = resistência ôhmica da linha de corrente contínua, de comutação do conversor Retificador e de comutação do conversor Inversor, respectivamente;

B_R, B_I, B_{ITP} e B_{IINT} = suscetâncias das linhas do conversor Retificador, do conversor Inversor, entre o Inversor e Tijuco Preto e entre o Inversor e Interlagos, respectivamente;

Y_{FR}, Y_{FI}, Y_{CDI} e Y_{CS} = admitâncias do filtro CA do Retificador, do filtro CA do Inversor, dos capacitores em Derivação e dos Compensadores Síncronos do Inversor, respectivamente;

P_{GR}, Q_{GR}, Q_R = fluxos de potência CA, ativo e reativo entre o gerador e o retificador e fluxo de potência reativo do Retificador devido ao fluxo de potência ativo no Elo CC, respectivamente;

Q_I, P_{IN} e Q_{IN} = fluxo de potência CA, reativo, do Inversor devido ao fluxo de potência ativo no Elo CC e fluxos de potência ativo e reativo, CA, na barra do Inversor, resultantes da composição dos fluxos de potência entre SRQ e Interlagos e SRQ e Tijuco Preto, respectivamente;

P_{ITP}, Q_{ITP}, P_{IINT} e Q_{IINT} = fluxos de potência ativo e reativo, CA, entre o Inversor e Tijuco Preto e o Inversor e Interlagos, respectivamente;

P_{DR}, P_{DI} = fluxos de potência ativo, CC, nos conversores Retificador e Inversor, respectivamente;

V_{DR0}, V_{DI0} = tensão contínua ideal, sem carga, no Retificador e Inversor, respectivamente;

V_{DR0N}, V_{DI0N} = tensão contínua nominal, sem carga, no Retificador e no Inversor, respectivamente;

γ_{min} = ângulo de margem de comutação mínimo;

$\underline{x}$, $\underline{x}_t$ e $\underline{\hat{x}}$ = vetores do estado, do estado verdadeiro e da estimativa ótima, respectivamente;

$\underline{z}$, $\underline{z}_t$ e $\underline{\hat{z}}$ = vetores de medida, de medida verdadeiro e de medida estimado ótimo, respectivamente;

h, h_p, h_q, h_{cc} = funções de variáveis, de mismatches Ativos, de mismatches Reativos e de mismatches de Tensão Contínua, respectivamente;

W, H, J = matrizes de Ponderação, Jacobiana e Função Objetivo, respectivamente;

$G(x)$, $G_{P\theta}$, G_{QV}, G_D = matrizes de sensitividade do sistema integrado

CA-CC, de acoplamento P-θ, acoplamento Q-V e de acoplamento de Corrente Contínua, respectivamente;

$G_1(x)$, $G_2(x)$ = matrizes de Sensitividade para Foz do Iguaçu e São Roque, respectivamente.

μ = ângulo de sobreposição

E = esperança matemática

TC = tolerância de convergência do processo iterativo

GA = ganho do loop

ÍNDICES:

p = denota índice de medida de Potência Ativa;

q' = denota índice de medida de Potência Reativa;

cc = denota índice de medida do Elo de Corrente Contínua;

k = denota número de iteração;

R = denota barra de corrente alternada adjacente ao Retificador;

I = denota barra de corrente alternada adjacente ao Inversor;

D = denota medida de corrente contínua.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2 - ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC, DESACOPLADA, DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS

2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os requisitos necessários para se proceder à Estimação Estática de Estado em Sistemas de Potência, utilizando o método dos Mínimos Quadrados Ponderados.

Inicialmente, trata-se da Estimação Estática de Estado dos Mínimos Quadrados Ponderados, propriamente dita, em que se faz uma breve introdução para, em seguida, abordar os requisitos necessários para a Formulação Geral da mesma, onde são apresentadas as medidas verdadeiras e estimadas para estabelecer a Estimação.

Adiante, é introduzido o conceito do desacoplamento adotado, em que é descrito o algoritmo utilizado - após todas as decisões do desacoplamento serem tomadas - passando por uma breve introdução e desenvolvimento as técnicas do desacoplamento utilizadas, com o cuidado de deixar claro o algoritmo proposto.

2.2 - FORMULAÇÃO GERAL DA ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS

2.2.1 - Introdução

Considerando-se que para operar os grandes sistemas interligados necessita-se antever suas inúmeras condições de operação, procede estimar o estado de todo o sistema e preparar um pacote de decisões a serem tomadas, que vise otimizar a performance dos mesmos. No caso particular do Elo de Corrente Contínua de Itaipu, o problema assume proporções notáveis, devido ao grande transporte de energia envolvido. Por esta razão, descreve-se inicialmente como é formulado o problema da Estimação para, em seguida, enunciar-se a metodologia utilizada com suas respectivas técnicas envolvidas.

2.2.2 - Formulação Geral da Estimação Estática de Estado dos Mínimos Quadrados Ponderados

A formulação geral adotada é a convencional, em que as medidas são relacionadas aos estados verdadeiros do Sistema de Potência, pelas equações não lineares:

$$\underline{z} = h(\underline{x}_t) + \underline{w} \qquad (1)$$

em que: $\underline{x}_t$ é o vetor de estado verdadeiro (n×1)

$\underline{z}$ é o vetor de medida (m×1)

h é uma função não linear (cf. equações (23) à (40))

$\underline{w}$ é o erro da medida (m×1)

O objetivo da Estimação Estática de Estado dos Mínimos Quadrados Ponderados é minimizar a Função Objetivo:

$$J(x) = \{\underline{z} - h(\underline{x})\}^t \, W^{-1} \, \{\underline{z} - h(\underline{x})\} \qquad (2)$$

onde W é a matriz de Covariância de Ruído de Medida, definida como:

$$W = E \{\underline{w} \, \underline{w}^t\} \qquad (3)$$

Pode ser mostrado que a estimativa ótima $\underline{\hat{x}}$ é dada ao resolver iterativamente:

$$\{H^t(\underline{x}_k) \, W^{-1} \, H(\underline{x}_k)\} \, \Delta x_{k+1} = H^t(\underline{x}) \, W^{-1} \, \{\underline{z} - h(\underline{x})\} \qquad (4)$$

até a convergência pelo critério de ajustamento da tolerância $(\underline{x}_{k+1} - \underline{x}_k \leq TC)$, em que $H(x_k)$ é a Matriz Jacobiana do Sistema integrado CA-CC.

2.3 - ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC, DESACOPLADA ALGORITMO UTILIZADO

2.3.1 - Introdução

Neste item discute-se acerca da conceituação utilizada para o desacoplamento de ambas as estimações, de Foz do Iquaçu e de São Roque, cujo desacoplamento fica caracteriza

do ao considerar-se a Ordem de Corrente, I_D, como variável de estado somente para Foz do Iguaçu, tratando-a como parâmetro para o terminal Inversor em São Roque. Em seguida, implementa-se o Algoritmo utilizado para a Estimação Integrada CA-CC.

2.3.2 - O Desacoplamento do Modelo

A Ordem de Corrente, I_D, imposta ao Elo CC é calculada em FOZ e, por considerá-la como V. E. somente neste extremo - onde também a medimos - tratando-a como parâmetro para o outro extremo, em SRQ, permite que desacoplemos o Modelo. A Figura 3.2.2 que abaixo se indica, ilustra tal situação. Então:

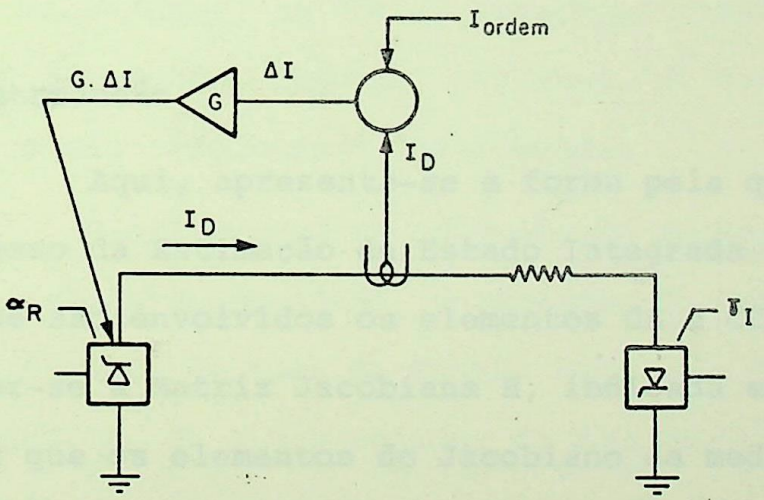


FIG. 2.3.2 - O desacoplamento do Modelo

Observar que, ao expressar a equação da medida da Ordem da Corrente, I_D, a consideraremos como sendo a composição da I_{ordem} mais a variação de I_D com relação ao ganho do loop.

O Desacoplamento do Modelo proposto por este

trabalho implica em economia de memória e tempo computacional para o modelo equivalente adotado, mas que será mais significativo para o caso da consideração de todo o sistema.

Uma outra forma de tratamento, alternativa, seria a consideração do sistema CA-CC, sem desacoplamento, mais a inclusão da medida da Ordem da Corrente no lado de SRQ implicando na alteração da estrutura da Matriz Jacobiana desenvolvida para esta modelagem, embora tal tratamento permitisse uma verificação nas Ordens de Corrente em ambas as extremidades do Elo de Corrente Contínua.

2.3.3 - Técnicas do Desacoplamento para a Dedução dos Jacobianos da Estimação de Foz do Iguaçu e de São Roque

2.3.3.1 - Introdução

Aqui, apresenta-se a forma pela qual será analisado o processo da Estimação de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, em que são envolvidos os elementos CA e CC, conjuntamente, ao buscar-se a Matriz Jacobiana H, indicada em (4). É importante frisar que os elementos do Jacobiano da medida CA são amplamente utilizados, após proceder-se ao desacoplamento, anteriormente descrito, das barras adjacentes aos conversores.

2.3.3.2 - Técnicas do Desacoplamento para a Dedução dos Jacobianos de Foz do Iguaçu e de São Roque

O procedimento adotado para a dedução de ambos os Jacobianos separadamente é o de considerar o conjunto de medidas $\underline{z}$ particionado em medidas de Fluxo de Potência Ativa CA, $\underline{z}_p$, medidas de Fluxo de Potência Reativa CA e medidas de Módu-

los de Tensão Nodal CA, $\underline{z}'_q$, e medidas de Fluxo de Potência Ativa CC, medidas de Tensão Contínua e medidas da Ordem de Corrente Contínua do Elo de Corrente Contínua, $\underline{z}_{cc}$. Assim sendo:

$$\underline{z} = \begin{bmatrix} \underline{z}_p \\ \underline{z}'_q \\ \underline{z}_{cc} \end{bmatrix} \tag{5}$$

O desacoplamento proposto por este trabalho - que estima, independentemente, a estação retificadora de Foz do Iguaçu e a estação inversora de São Roque, para a Operação Normal do Elo de Corrente Contínua - consiste simplesmente em atuar-se no conjunto de medidas $\underline{z}_{cc}$, anteriormente descrito, ao tratar a Ordem de Corrente, I_D, como variável de estado somente no terminal retificador, em Foz do Iguaçu, e considerá-la como parâmetro, em São Roque, impondo, portanto, ao Jacobiano Integrado CA-CC, o não acoplamento considerado.

Similarmente ao conjunto de medidas, o particionamento de h, $\underline{w}$ e W é procedido, cujo vetor de estado, x, é particionado em Ângulos de Fase da Tensão Nodal CA, θ, em Módulos de Tensão Nodal CA, U, e nos estados do Elo de Corrente Contínua, x_{cc}. Assim, a equação (1), anteriormente indicada, torna-se:

$$\begin{bmatrix} \underline{z}_p \\ \underline{z}'_q \\ \underline{z}_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_p(\theta, U, \underline{x}_{cc}) \\ h'_p(\theta, U, \underline{x}_{cc}) \\ h_{cc}(\theta, U, \underline{x}_{cc}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{w}_p \\ \underline{w}'_q \\ \underline{w}_{cc} \end{bmatrix} \tag{6}$$

e:

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} W_p^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & W_q'^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & W_{cc}^{-1} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Uma vez que a Matriz Jacobiana, H, indicada por (4), seja dada por:

$$H(\underline{x}) = \frac{\partial h(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \tag{8}$$

com:

$$\underline{x} = (\theta, \underline{U}, \underline{x}_{cc}) \tag{9}$$

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

vem que:

$$H(\underline{x}) = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial h_p(\underline{x})}{\partial \theta} & \frac{\partial h_p(\underline{x})}{\partial \underline{U}} & \frac{\partial h_p(\underline{x})}{\partial \underline{x}_{cc}} \\ \frac{\partial h'_q(\underline{x})}{\partial \theta} & \frac{\partial h'_q(\underline{x})}{\partial \underline{U}} & \frac{\partial h'_q(\underline{x})}{\partial \underline{x}_{cc}} \\ \hline \frac{\partial h_{cc}(\underline{x})}{\partial \theta} & \frac{\partial h_{cc}(\underline{x})}{\partial \underline{U}} & \frac{\partial h_{cc}(\underline{x})}{\partial \underline{x}_{cc}} \end{array}\right] \tag{10}$$

Neste ponto, observa-se que um Estimador Estático de Estado Integrado CA-CC, unificado, utilizando o Jacobiano $H(\underline{x})$ indicado por (10) e utilizado no algoritmo da estimação dado por (4), fica complexo, uma vez que todas as derivadas dos estados dependentes do Elo CC requererão reavaliação a cada iteração. No entanto, como segue adiante indicado, apesar de não considerar-se o desacoplamento das partes CA - considerados pela Referência [1] - dos elementos fora da diagonal, implementou-se um método de desacoplamento do Modelo, para FOZ e SRQ, que produz bons níveis de Redundância Local e Global do Sistema

Integrado CA-CC. Assim, resulta que as estimativas obtidas com esta metodologia serão razoáveis como os Casos Testes do Capítulo 4 indicam. Além do mais, trabalha-se com o Jacobiano do Sistema Integrado CA-CC, constante, para economizar o tempo computacional envolvido.

2.3.4 - Algoritmo Utilizado para a Estimação Integrada CA-CC

2.3.4.1 - Introdução

Nesta seção, descreve-se o algoritmo proposto para a estimação integrada CA-CC, desacoplada, cujo desacoplamento permite estimar Foz do Iguaçu e São Roque, independentemente, e que, ao integrar-se as partes CA e CC do sistema equivalente sob estudo, ainda se consegue preservar o não acoplamento das variáveis de estado e das medidas, o que atende ao Projeto do Elo CC de Itaipu, no que se refere à Ordem de Corrente do Elo CC, em Operação Normal, ser dada por Foz de Iguaçu.

2.3.4.2 - Algoritmo Utilizado

Dado que as equações das medidas utilizadas produzem derivadas nulas dos Fluxos de Potência Ativa CA, com relação ao estado CC do Elo e da Tensão Contínua, com relação ao Ângulo de Fase da Tensão CA, proveniente da expressão (10), o algoritmo da estimação fica reduzido a:

$$\left[\begin{array}{c|c|c} H_p^t\, W_p^{-1}\, H_p & H_{pq'}^t\, W_q^{-1}\, H_{pq'} & 0 \\ \hline H_{q'p}^t\, W_p^{-1}\, H_{q'p} & H_{q'}^t\, W_q^{-1}\, H_{q'} & H_{q'cc}^t\, W_{cc}^{-1}\, H_{q'cc} \\ \hline 0 & H_{ccq'}^t\, W_q^{-1}\, H_{ccq'} & H_{cc}^t\, W_{cc}^{-1}\, H_{cc} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \Delta\theta \\ \hline \Delta U \\ \hline \Delta x_{cc} \end{array}\right] =$$

$$\left[\begin{array}{ccc} H_p^t & H_{pq'}^t & 0 \\ H_{q'p}^t & H_{q'}^t & H_{q'cc}^t \\ 0 & H_{ccq'}^t & H_{cc}^t \end{array}\right] \left[\begin{array}{ccc} W_p^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & W_{q'}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & W_{cc}^{-1} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \underline{z}_p - h_p(\underline{x}) \\ z'_q - h'_q(\underline{x}) \\ \underline{z}_{cc} - h_{cc}(\underline{x}) \end{array}\right] \qquad (11)$$

Desta forma, o algoritmo da estimação pode ser resolvido sequencialmente como segue abaixo indicado por (12) à (14).

$$\theta_{k+1} = \theta_k + (H_p^t W_p^{-1} H_p)^{-1} [H_p^t W_p^{-1} (\underline{z}_p - h_p(\underline{x})) + H_{pq'}^t W_q^{-1} (\underline{z}'_q - h'_q(\underline{x})) - (H_{pq'}^t W_{q'}^{-1} H_{pq'}) \Delta U] \qquad (12)$$

$$U_{k+1} = U_k + (H_{q'}^t W_q^{-1} H_{q'})^{-1} [H_{q'p}^t W_p^{-1} (\underline{z}_p - h_p(\underline{x})) + H_{q'}^t W_q^{-1} (\underline{z}_{q'} - h_{q'}(\underline{x})) +$$

$$+ H_{q'cc}^t W_{cc}^{-1} (\underline{z}_{cc} - h_{cc}(\underline{x})) - (H_{q'p}^t W_p^{-1} H_{q'p}) \Delta\theta_k - (H_{q'cc}^t W_{cc}^{-1} H_{q'cc}) \Delta x_{cc_k}] \qquad (13)$$

$$x_{cc_{k+1}} = x_{cc_k} + (H_{cc}^t W_{cc}^{-1} H_{cc})^{-1} [H_{ccq'}^t W_q^{-1} (\underline{z}_{q'} - h_{q'}(\underline{x})) + H_{cc}^t W_{cc}^{-1} (\underline{z}_{cc} - h_{cc}(\underline{x})) -$$

$$- H_{ccq'}^t W_q^{-1} H_{ccq'}) \Delta U] \qquad (14)$$

em que $\underline{x}$ é descrito pela equação (9) e:

$$H_{pq'} = \frac{\partial h_p(\underline{x})}{\partial \underline{U}}, \tag{15}$$

$$H_{q'p} = \frac{\partial h'_q(\underline{x})}{\partial \theta}, \tag{16}$$

$$H_{q'cc} = \frac{\partial h'_q(\underline{x})}{\partial \underline{x}_{cc}} \quad \text{e} \tag{17}$$

$$H_{ccq'} = \frac{\partial h_{cc}(\underline{x})}{\partial \underline{V}} \tag{18}$$

e H_p, H_q, e H_{cc} são, respectivamente, $\frac{\partial h_p(x)}{\partial \theta}$, $\frac{\partial h'_q(\underline{x})}{\partial \underline{U}}$ e $\frac{\partial h_{cc}(\underline{x})}{\partial \underline{x}_{cc}}$.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3 - INCLUSÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU NA ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC, DESACOPLADA, EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.1 - INTRODUÇÃO

No Capítulo 1, discorreu-se acerca do significado da Estimação Estática de Estado em Sistemas de Potência de Corrente Alternada interligados, bem como a Necessidade da Estimação do Elo de Corrente Contínua de Itaipu. No Capítulo 2, descreveu-se o procedimento da Estimação de Estado para o caso em estudo. Agora, analisa-se a Inclusão do Elo de Corrente Contínua na Estimação Estática de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, em Sistemas de Potência, ocasião em que modela-se o Elo de Corrente Contínua diante de suas equações representativas, para compor com as telemedições do sistema de potência, um conjunto acessível de equações e retratar um perfil confiável do Caso Base em estudo, quando da Operação do Sistema. Correspondentemente, formaliza-se um Modelo Básico para análise que vá refletir os diversos comportamentos do Elo CC diante das contingências a serem submetidas, tais como: perda de um polo, perda de um bipolo, operação reversa, etc.

3.1.1 - Descrição Sucinta do Capítulo

Após a apresentação do Modelo Básico em Análise, explicita-se todo o desenvolvimento do Modelo Teórico para uma subsequente análise do Estado do Elo de Corrente Contínua para

a Estimação Estática de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, com suas respectivas equações de medidas.

Adiante, cuida-se das Hipóteses Básicas para o modelo do Elo de Corrente Contínua, de onde, após uma breve introdução, verifica-se os requisitos necessários para a medição, que cuida de certos problemas, quais sejam: Condições de Observabilidade Mínima, Condições de Redundância nas Telemedições e Localização das Medidas.

Finalmente, trata-se das condições fundamentais do problema concreto a ser estudado, modelado e posto em execução, pelo menos como uma primeira alternativa de pesquisa. Neste caso, investiga-se os Requisitos Físicos Operacionais em que, novamente, após breve introdução, enfoca-se as Condições Físicas Operacionais em Análise e aos Casos considerados sob contingências, ao que os enumeramos no capítulo seguinte. O Apêndice "A" visa complementar este capítulo, ao considerar a integração do Elo CC ao Fluxo de Carga.

3.1.2 - Introdução ao Modelo Básico de Análise

Neste ponto, é conveniente tecer alguns comentários sob as considerações assumidas, elemento por elemento, antes de apresentar-se, prematuramente, o Modelo Básico.

Dos Transformadores Conversores

Sobre estes equipamentos, por assim dizer, cabe toda a responsabilidade da transmissão e do recebimento da potência nas estações terminais de FOZ e SRQ, respectivamente.

Eles operam sob tensão CA de 500 kV, nominal em FOZ, e Tensões Mínima e Máxima de 0.95 pu e 1.10 pu e, sob tensão CA de 345 kV, nominal em SRQ, e Tensões Mínima e Máxima de 0.93 pu e 1.05 pu, respectivamente, quando operando em Operação Normal. Com Operação à Tensão Reduzida de 75% - outra forma de operação do Elo CC - o valor máximo da Tensão cai a 1.05 pu em FOZ e se mantém, também em 1.05 pu, em SRQ, conforme é indicado por [3].

As relações nominais dos transformadores são de 3.924 e 2.828, em FOZ e SRQ, respectivamente.

Dos Conversores em FOZ e SRQ

O sentido normal de operação para o Elo CC de Itaipu é de FOZ para SRQ. Por esta razão, o Comutador de Derivações em FOZ é dimensionado considerando FOZ como Retificadora, restando a SRQ a operação como Inversora.

Das Barras CA Adjacentes aos Conversores

São estas barras as responsáveis por toda a transmissão de potência envolvida pelo Elo de Corrente Contínua. Dado que a operação dos conversores pressupõe, inicialmente, retificar as componentes senoidais da barra de corrente alternada, há a necessidade de se garantir que cheguem, aos terminais do Retificador e o Inversor, tensões quase perfeitamente senoidais, o que supõe a utilização de Filtros de Corrente Alternada nas barras de FOZ e SRQ, onde precisa-se também evitar que os harmônicos produzidos pelas cargas não lineares envolvidas (nesse caso, o Retificador e o Inversor) distorçam as formas de onda. Por esta razão, utiliza-se as admitâncias $\dot{Y}_{FR}$ e $\dot{Y}_{FI}$ nas barras de

corrente alternada, em FOZ e SRQ, para atenuar os efeitos indesejáveis das correntes e tensões harmônicas.

Além da utilização dos Filtros anteriormente citados, por se pretender manter um nível de tensão bem confiável na barra de SRQ, decorre a necessidade da utilização de outros equipamentos adicionais, como sejam: Capacitores em Derivação e Compensadores Síncronos, para compensar os VAR convenientemente.

Assim sendo, pode-se apresentar o Modelo Básico para estudo que possa realmente representar qualquer estágio do Elo de Corrente Contínua, devido a implementação computacional estar dependente da Ordem de Corrente imposta pelo C.O.S. de SRQ, onde é feito o Controle da Potência desejado. Assim, a FIG. 3.1.2, abaixo, ilustra o Modelo Básico do Elo CC.

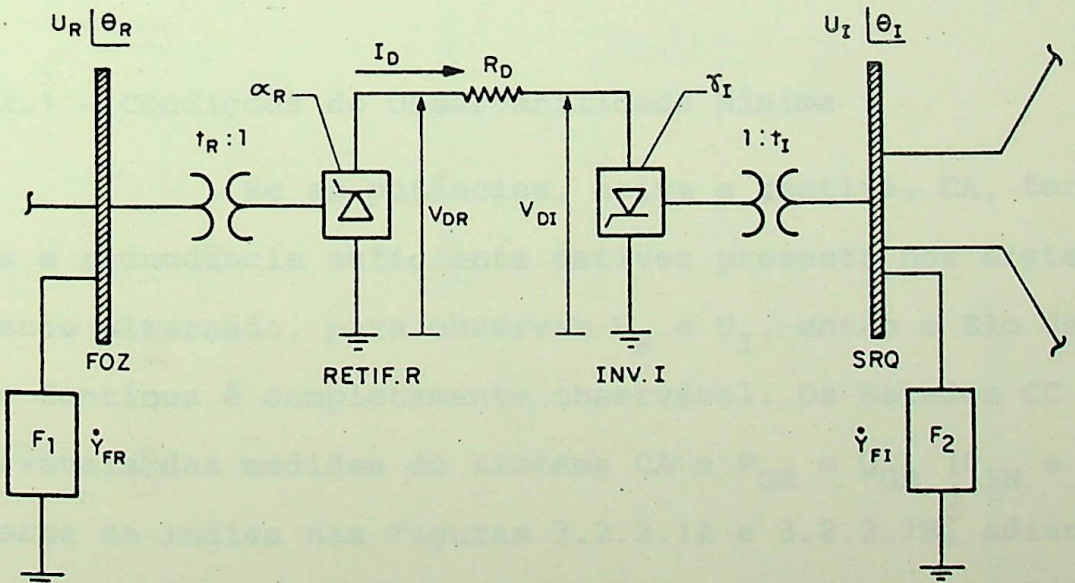


FIG. 3.1.2 - Modelo Básico para o Elo de Corrente Contínua

3.2 - HIPÓTESES BÁSICAS PARA O MODELO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA

3.2.1 - Introdução

Após a introdução ao modelo básico em análise, convém que se defina alguns pontos básicos que proporcionem uma boa definição do modelo. Por esta razão, analisa-se 2 aspectos básicos que melhor caracterizam o mesmo, por existir uma quase imposição de definir as Condições de Observabilidade Mínima e as Condições de Redundância nas Telemedições, para que se garanta os requisitos necessários ao processo da estimação.

3.2.2 - Requisitos Necessários para as Medidas

São os pontos básicos que se deve atender para uma medição a contento. Trata-se, portanto, das condições necessárias ao cumprimento da estimação formulada.

3.2.2.1 - Condições de Observabilidade Mínima

Se as potências, ativa e reativa, CA, forem medidas e redundância suficiente estiver presente nos sistemas de corrente alternada, para observar U_R e U_I, então o Elo de Corrente Contínua é completamente observável. Os Estados CC são observáveis das medidas do sistema CA e P_{GR} e Q_{GR} (P_{IN} e Q_{IN}) conforme se indica nas Figuras 3.2.2.1A e 3.2.2.1B, adiante indicadas, que ilustram os sistemas de Foz do Iguaçu e São Roque, respectivamente.

Desta forma, a Condição de Observabilidade Mínima para FOZ é cumprida ao constituir-se um sistema com m medi

das e n incógnitas. A Figura 3.2.2.1A, abaixo, ilustra tal situação.

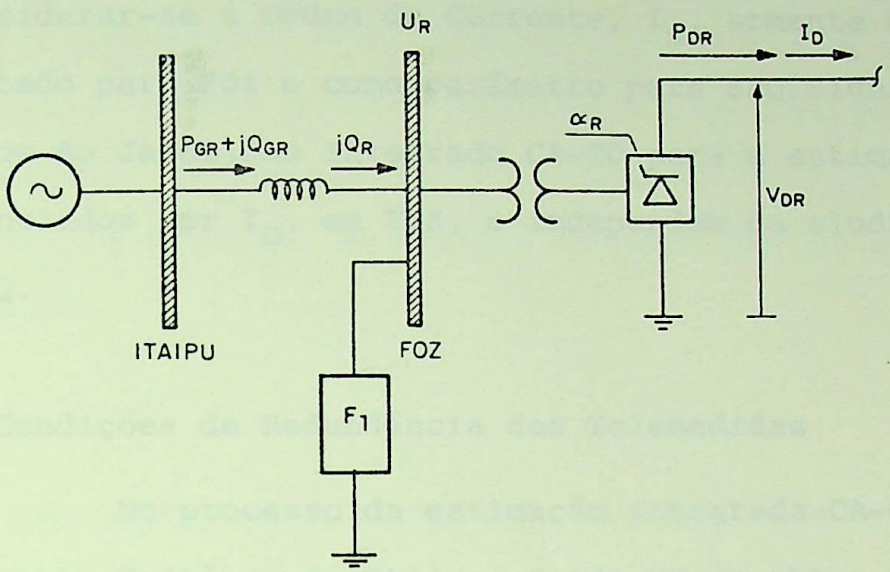


FIG. 3.2.2.1A - Condições de Observabilidade Mínima para FOZ

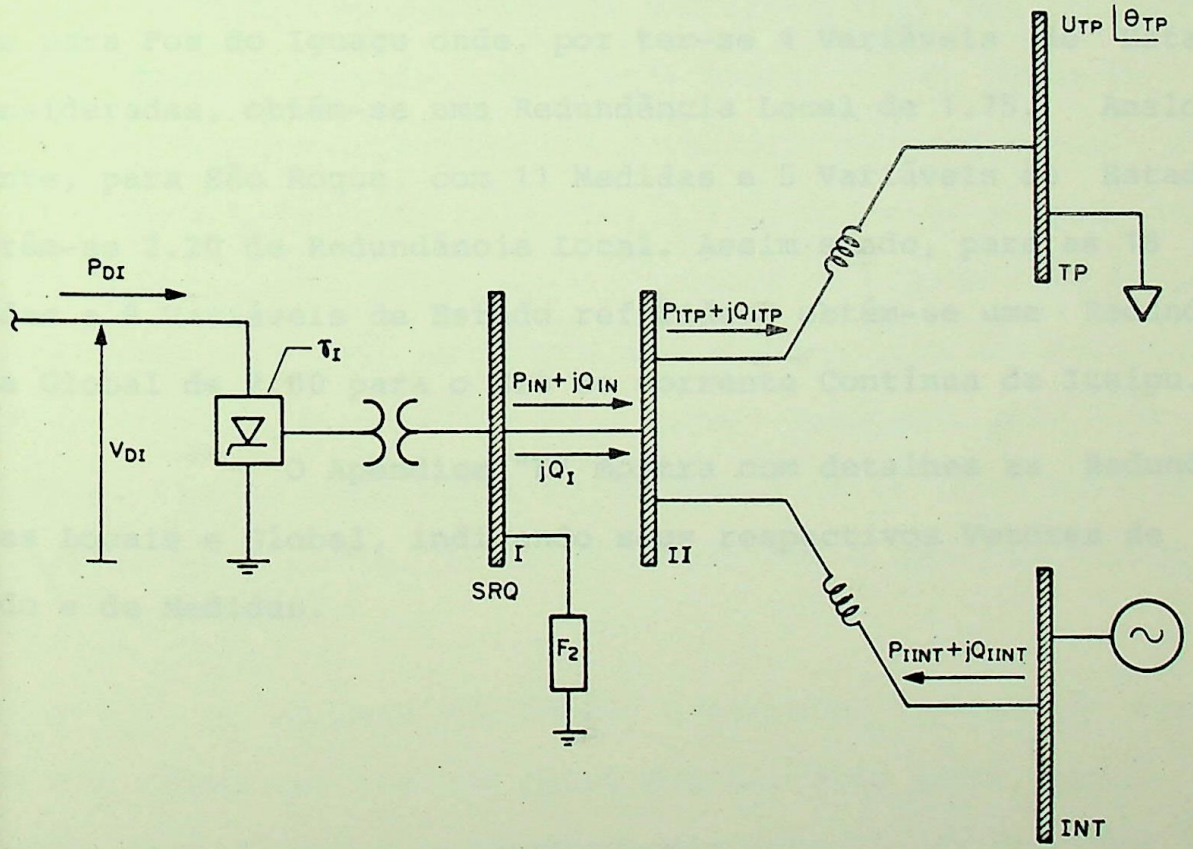


FIG. 3.2.2.1B - Condições de Observabilidade Mínima para SRQ

Analogamente, para São Roque, a Condição de observabilidade Mínima é cumprida ao constituir-se novo sistema com m equações e n incógnitas. A Fig. 3.2.2.1B ilutra tal si

tuação.

Observar que as Figuras 3.2.2.1A e 3.2.2.1B ilustram e evidenciam o Desacoplamento proposto por este trabalho ao considerar-se a Ordem de Corrente, I_D, somente como variável de estado para FOZ e como parâmetro para SRQ. Significa que os elementos do Jacobiano Integrado CA-CC para a estimação só são influenciados por I_D, em FOZ, e independem da aludida variável, em SRQ.

3.2.2.2 - Condições de Redundância das Telemedidas

No processo da estimação integrada CA-CC para o Elo de Corrente Contínua de Itaipu, cuida-se de obter uma boa condição de Redundância das telemedidas, resultando em 7 Medidas para Foz do Iguaçu onde, por ter-se 4 Variáveis de Estado consideradas, obtém-se uma Redundância Local de 1.75. Analogamente, para São Roque, com 11 Medidas e 5 Variáveis de Estado, obtém-se 2.20 de Redundância Local. Assim sendo, para as 18 Medidas e 9 Variáveis de Estado referidas, obtém-se uma Redundância Global de 2.00 para o Elo de Corrente Contínua de Itaipu.

O Apêndice "B" mostra com detalhes as Redundâncias Locais e Global, indicando seus respectivos Vetores de Estado e de Medidas.

3.3 - DESENVOLVIMENTO DO MODELO TEÓRICO

3.3.1 - Introdução

Para uma análise do ponto de vista da Estimação

Estática de Estado Integrada CA-CC, em Sistemas de Potência, deve-se desenvolver um modelo que atenda aos propósitos necessários para o problema, a partir do Modelo Básico, que componha com o Sistema Equivalente Idealizado para proceder-se à integração CA-CC. Assim, então, pode-se analisar os Estados do Elo de Corrente Contínua, conjuntamente ao Sistema Equivalente Idealizado, bem como as Equações de Medidas decorrentes, para a Estimação Integrada.

3.3.2 - Sistema Equivalente Idealizado

Desde que se pretenda estimar o Elo de Corrente Contínua de Itaipu no contexto de sua integração aos sistemas CA Sul e Sudeste do país, por simplicidade, convém obter-se o modelo equivalente ao sistema CA referido. Por esta razão, chega-se ao modelo indicado pela FIG. 3.2.2, adiante, em que para Foz do Iguaçu, como se tem apenas a linha de transmissão de 7 km interligando a geração em Itaipu até a subestação retificadora, em FOZ, idealiza-se o modelo de 2 Barras indicando pelo lado esquerdo da figura, cuja barra do Gerador é feita swing para aquele lado do equivalente. (A interligação com o Paraguai é desprezada).

Já para São Roque, a barra do Inversor é conectada a 2 outras, em que uma delas é a barra de Interlagos, de geração, tornada swing, portanto, mais outra barra de carga, em Tijuco Preto.

Assim, pode-se representar o Modelo Equivalente Idealizado pela FIG. 3.2.2 a seguir.

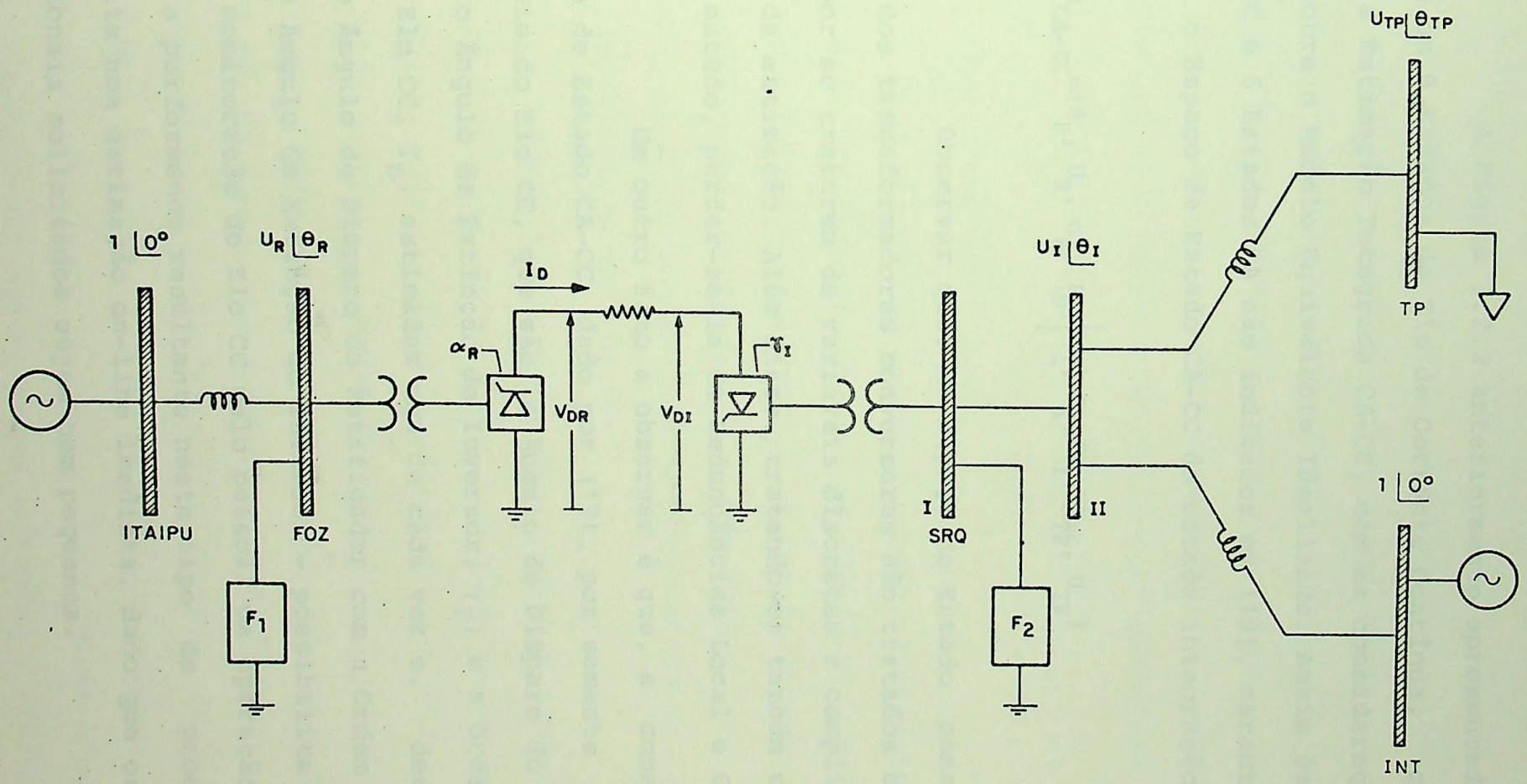


FIG. 3.2.2 - Sistema Equivalente Idealizado

3.3.3 - ESTADOS DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA PARA A ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC

A Figura 3.2.2 anteriormente apresentada contempla todos os 9 Estados do Elo de Corrente Contínua, considerados para a Estimação Integrada CA-CC, com as considerações assinaladas sobre o Modelo Equivalente Idealizado. Assim sendo, 3 Estados CC e 6 Estados CA são indicados em (19), caracterizando, portanto, o Espaço de Estado CA-CC da citada integração. Assim:

$$x_{CA-CC}=\{\theta_R,\ U_R,\ \alpha_R,\ I_D,\ |\ \gamma_I,\ \theta_I,\ U_I,\ \theta_{TP},\ U_{TP}\} \qquad (19)$$

Observar que, no Espaço de Estado considerado, os taps dos transformadores conversores são tratados como parâmetros, por se tratarem de variáveis discretas e complicarem o processo da estimação. Além disso, tratando-os também como variáveis de estado, perder-se-ia em Redundâncias Local e Global.

Um outro fato a observar é que, a consideração do Espaço de Estado CA-CC, dado por (19), por somente envolver 3 variáveis do Elo CC, que são: o Ângulo de Disparo do Retificador, α_R, o Ângulo de Extinção do Inversor, γ_I, e a Ordem de Corrente do Elo CC, I_D, estimadas uma de cada vez e, desacoplada mente - o Ângulo de Disparo do Retificador com a Ordem de Corrente, do Ângulo de Extinção do Inversor - possibilita uma perfeita monitoração do Elo CC pelo pessoal da operação. Além do mais, a performance resultante neste tipo de procedimento possibilita uma estimação on-line imediata, dado que os tempos computacionais solicitados sejam bem pequenos.

3.3.4 - Equações de Medida do Sistema Integrado CA-CC

3.3.4.1 - Introdução

Tendo sido introduzido o Modelo Básico a analisar e seus respectivos estados a determinar, que permitem a Estimação Integrada CA-CC do Elo de Corrente Contínua, assim como o Sistema Equivalente Idealizado, pode-se estabelecer um conjunto de medidas realista, o qual é fundamental ao procedimento da estimação, uma vez que se pode definir as premissas básicas do processo, quais sejam: o que medir e onde?

3.3.4.2 - Localização das Medidas

A Figura 3.2.2, anteriormente apresentada, apresenta um sistema equivalente que, embora idealizado, reflete realisticamente a condição de operação em Foz do Iguaçu, com certeza, e em São Roque, aproximada, mas que define um razoável comportamento final para a análise da performance da estimação do Elo CC integrado ao sistema CA.

Assim sendo, é possível medir os Fluxos de Potência Ativo e Reativo, CA, $\underline{P}_{GR}$ e $\underline{Q}_{GR}$, o Fluxo de Potência Reativo, $\underline{Q}_{R}$, relacionado ao fluxo de potência ativo CC, o próprio Fluxo de Potência CC, $\underline{P}_{DR}$, a Tensão Contínua, $\underline{V}_{DR}$, a Tensão Alternada, $\underline{U}_{R}$ e a Ordem de Corrente Contínua, $\underline{I}_{D}$, todas estas medidas para Foz do Iguaçu. Analogamente, em São Roque, é possível medir os Fluxos de Potência Ativo e Reativo, CA, entre SRQ e Tijuco Preto, $\underline{P}_{ITP}$ e $\underline{Q}_{ITP}$, e entre SRQ e Interlagos, $\underline{P}_{IINT}$ e $\underline{Q}_{IINT}$, bem como a sua soma, $\underline{P}_{IN}$ e $\underline{Q}_{IN}$, pois,convém observar que no Exemplo numérico que segue abaixo indicado, a estimação de

duas medidas independentemente, bem como a de sua soma, resultam diferentes.

Exemplo: Sejam X e Y 2 medidas lidas como 2 e 3, respectivamente, e sua soma X+Y lida como sendo 6.

Aplicando o algoritmo da estimação indicado por (4) e considerando a Matriz de Ponderação, unitária, tem-se:

$$[H(x)]^t\, W^{-1}[H(x)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Prosseguindo com o algoritmo, vem que:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = ([H(x)]^t\, W^{-1}[H(x)])^{-1}\, [H(x)]^t .\, [\underline{z} - h(x)]$$

Assim:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8 \\ 9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7/3 \\ 10/3 \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Portanto, conclui-se que, no processo de estima

ção desenvolvido para o Estimador em São Roque mede-se, independentemente, $\underline{P}_{ITP}$ e $\underline{Q}_{ITP}$, $\underline{P}_{IINT}$ e $\underline{Q}_{IINT}$ e sua composição $\underline{P}_{IN}$ e $\underline{Q}_{IN}$, dadas por (20) e (21), abaixo:

$$\underline{P}_{IN} = \underline{P}_{ITP} + \underline{P}_{IINT} \tag{20}$$

$$\underline{Q}_{IN} = \underline{Q}_{ITP} + \underline{Q}_{IINT} \tag{21}$$

Além disso, mede-se o Fluxo de Potência Reativo, CA, $\underline{Q}_{I}$, relacionado ao fluxo de Potência Ativa CC, o próprio Fluxo de Potência Ativo, CC, $\underline{P}_{DI}$, a Tensão Contínua, $\underline{V}_{DI}$ e as Tensões Nodais, CA, $\underline{U}_{I}$ e $\underline{U}_{TP}$, nas barras do Inversor e de Tijuco Preto, respectivamente. Novamente, como a barra de Interlagos é considerada swing para o lado direito do sistema, representado pela FIG. 3.2.2, não considera-se medidas da Tensão Nodal CA na mesma.

Desta maneira, chega-se ao conjunto integrado CA-CC, com 5 Medidas CC e 13 Medidas CA, conforme se indica por (22), a seguir, e ilustra-se a localização das medidas na Figura 4.3.2, no Capítulo 4, a seguir, representada.

Portanto, o conjunto de Medidas utilizadas por este trabalho é:

$$\underline{z}_{CA-CC} = \{\underline{P}_{GR}, \underline{Q}_{GR}, \underline{Q}_{R}, \underline{P}_{DR}, \underline{V}_{DR}, \underline{U}_{R}, \underline{I}_{D}, \underline{P}_{IINT}, \underline{Q}_{IINT}, \underline{P}_{ITP},$$

$$\underline{Q}_{ITP}, \underline{P}_{IN}, \underline{Q}_{IN}, \underline{Q}_{I}, \underline{P}_{DI}, \underline{V}_{DI}, \underline{U}_{I}, \underline{U}_{TP}\} \tag{22}$$

3.3.4.3 - Equações das Medidas do Sistema Integrado CA-CC

As equações (23) à (40), a seguir indicadas, representam as 18 Medidas possíveis, CA-CC, adotadas por este trabalho.

Assim:

$$h_1(x) = -\underline{P}_{GR} - B_R \cdot U_R \cdot \operatorname{sen}\theta_R \tag{23}$$

$$h_2(x) = -\underline{Q}_{GR} - B_R \cdot U_R \cdot \operatorname{sen}\theta_R \cdot \frac{\sqrt{1-(\cos\alpha_R - R_{CR} I_D)^2}}{\cos\alpha_R - R_{CR} I_D} \tag{24}$$

$$h_3(x) = -\underline{Q}_R + t_R^{-1} \cdot U_R \cdot \sqrt{1-(\cos\alpha_R - R_{CR} I_D)^2} \cdot I_D \tag{25}$$

$$h_4(x) = -\underline{P}_{DR} + t_R^{-1} \cdot U_R \cdot (\cos\alpha_R - R_{CR} I_D) \cdot I_D \tag{26}$$

$$h_5(x) = -\underline{V}_{DR} + t_R^{-1} \cdot U_R \cdot (\cos\alpha_R - R_{CR} I_D) \tag{27}$$

$$h_6(x) = -\underline{U}_R + U_R \tag{28}$$

$$h_7(x) = -\underline{I}_D + I_D \tag{29}$$

$$h_8(x) = -\underline{P}_{DI} + t_I^{-1} \cdot U_I (\cos\gamma_I - R_{CI} I_D) \cdot I_D \tag{30}$$

$$h_9(x) = -\underline{Q}_I + t_I^{-1} U_I \sqrt{1-(\cos\gamma_I - R_{CI} I_D)^2} \cdot I_D \tag{31}$$

$$h_{10}(x) = -\underline{V}_{DI} + t_I^{-1} U_I (\cos\gamma_I - R_{CI} I_D) \tag{32}$$

$$h_{11}(x) = -\underline{P}_{IN} + B_I U_I (\operatorname{sen}\theta_I + U_{TP} \operatorname{sen}\theta_{ITP}) \tag{33}$$

$$h_{12}(x) = -\underline{Q}_{IN} + B_I U_I (\text{sen}\theta_I + U_{TP}\ \text{sen}\theta_{ITP}) \cdot \frac{\sqrt{1-(\cos\gamma_I - R_{CI} I_D)^2}}{\cos\gamma_I - R_{CI} I_D} \quad (34)$$

$$h_{13}(x) = -\underline{P}_{ITP} + B_I U_I U_{TP}\ \text{sen}\theta_{ITP} \quad (35)$$

$$h_{14}(x) = -\underline{Q}_{ITP} + B_I (U_I U_{TP}\ \cos\theta_{ITP} - U_I^2) \quad (36)$$

$$h_{15}(x) = \underline{P}_{IINT} + B_I U_I\ \text{sen}\theta_I \quad (37)$$

$$h_{16}(x) = \underline{Q}_{IINT} - B_I (U_I\ \cos\theta_I - U_I^2) \quad (38)$$

$$h_{17}(x) = -\underline{U}_I + U_I \quad (39)$$

$$h_{18}(x) = -\underline{U}_{TP} + U_{TP} \quad (40)$$

O Apêndice "B" complementa este Capítulo, onde também se indica a Dedução dos Modelos das Medidas CA e CC que definem os Jacobianos da Estimação utilizados.

3.4 - REQUISITOS FÍSICOS OPERACIONAIS

3.4.1 - Introdução

Na modelagem do Elo CC é importante destacar algumas características do Elo de Corrente Contínua de Itaipu, que são: as considerações de especificação de projeto do Elo, as quais se deve tratar com a conveniente atenção para não fugir

aos fundamentos do problema que se está analisando.

A Referência [2] - "Controle Mestre de Corrente Contínua em Alta Tensão" - cuida da descrição funcional detalhada do Sistema de Controle de Potência de Itaipu. Da Figura 3.4.2A, a seguir indicada, tem-se uma visão geral do equipamento envolvido, aos níveis de controle do Polo e do Bipolo para o controle da malha fechada dos conversores que dita o Controle de Potência do Elo de Corrente Contínua. Na Referência [3] - "Aspectos sobre a Operação em Paralelo" - observa-se que a Operação em Paralelo é uma operação de emergência e as noções de Arranjo do Circuito Básico são introduzidas, o que é ilustrado na Figura 3.4.2B. Daí, também vêm as informações acerca das possíveis formas de operação decorrentes de simples chaveamentos, as Razões para a Operação Paralela como condição de emergência, os critérios envolvidos e as Condições de Falta. Da Referência [4] - "Análise das Diversas Condições de Operação em Regime Permanente" - sabe-se que o Controle do Fluxo de Potência da linha pode ser ajustado continuamente de um mínimo de 10% até 100% da Potência Máxima especificada e analisa-se a Determinação dos Parâmetros Nominais do Circuito, a Determinação das Faixas de Derivação dos Comutadores sob Carga dos Transformadores Comutadores, a Limitação da Tensão de Comutação, as Características Operacionais e, finalmente, as Características Principais do Sistema de Corrente Contínua de Itaipu. A Figura 3.4.2C ilustra acerca do tipo de controle exercido pelos Conversores. Na Referência [5] - "Programa Digital para o Cálculo das Condições em Regime Permanente" - é apresentado um detalhamento para o Modelo do Elo que os programas disponíveis de Fluxo de Potência não apresentam, em que são simuladas as condições dos modos Monopo-

lar, Bipolar, Paralelo e Reverso. Após uma Revisão da Teoria Básica empregada, da filosofia de controle, as opções de utilização são apresentadas, os Casos Teste mostrados e a comparação do programa LINKOP com o MAINC, da ASEA, é feita. A Referência [6] - "Compensação Reativa das Estações Conversoras" - trata do suprimento dos Reativos necessitados pelos Conversores de Corrente Contínua, em diversos modos de operação e a obtenção de um comportamento dinâmico integrado CA-CC, obedecendo aos critérios estabelecidos pela especificação.

Desta maneira, a forma de exposição em que este trabalho se fundamenta é apresentada nesse conjunto de Referências indicado, que realmente permite fornecer um perfil realista das proposições ao que, referindo-se de uma maneira bastante abrangente, coloca-se finalmente a nossa proposta, qual seja, a de proceder à Estimação Estática de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, em Sistemas de Potência.

Em seguida, aborda-se as Condições Físicas Operacionais sob Análise em que são expostas, uma a uma, as Referências anteriormente aludidas, no que se refira às considerações assumidas e conclui-se este item - e também este Capítulo - enumerando sucintamente os casos considerados sob contingência.

3.4.2 - Condições Físicas Operacionais sob Análise

Com a evolução deste trabalho, deu-se uma quase imposição de detalhar certos aspectos da operação de Itaipu, quais sejam: o Controle Mestre, os Aspectos sobre a Operação em Paralelo, a Análise das Diversas Condições de Operação em Regime Per

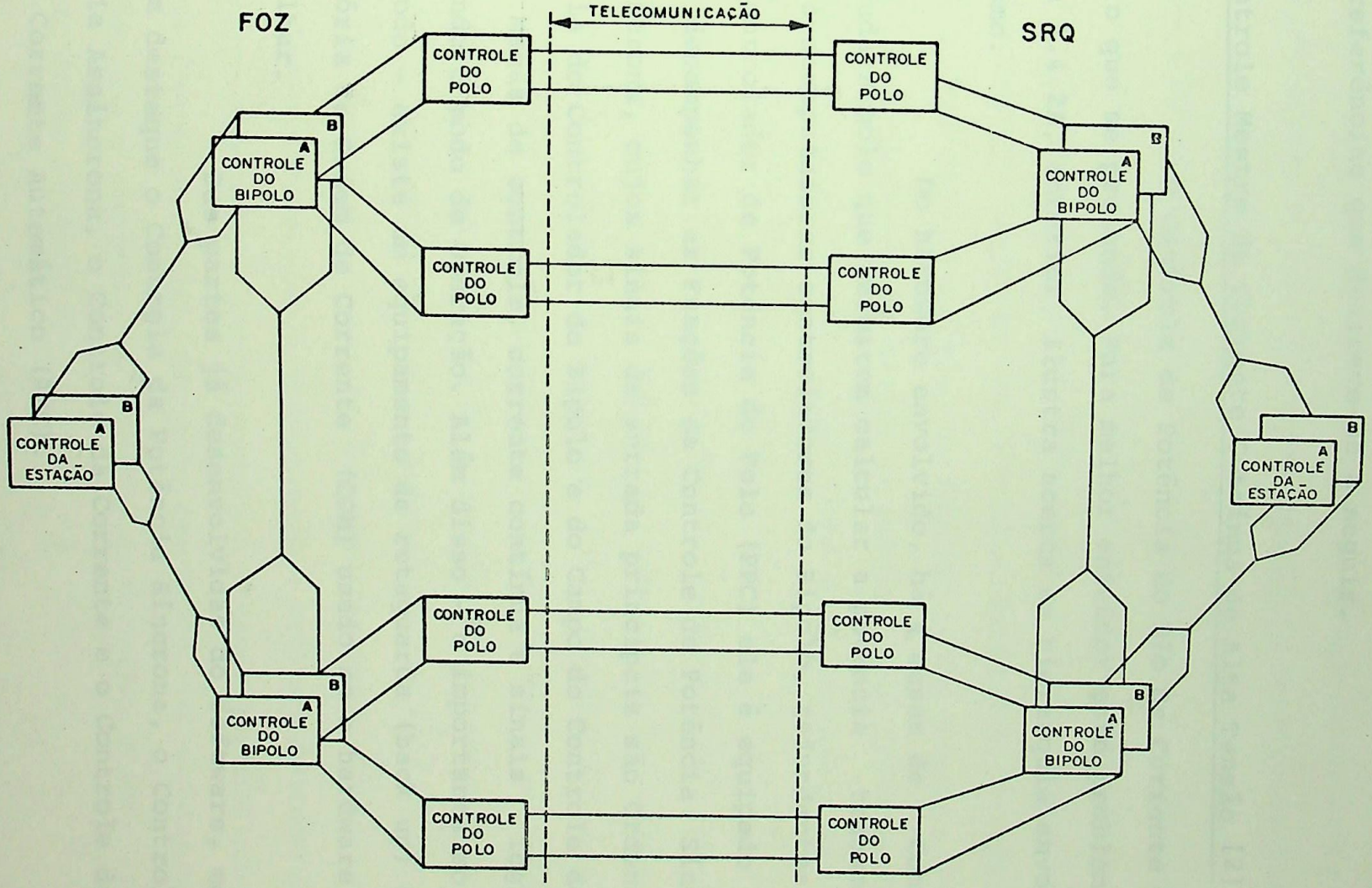


FIG. 3.4.2A - Níveis de Controle e Interconexões

manente, o Programa Digital para o Cálculo das Condições de Regime Permanente e a Compensação Reativa das Estações Conversoras, referências que descreve-se a seguir.

a) Controle Mestre de Corrente Contínua de Alta Tensão [2]

O Controle de Potência do Elo de Corrente Contínua é o que se pretende. Para melhor entender este problema, a Figura 3.4.2A, anterior, ilustra acerca da hierarquia envolvida no mesmo.

Do hardware envolvido, há 4 mesas de Controle para cada Bipolo que permitem calcular a potência transmitida e 2 microcomputadores controladores do Bipolo, redundantes. Para o Controlador de Potência do Polo (PPC) ele é equipado de modo a desempenhar as Funções de Controle de Potência Síncrona e Assíncrona, cujos sinais de entrada principais são Ordens de Potência do Controlador do Bipolo e do Campo do Controle do Polo das mesas de controle, corrente contínua e sinais lógicos, indicando o modo de Operação. Além disso - e importante ao nosso estudo - existe um equipamento de retaguarda (back up) chamado Memória de Ordem de Corrente (COM) usado se o hardware do PPC falhar.

Das partes já desenvolvidas do software, merece aqui um destaque o Controle da Potência Síncrona, o Controle da Potência Assíncrona, o Controle da Corrente e o Controle da Margem da Corrente Automático (AMC).

O modo do Controle com o mais elevado grau de automatização é o Controle de Potência Síncrona, em que os operadores somente necessitam colocar a Ordem da Potência, a Rampa

e o Limite, numa base do Bipolo na Seção do Bipolo, na mesa. Além disso, o equipamento do Controle também adiciona as Ordens de Potência Adicionais e sincroniza as Ordens de Corrente entre os Retificadores e os Inversores, mantêm a corrente da terra no mínimo, consideradas as Tensões nos 2 Polos do Bipolo e a Corrente é limitada à capacidade dos tiristores e transformadores. Esse controle irá cuidar do controle de carga-frequência, dos Controles de 50 e 60 Hz, das sobrecargas de Curta Duração, da Transferência de Potência, da Telecomunicação (*), da Sincronização, da Transição Paralela, do Equilíbrio da Corrente do Eletrodo, da compensação da Margem da Corrente, do Controle da Potência Síncrona na Estação TRAIL (SRQ) e da Sequência da Rampa durante a partida do Polo.

O modo do Controle de Corrente é um tipo de Controle de retaguarda, utilizado se o hardware do PPC falhar em que a Memória da Ordem da Corrente (COM) armazena a Ordem da Corrente do PPC e que o Controle da Corrente segue esta Ordem, dentro de uma faixa limitada de variação. Finalmente, o modo de Controle de Margem da Corrente, Automático (AMC), é utilizado quando não houver telecomunicação, absolutamente, entre as 2 subestações, caso em que a transmissão é operada somente do Retificador. Aí então, o Retificador é a estação que definirá a Ordem da Corrente no AMC, que pode ser feita, ou no Controle da Corrente, ou no Controle da Potência Assíncrona. O AMC também pode ser feito no Inversor.

(*) Para que o controlador de Potência possa transmitir informações há, entre as duas subestações, um canal de comunicação nos 2 sentidos: no sentido LEAD (FOZ) para TRAIL (SRQ),

este canal transmite Ordens de Corrente e no sentido TRAIL-LEAD é utilizado para confirmar a Recepção das Ordens de Corrente e transmitir Limites de Corrente, Novas Ordens de Potência, sinais suplementares, etc. Caso utilize-se telegramas codificados, é possível transmitir os sinais em um único canal de telecomunicação. Além disso, o equipamento de telecomunicação contém, ainda, funções de controle para evitar que telegramas com perturbações sejam interpretados erroneamente, adicionada a uma repetição adequada, resulta em um sistema que operará satisfatoriamente, mesmo com canais de telecomunicação com altos níveis de perturbação. E, para maior segurança, são usados 2 canais em paralelo, um via Carrier e outro via Micro-Ondas, onde são comparados os telegramas recebidos por ambos.

b) Aspectos sobre a Operação em Paralelo das Estações Conversoras [3]

Como a Operação Paralela é uma Operação de Emergência em Itaipu, indica-se o circuito básico para o projeto, na Figura 3.4.2B, a seguir, que consiste de 2 Bipolos que, em condições normais, dividirão a transmissão de 6300 MW de FOZ para SRQ. Eles efetuam a transmissão por uma torre comum às linhas de Corrente Contínua que partem de cada Bipolo e usa a terra como opção de retorno.

Assim:

600 kV | 2610 A | 2 Grupos de 12 válvulas em série e Dispositivos de Chaveamento constituem o Polo Completo

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUA

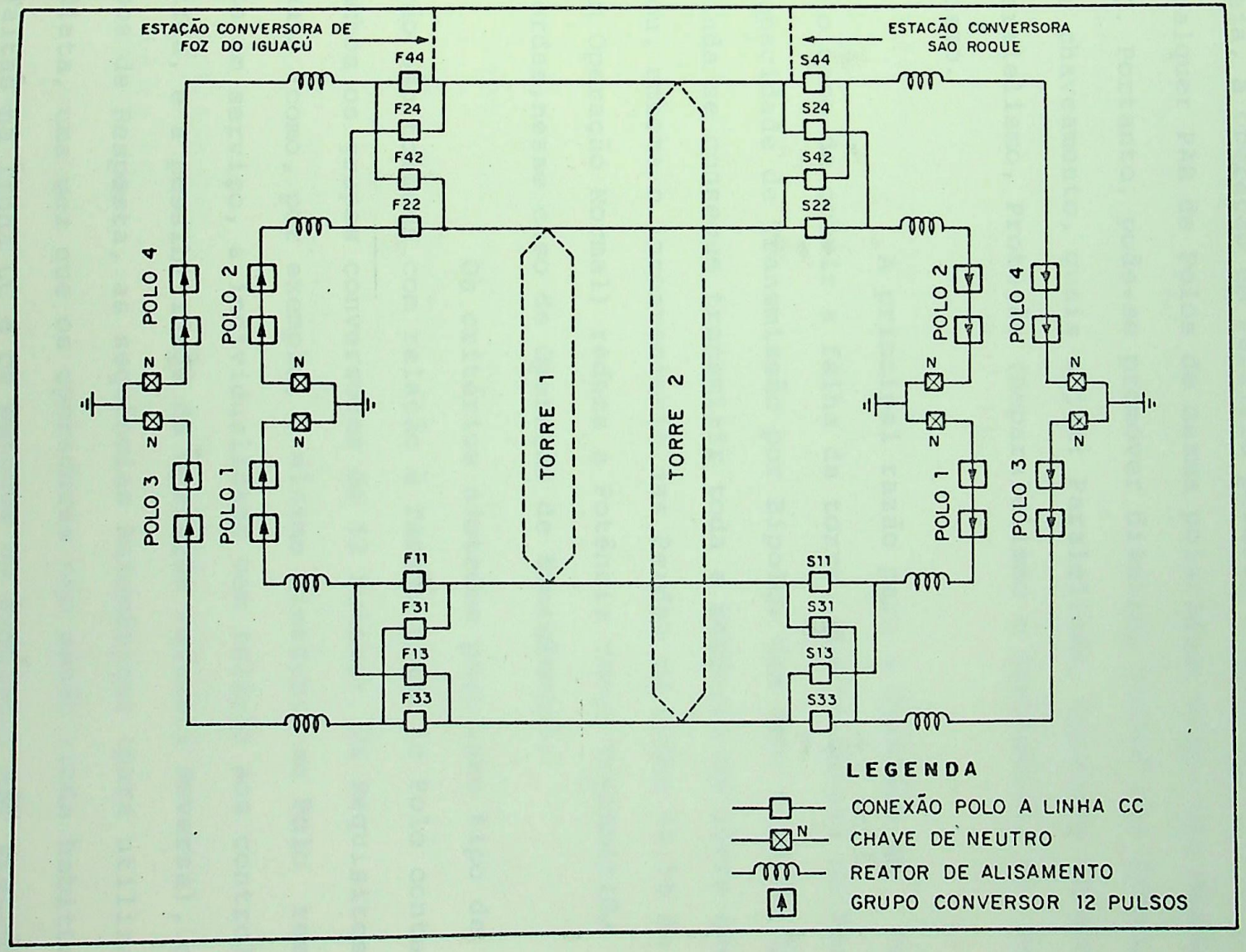


FIG. 3.4.2B - Circuito Básico Simplificado

Dado o chaveamento previsto pelo projeto, pode-se então isolar/conectar Polos e Linhas CC, ou mesmo, isolar/conectar Polos com outras linhas que não as correspondentes. Ou seja, a Operação em Paralelo permite a Operação em Paralelo de qualquer PAR de Polos de mesma polaridade sobre uma mesma linha CC. Portanto, pode-se promover diversos STATUS aos dispositivos de chaveamento, quais sejam: Paralelismo, Operação Paralela, Deparalelismo, Proteção (Deparalelismo e Isolamento) ou Reparalelismo.

A principal razão para a Operação em Paralelo é o caso de cobrir a falha da torre, que resultará na Perda da Capacidade de Transmissão por Bipolo. Com este tipo de Operação, ainda se consegue transmitir toda a Potência na torre que restou, embora o inconveniente das Perdas na Linha (4.5% de Perdas em Operação Normal) reduza a Potência Total Transmitida (9% de Perdas, nesse caso de Operação de Emergência).

Os critérios adotados para esse tipo de Operação são tomados com relação à Tensão Plena (o Polo conta com ambos os grupos conversores de 12 Pulsos). Os Requisitos Adicionais (como, por exemplo, o mínimo distúrbio ao Polo remanescente em serviço, a individualidade com relação aos controles, mantida, e a possibilidade da Operação Paralela Reversa), os Tempos de Resposta, as sequências Automáticas (para utilização imediata, uma vez que os operadores não estão ainda habituados), as Faltas na linha CC e os Estudos no Simulador são tratados com mais detalhes na Ref. [3]. Além disso, o impacto da Operação em Paralelo que o projeto sofre é abordado, como sejam:

- os cabos precisam suportar o dobro da Corrente Nominal de Polo;

- as válvulas conversoras de qualquer dos inversores podem receber a corrente de ambos os Retificadores em paralelo durante a falta do terminal inversor;
- os dispositivos de conexão dos Polos às linhas de corrente contínua são chaves secionadoras e a interconexão dos barramentos é necessária;
- controles adicionais são necessários para as sequências automáticas;
- a telecomunicação (**) requer canais adicionais, embora o sistema continue a operar mesmo quando a telecomunicação falhar.

Em seguida, tem-se desenvolvido, na citada Referência, todas as rotinas para Paralelismo e Deparalelismo, bem como os tipos de Faltas do sistema são analisados.

(**) Os mesmos 2 sistemas citados no item anterior estão presentes: um, usando Micro-Ondas e outro, Carrier. Os canais adicionais necessários à operação paralela, caso falhem, ainda permitem que o sistema continue em operação, ou seja: existe independência nos sistemas.

c) Análise das Diversas Condições de Operação em Regime Permanente [4]

Dado o tipo de controle desenvolvido, ao variar as Tensões do lado de Corrente Alternada, ou a Ordem de Potência, as interações máximas entre os sistemas de Corrente Contínua/Alternada não são ultrapassadas, nem a nível de Potência Reativa trocada, nem a nível de correntes harmônicas injetadas pelo sistema a Corrente Contínua.

O processo de Controle é estabelecido de forma que o Retificador controle continuamente a corrente variando o seu Ângulo de Disparo e ajuste apropriadamente às derivações no transformador sob carga, para que o ângulo de disparo não exceda uma faixa estabelecida. Quanto ao Inversor, controlará discretamente a Tensão no Retificador variando as derivações do Transformador sob carga e manterá fixa a mínima margem de Comutação (Figura 3.4.2C).

Foz do Iguaçu (FOZ) atua em Operação Direta como Retificadora e São Roque (SRQ), como Inversora. O sistema é Assíncrono por ser de 50 Hz em FOZ e 60 Hz em SRQ. Cada Polo do Sistema de Conversão CA em CC é composto de 2 Pontes de 12 Pulsos em Série e o Sistema de Transmissão é composto por 2 Bipolos.

Valores nominais para a Determinação dos Parâmetros nominais do Circuito Principal são dados, sendo determinados daí, a Corrente Nominal, a Tensão e a Reatância de Comutação Nominais e a Potência Nominal dos Transformadores Conversores. Além disso, a importante determinação das faixas de Derivação dos Comutadores sob carga dos Transformadores Conversores é procedida, após a verificação das Relações de Transformação Nominal e Extremas (máxima e mínima) em FOZ e SRQ. Adiante, é examinada a limitação da Tensão de Comutação e as características Operacionais, assim como as características Principais do Sistema de Corrente Contínua de Itaipu.

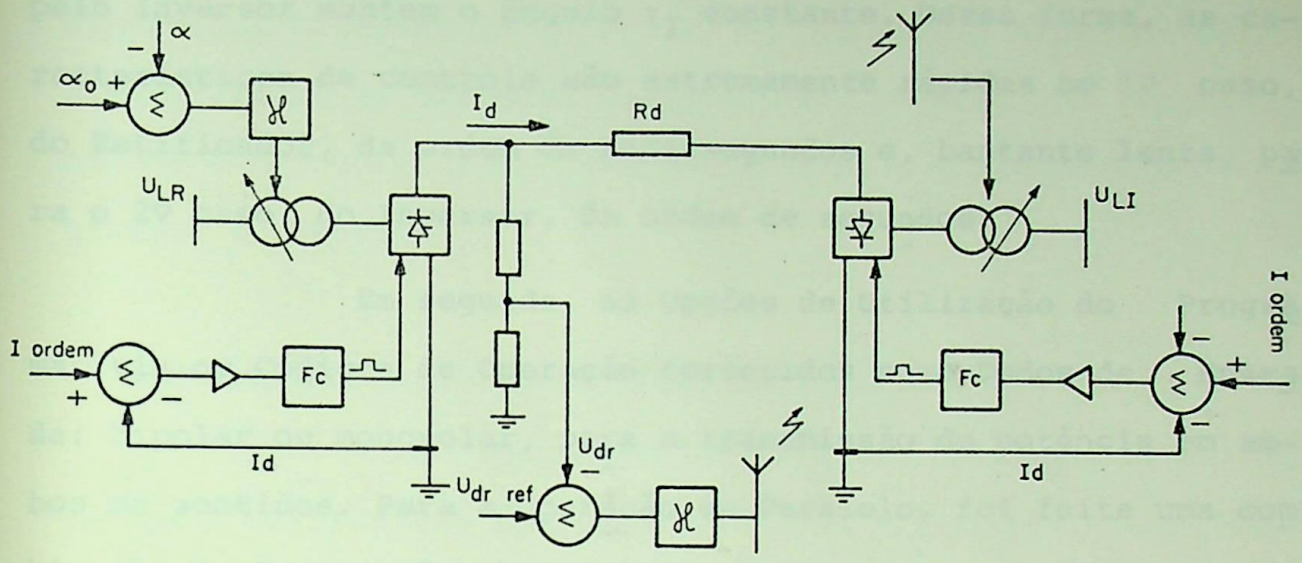


FIG. 3.4.2C - Pontos Básicos do Estudo para Definição dos Parâmetros do Circuito Principal

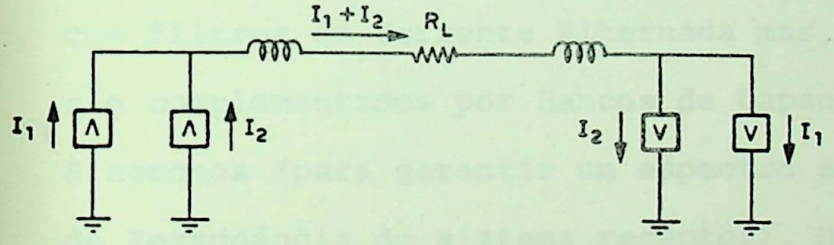
d) Programa Digital para Cálculo das Condições de Regime Permanente do Elo de Corrente Contínua de Itaipu [5]

Eis que, após uma iniciação em que aborda-se o Controle Mestre, os Aspectos sobre a Operação em Paralelo e a Análise das Diversas Condições de Operação em Regime Permanente, uma implementação computacional do Cálculo das Condições em Regime Permanente sucede oportuna. Nela, visto que o grau de detalhamento do Modelo do Elo que os programas disponíveis de Fluxo de Potência não contemplavam, desenvolve-se um programa que simula de maneira simples, completa e rápida, o Elo de Corrente Contínua, de acordo com a filosofia de Controle do fabricante.

Partindo-se da Teoria Básica dos Conversores atualmente existente, adequou-se um enfoque a este problema

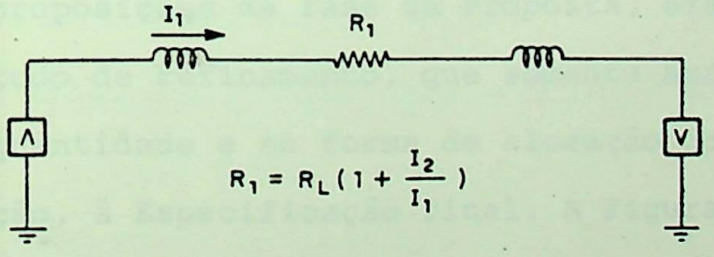
particular de Itaipu e seguiu-se a filosofia do controle adotada pelo fabricante, em que o Controle da Corrente pelo Retificador age sobre o ângulo de disparo α_R e a determinação da Tensão pelo Inversor mantém o ângulo γ_I constante. Dessa forma, as características de controle são extremamente rápidas no 1º caso, do Retificador, da ordem de milissegundos e, bantante lenta, para o 2º caso, do Inversor, da ordem de segundos.

Em seguida, as Opções de Utilização do Programa, via os Códigos de Operação fornecidos como Dados de Entrada: bipolar ou monopolar, para a transmissão de potência em ambos os sentidos. Para a Operação em Paralelo, foi feita uma combinação de 2 operações bipolares, empregando-se circuitos equivalentes nos quais a Resistência CC é alterada convenientemente, de acordo com as correntes nos Polos paralelos. A Figura 3.4.2D ilustra essa forma de Operação.



Queda na linha: $R_L(I_1+I_2)$

Perdas na linha: $R_L(I_1+I_2)^2$

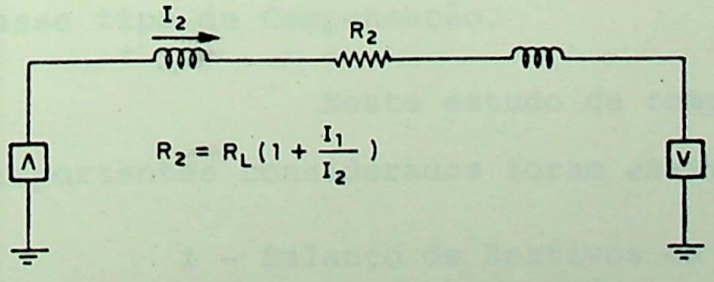


Queda na linha:

$R_1I_1=R_LI_1+R_1I_2$

Perdas na linha:

$R_1I_1^2=R_LI_1^2+R_LI_1I_2$



Queda na linha:

$R_2I_2=R_LI_1+R_LI_2$

Perdas na linha:

$R_2I_2^2=R_LI_2I_1+R_LI_2^2$

FIG. 3.4.2D - Simulação da Operação em Paralelo

A seguir, são feitos os Casos Testes em que a Operação Paralela é simulada e 3 Casos são atendidos, em que, no primeiro, é simulada a Operação Paralela do Polo 4; na segunda, a Operação Paralela do Polo 2 e, no terceiro, as Curvas das Características de Operação são plotadas. Depois, os programas LINKOP e MAINC, da ASEA, são comparados, e o Fluxograma do programa é fornecido.

e) Compensação Reativa das Estações Conversoras [6]

No suprimento dos Reativos necessários aos Conversores de Corrente Contínua, se detém o principal objetivo em diversos modos de Operação e na obtenção de um comportamento dinâmico do sistema integrado CA-CC, obedecendo-se aos critérios da especificação.

A Compensação Reativa em FOZ é efetuada somente com Filtros de Corrente Alternada mas, em SRQ, estes Filtros são complementados por Bancos de Capacitores e Compensadores Síncronos (para garantir um espectro adequado para a Frequência de Ressonância do sistema receptor). Mesmo tendo sido estas as proposições da fase da Proposta, elas foram mantidas após um estudo de refinamento, que somente acrescentou alguns ajustes na quantidade e na forma de alocação dos dispositivos de compensação, à Especificação final. A Figura 3.4.2E, a seguir, indica esse tipo de Compensação.

Neste estudo de compensação, os aspectos mais importantes considerados foram assim subdivididos:

i - Balanço de Reativos em Regime Permanente;

ii - Análise da Frequência de Ressonância;

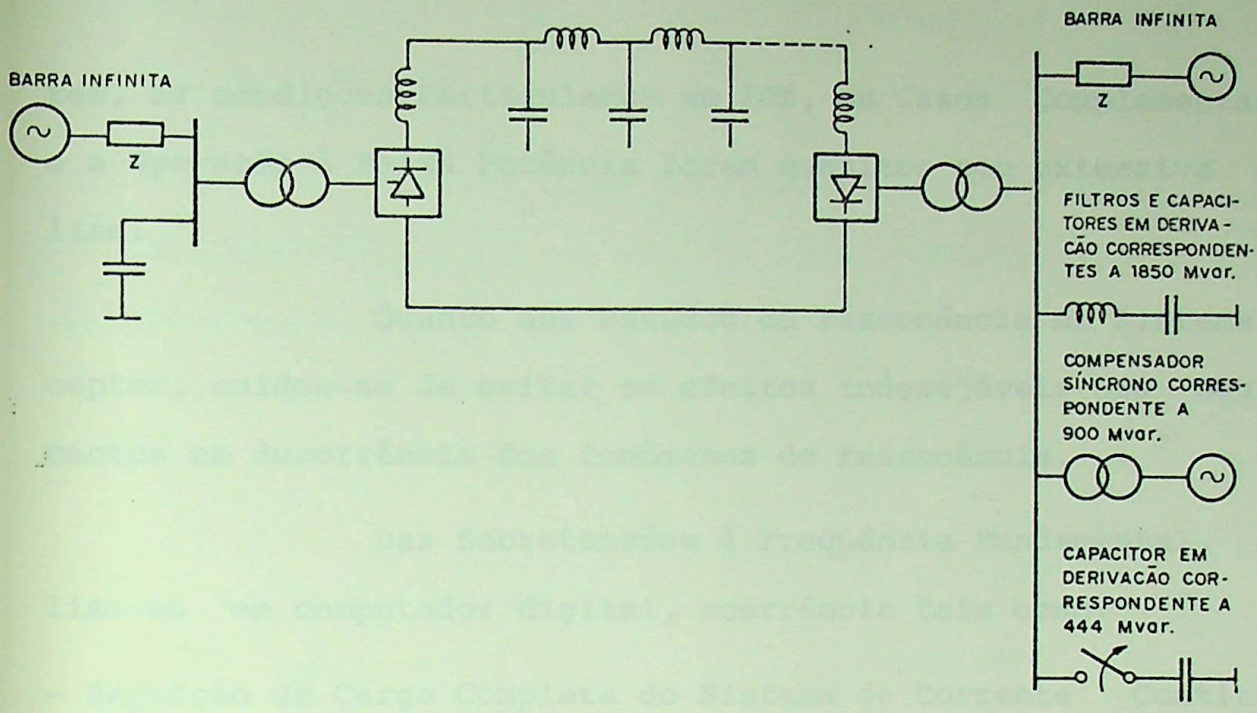


FIG. 3.4.2E - Compensação Reativa das Estações Conversoras

iii - Sobretensões à Frequência Fundamental;

iv - Auto-excitação; e

v - Variações da Tensão à Frequência Fundamental quando do chaveamento dos Bancos de Capacitores e Filtros.

Para o Balanço de Reativos em Regime Permanente, os Requisitos da Especificação foram:

a) Transmissão de Potência Nominal de 700 Mw por gerador em qualquer Estágio de desenvolvimento com qualquer elemento chaveável fora de serviço, até um máximo de 9 geradores.

b) Transmissão de Potência Máxima de 727 Mw por gerador com qualquer Estágio de desenvolvimento com todos os elementos em serviço, até um máximo de 8 geradores.

Além disso, o Consumo de Reativo dos Conversores

res, as condições Particulares em FOZ, os Casos Complementares e a Operação à Baixa Potência foram quesitos sob extensiva análise.

Quanto aos estudos de Ressonância no Sistema Receptor, cuidou-se de evitar os efeitos indesejáveis aos equipamentos em decorrência dos fenômenos de ressonância.

Das Sobretensões à Frequência Fundamental, analisa-se em computador digital, ocorrência tais como:

- Rejeição de Carga Completa do Sistema de Corrente Contínua, correspondendo ao bloqueio total dos Conversores;
- curto-circuito Trifásico e Fase-Terra (duração de 80 ms);
- bloqueio de 2 Polos, com 3 inicialmente em operação.

Em qualquer Estágio de desenvolvimento, alguns requisitos devem ser atendidos.

Quanto à Auto-Excitação, os estudos consideram a situação mais crítica e com relação ao chaveamento dos Capacitores e Filtros, a análise dos transitórios que resultam do chaveamento dos Filtros e Capacitores agregados às barras conversoras foi feita. Esta análise cresce de importância com o fato de que os chaveamentos podem se configurar numa situação de rotina e fazer frente às diversas Condições de Carga impostas ao sistema CA-CC.

Finalmente, do Esquema Final da Compensação Reativa, são apresentados os Estágios de Desenvolvimento de Itaipu, do primeiro ao sexto, com a Tabela correspondente para a compensação dos Reativos.

f) Validade do modelo utilizado para a Operação em Paralelo ou Perda de Observabilidade

Quando existe paralelismo, os dois bipolos podem ser substituídos por um quadripolo equivalente com tensão e resistência dadas por:

$$V_D = aV_1 + (1-a)V_2 \quad (41), \quad R = R_D\, a^2 + R_D(1-a)^2 \quad (42)$$

onde:

$$a = I_1/(I_1 + I_2) \qquad (I_1 \text{ e } I_2 \text{ medidas})$$

Deste modo o modelo permite considerar qualquer das correntes, inclusive o caso extremo da perda do bipolo. Entretanto, se por consideração de Operação em Paralelo e/ou Perda de Observabilidade, a filosofia de controle mudar (por exemplo, o controle de margem de corrente) algumas modificações no método poderão ser necessárias.

3.4.3 - Casos considerados sob contingências

Para que o trabalho fosse examinado à luz de simulações realistas, não se teve que considerar muitos casos isoladamente, já que a modelagem está de tal forma desenvolvida e implementada que, por depender da Ordem de Corrente I_D, se consegue fazer variá-la desde zero até o limite térmico suportado pela linha de Corrente Contínua, de tal forma que todos os casos podem ser simulados, indistintamente. Assim sendo, tanto as Operações Monopolar e Bipolar como a Operação Reversa, ou com 75% da capacidade nominal são supridas pelo Estimador Estático de Estado desenvolvido.

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU E TESTES

4.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo finalmente apresenta os resultados referentes aos Testes realizados para a simulação do funcionamento do Elo de Corrente Contínua de Itaipu.

O Fluxo de Carga CC implementado para a determinação das 3 variáveis da barra do Retificador - o Ângulo de Fase da Tensão, o Módulo da Tensão e o Ângulo de Disparo do Retificador - inicia o processo da estimação desenvolvido em que, após fixar-se as injeções de potência na barra do Inversor, em São Roque, e ajustar os taps dos transformadores conversores, já com as tensões CA convergidas, produz-se o Caso Base do Elo CC, a estimar. Por esta razão, apresenta-se o Modelo Equivalente utilizado para o Fluxo de Carga CC para a determinação do Caso Base, o Sistema Elétrico e Sistema de Medição Associado para o Estimador Integrado CA-CC, a Análise e Comparação dos Resultados da Simulação para o Estimador Integrado CA-CC e os Indicadores de Performance do mesmo.

4.2 - APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO PARA TESTES PARA O FLUXO DE CARGA CC

Uma vez que o estudo da Estimação Estática do Estado envolva diretamente o modelo físico das subestações, li

nhas de transmissão e os status dos equipamentos componentes, inicia-se a apresentação do Sistema Elétrico para Testes ilustrando o Modelo Equivalente utilizado no Fluxo de Carga CC na determinação do Caso Base, bem como o Fluxograma Simplificado seguido, a Lista de Variáveis utilizadas pelo Programa para, em seguida, a Apresentação dos Resultados ser procedida ao indicar 3 Casos Testes típicos do Elo CC, utilizados para Simulação.

4.2.1 - Modelo Equivalente utilizado para o Fluxo de Carga CC para a determinação do Caso Base utilizado

A Figura 4.2.1, a seguir apresentada, define o Modelo Equivalente empregado. Convém ressalvar que, os Filtros F_1 e F_2, indicados, são eventualmente considerados nas matrizes de admitâncias de carga do sistema.

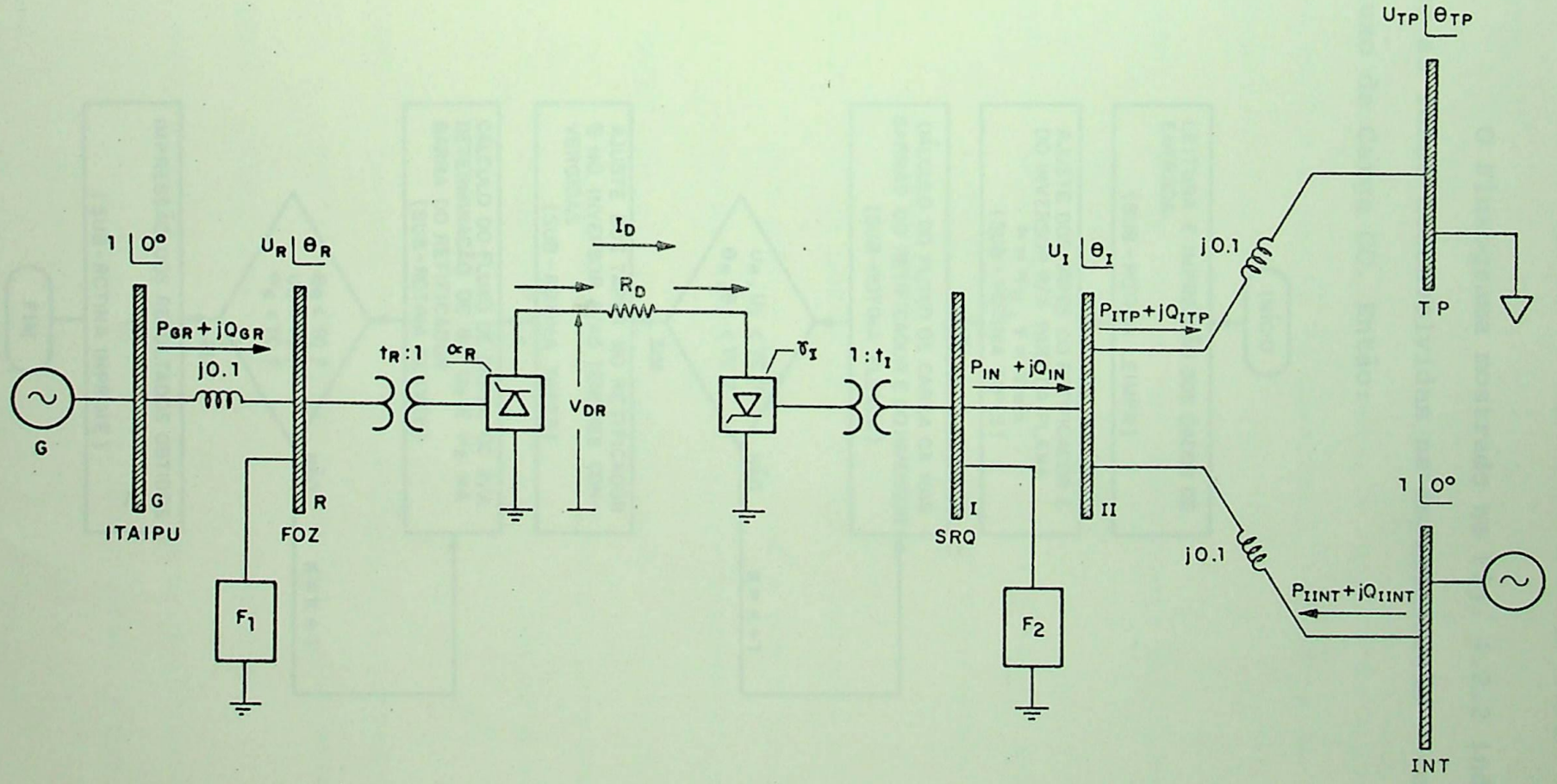


FIG. 4.2.1 - Modelo Equivalente utilizado para a Determinação do Caso Base no Fluxo de Carga CC

4.2.2 - Fluxograma Simplificado para o Fluxo de Carga CC

O Fluxograma mostrado na Fig. 4.2.2 indica sucintamente as fases desenvolvidas na implementação computacional do Fluxo de Carga CC. Então:

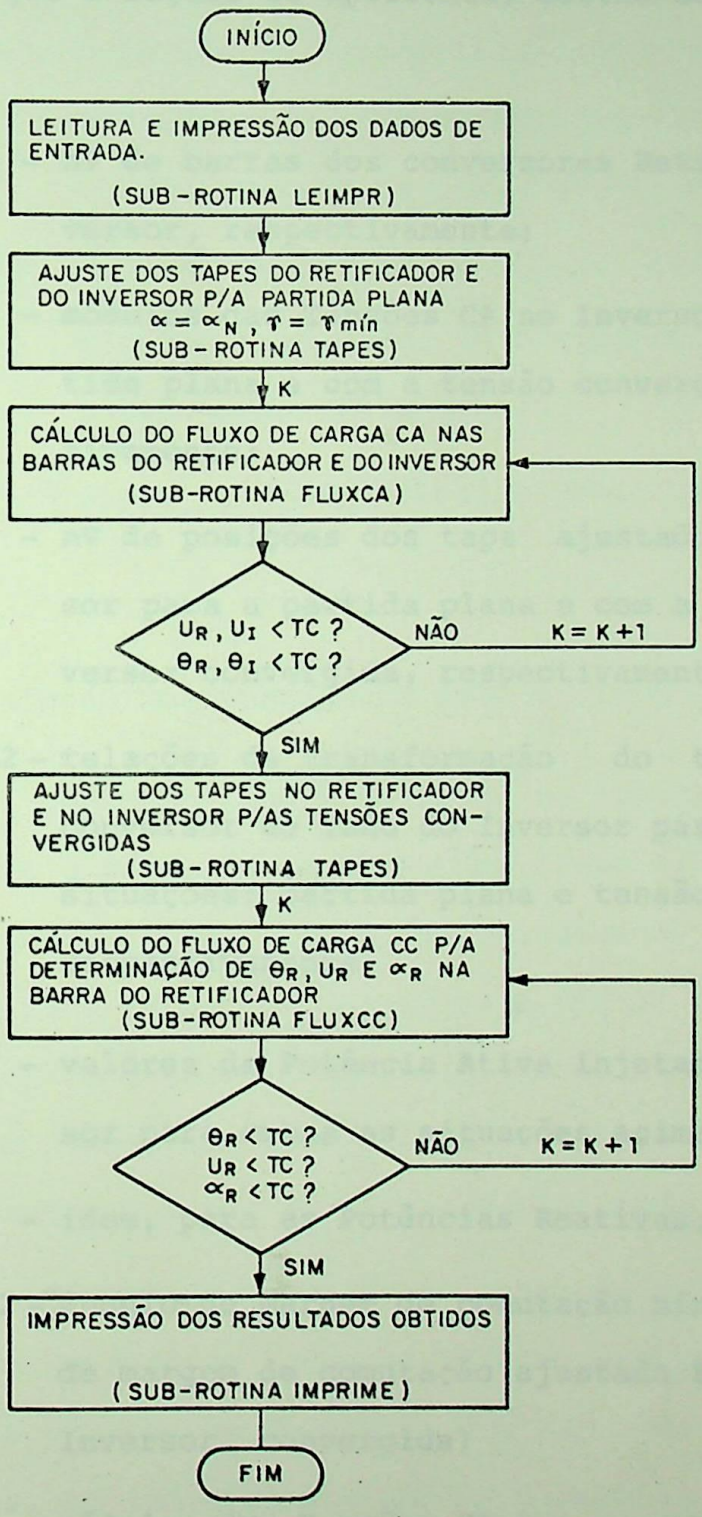


FIG. 4.2.2 - Fluxograma Simplificado para o Fluxo de Carga CC na Barra do Retificador

- TC é a tolerância de convergência do processo.

4.2.3 - Lista de Variáveis utilizadas pelo Programa do Fluxo de Carga CC

Para uma melhor compreensão do significado das variáveis utilizadas pela implementação computacional para os 3 Casos Testes que a seguir se apresenta, define-se as variáveis seguintes:

J(L) e K(M) - nº de barras dos conversores Retificador e Inversor, respectivamente;

UI1 e UI2 - módulos das Tensões CA no Inversor para a partida plana e com a tensão convergida, respectivamente;

NII1 e NII2 - nº de posições dos taps ajustados no Inversor para a partida plana e com a tensão no Inversor convergida, respectivamente;

TNIL1 e TNIL2 - relações de transformação do transformador conversor do lado do Inversor para ambas as situações: partida plana e tensão convergida, respectivamente;

PIN1 e PIN2 - valores de Potência Ativa injetadas no Inversor para ambas as situações acima mencionadas;

QIN1 e QIN2 - idem, para as Potências Reativas;

GAMAM e GAMA2 - ângulo de margem de comutação mínimo e ângulo de margem de comutação ajustado à tensão do Inversor, convergida;

UR1 e UR2 - módulos das Tensões CA para a partida plana e com a tensão convergida, no Retificador, respectivamente;

ALF1 e ALF2 - ângulos do Disparo do conversor Retificador ajustados para ambas as situações, já mencionadas, respectivamente;

NRR1 e NRR2 - nº de posições de taps ajustados no Retificador para ambas as situações, respectivamente;

TNRL1 e TNRL2 - relações de transformação do transformador do conversor do lado do Retificador por ambas as situações mencionadas, respectivamente;

PR1 e PR2 - valores de Potências Ativas injetadas no Retificador para ambas as situações acima mencionadas, respectivamente;

QR1 e QR2 - idem, para as Potências Reativas.

Escola Federal de Eng. Biblioteca MAUÁ - Itajubá

4.2.4 - Apresentação dos Resultados para o Fluxo de Carga CC

Conforme segue descrito no Apêndice "A" sobre a modelagem para a Inclusão do Elo CC no Fluxo de Carga, determinou-se os resultados que a seguir são indicados pelos Casos Testes I, II e III, em que se determina o Ângulo de Fase da Tensão CA da barra CA, adjacente ao Retificador, o módulo da Tensão CA na mesma barra, bem como o Ângulo de Disparo do Retificador, para uma dada condição de carga em São Roque.

A Entrada de Dados do programa é feita via Arquivo de Dados que fornece todos os Valores Nominais do Elo CC utilizados pela sub-rotina de Ajuste dos Taps dos transformadores conversores, os dados do sistema CA necessário, o nº de iterações máximo, a tolerância de convergência, a Potência Base pa

ra o Sistema e a Tensão Contínua Base. A tolerância de convergência utilizada para o Fluxo de Carga CC é de 10^{-6} (somente para o efeito de convergência).

Os 3 Casos Testes, a seguir, representam 3 Condições características de Operação do Elo CC, quais sejam: 10% da Ordem de Corrente Nominal (para simular a Operação Mínima do Elo CC), 75% da Ordem de Corrente Nominal (simulando a Condição de Operação à Tensão Reduzida) e, finalmente, 100% da Corrente Nominal, de 2.61 kA, para simular a Condição de Operação Nominal do Elo CC de Itaipu, em seu 6º e último estágio de operação.

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE :  .26KA


VALORES DE ENTRADA PARA O INVERSOR E DE VDRN:

J      =      3       (BARRA DO INVERSOR)
RCI    =       .086   PU
GAMAM  =     17.00    GRAUS
RD     =      2.87    OHM
CID    =       .26    KA
CIDN   =      2.61    KA
VDIO   =    164.70    KV
VDIN   =    143.34    KV
VDRN   =    150.83    KV

VALORES DE ENTRADA PARA O RETIFICADOR :

K      =       4      (BARRA DO RETIFICADOR)
ALFA   =      15.00   GRAUS
RCR    =        .089  PU
VDRO   =     172.00   KV

POTENCIA BASE,NO.ITERACOES E TOLERANCIA

SB   =     500          MVA
NIM  =      30
TC   =        .000001

DADOS DE BARRA

NO.  TIP   VESP     PGAT     QGRE     PCAT     QCRE     QSHU
           (PU)     (MW)    (MVAR)   (MW)     (MVAR)   (MVAR)
1    2   1.0000      .00      .00      .00      .00      .00
2    0   1.0000      .00      .00   350.00   100.00      .00
3    1   1.0000      .00      .00      .00      .00      .00

 DADOS DE RAMOS:

IBEMI  IBREC  NCIRC  RESIST  REAT   SUSC   TAPE
                     (PU)    (PU)   (PU)   (PU)
 1      3      1     .0000  .1000  .0000  .0000
 2      3      1     .0000  .1000  .0000  .0000

DADOS DO SISTEMA

BRET = -10.00
BGER =  10.00
```

CASO TESTE I

DADOS DE ENTRADA

10% DA ORDEM DE CORRENTE

(SIMULAÇÃO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO MÍNIMA)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE :  .26KA


A BARRA DO RETIFICADOR E  4
A BARRA DO GERADOR EM FOZ E  5
A TENSAO BASE DO LADO DE CORRENTE CONTINUA E DE  172  KV

A POTENCIA ATIVA GERADA E A POTENCIA REATIVA CONSUMIDA
NA BARRA DO INVERSOR(BARRA 3) SERAO CALCULADAS P/A PAR
TIDA PLANA E FIXADAS NA SUB-ROTINA "TAPES" E SAO DESIG
NADAS POR "PINI(J)" E "QINI(J)"

RESULTADOS PARA O AJUSTE DO TAPE NO INVERSOR
        (AJUSTE C/A PARTIDA PLANA)

J         =       3       (BARRA DO INVERSOR)
UII(J)    =       1.00    PU
NII(J)    =       4
TNIL(J)   =       1.0500
PINI(J)   =      37.41    MW
GAMAM     =      17.0000  GRAUS
QINI(J)   =      12.60    MVAR


RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO RETIFICADOR

K         =       4         (BARRA DO RETIFICADOR)
URI(K)    =       1.00      PU
NRRI(K)   =       7
TNRL1(K)  =       1.0875
PRI(K)    =      39.37      MW
ALFI(K)   =      15.7285    GRAUS
QRI(K)    =      12.42      MVAR

=> AS POTENCIAS ATIVA/REATIVA SAO FIXADAS
   NA BARRA DO INVERSOR COMO :

PINI(J) =      37.41  MW        J =    3
QINI(J) =      12.60  MVAR      J =    3

=> O FLUXO DE CARGA "CA" CONVERGIU NA 5A. ITERACAO

 BARRA     TENSAO          ANGULO

           (PU)            (GRAU)
 1(INT)  1.000000          .000000
 2(TP)    .944515        -8.089544
 3(SRQ)   .968529        -3.700965
```

CASO TESTE I: 10% DA ORDEM DE CORRENTE (1/3)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE :  .26KA

OBTENCAO DIRETA DA TENSAO CA DA BARRA DO RETIFICADOR
E SEU RESPECTIVO ANGULO DE FASE

=> O MODULO DA TENSAO CA DA BARRA DO RETIFICADOR E DE
   UR2(M) =      .997478   PU


=> O ANGULO DE FASE DA TENSAO NA BARRA DO RETIFICADOR E
   TETAR  =     -.449979   GRAUS


CALCULO DOS FLUXOS DE POTENCIA NAS LINHAS P/ GERAR O "CASO BASE"


EMI REC     PIK       PKI      QIK      QKI     P.AT.    P.REAT.
            (PU)      (PU)     (PU)     (PU)     (PU)      (PU)

 1   3     .625177-.625177  .334908-.284607  .000000  .050301
 2   3    -.700000  .700000-.200001  .259407  .000000  .059406

RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO INVERSOR
     (AJUSTE P/AS TENSOES CONVERGIDAS)

L         =       3          (BARRA DO INVERSOR )
UI2(L)    =        .968529 PU
NII2(L)   =       1
TNIL2(L)  =       1.0125
PIN2(L)   =      37.41       MW
GAMA2(L)  =      23.3043     GRAUS
QIN2(L)   =      12.60       MVAR


RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO RETIFICADOR

M         =       4          (BARRA DO RETIFICADOR)
UR2(M)    =        .997478 PU
NRR2(M)   =       7
TNRL2(M)  =       1.0875
PR2(M)    =      39.37       MW
ALF2(M)   =      15.2107     GRAUS
QR2(M)    =      12.07       MVAR
```

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
ORDEM DE CORRENTE : .26KA

MATRIZ JACOBIANA DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
(FOZ DO IGUACU)

-9.974478	.078535	.000000
.078337	-9.949873	-.077093
.000000	.879143	-.240651

MATRIZ INVERSA DA MATRIZ JACOBIANA

-.100262	-.000770	.000247
-.000768	-.097743	.031312
-.002804	-.357075	-4.041014

= * = RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA CC = * =

=> O FLUXO DE CARGA "CC" CONVERGIU NA 2A. ITERACAO

=> TETAR(I)	=> URR(I)	=> ALFAR(I)	=> I
-.007893RAD	.997547PU	.265727RAD	1
-.452226GR	.997547PU	15.225021GR	2

=> O NOVO ANGULO DE FASE DA TENSAO CA
NA BARRA DO RETIFICADOR E DE:

=> TETAR(I) = -.452226 GRAUS

=> A NOVA TENSAO CA NA BARRA DO RETIFICADOR E DE :

URR(I) = .997547 PU

=> O NOVO ANGULO DE DISPARO DO RETIFICADOR E DE :

ALFAR(I) = 15.225021 GRAUS

CASO TESTE I: 10% DA ORDEM DE CORRENTE (3/3)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA


VALORES DE ENTRADA PARA O INVERSOR E DE VDRN:

J      =      3       (BARRA DO INVERSOR)
RCI    =       .086   PU
GAMAM  =     17.00    GRAUS
RD     =      2.87    OHM
CID    =      2.00    KA
CIDN   =      2.61    KA
VDIO   =    164.70    KV
VDIN   =    143.34    KV
VDRN   =    150.83    KV

VALORES DE ENTRADA PARA O RETIFICADOR :

K      =       4      (BARRA DO RETIFICADOR)
ALFA   =      15.00   GRAUS
RCR    =        .089  PU
VDRO   =    172.00    KV

POTENCIA BASE,NO.ITERACOES E TOLERANCIA

SB  =     500          MVA
NIM =      30
TC  =        .000001

DADOS DE BARRA

NO. TIP  VESP     PGAT     QGRE     PCAT     QCRE     QSHU
         (PU)     (MW)    (MVAR)    (MW)    (MVAR)   (MVAR)
1   2  1.0000      .00      .00      .00      .00      .00
2   0  1.0000      .00      .00   350.00   100.00      .00
3   1  1.0000      .00      .00      .00      .00      .00

 DADOS DE RAMOS:

ISEMI IBREC NCIRC RESIST REAT  SUSC  TAPE
                  (PU)  (PU)  (PU)  (PU)
 1     3     1    .0000 .1000 .0000 .0000
 2     3     1    .0000 .1000 .0000 .0000

DADOS DO SISTEMA

BRET = -10.00
BGER =  10.00
```

CASO TESTE II

DADOS DE ENTRADA

75% DA ORDEM DE CORRENTE

(SIMULAÇÃO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO À TENSÃO REDUZIDA)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA


A BARRA DO RETIFICADOR E  4
A BARRA DO GERADOR EM FOZ E  5
A TENSAO BASE DO LADO DE CORRENTE CONTINUA E DE  172  KV

A POTENCIA ATIVA GERADA E A POTENCIA REATIVA CONSUMIDA
NA BARRA DO INVERSOR(BARRA 3) SERAO CALCULADAS P/A PAR
TIDA PLANA E FIXADAS NA SUB-ROTINA "TAPES" E SAO DESIG
NADAS POR "PINI(J)" E "QINI(J)"

RESULTADOS PARA O AJUSTE DO TAPE NO INVERSOR
        (AJUSTE C/A PARTIDA PLANA)

J         =       3       (BARRA DO INVERSOR)
UII(J)    =       1.00    PU
NII(J)    =       1
TNIL1(J)  =       1.0125
PINI(J)   =     286.68    MW
GAMAM     =      17.0000  GRAUS
QINI(J)   =     146.55    MVAR


RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO RETIFICADOR

K         =       4         (BARRA DO RETIFICADOR)
UR1(K)    =       1.00      PU
NRR1(K)   =       2
TNRL1(K)  =       1.0250
PR1(K)    =     301.66      MW
ALFI(K)   =      14.7495    GRAUS
QR1(K)    =     147.08      MVAR

=> AS POTENCIAS ATIVA/REATIVA SAO FIXADAS
   NA BARRA DO INVERSOR COMO :

PINI(J) =     286.68  MW        J =    3
QINI(J) =     146.55  MVAR      J =    3

=> O FLUXO DE CARGA "CA" CONVERGIU NA 6A. ITERACAO

 BARRA     TENSAO          ANGULO

           (PU)            (GRAU)
 1(INT)  1.000000          .000000
 2(TP)    .915831        -5.431424
 3(SRQ)   .940779         -.771312
```

CASO TESTE II: 75% DA ORDEM DE CORRENTE (1/3)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

OBTENCAO DIRETA DA TENSAO CA DA BARRA DO RETIFICADOR
E SEU RESPECTIVO ANGULO DE FASE

=> O MODULO DA TENSAO CA DA BARRA DO RETIFICADOR E DE
   UR2(M) =      .967654    PU


=> O ANGULO DE FASE DA TENSAO NA BARRA DO RETIFICADOR E
   TETAR  =    -3.346887    GRAUS


CALCULO DOS FLUXOS DE POTENCIA NAS LINHAS P/ GERAR O "CASO BASE"


EMI REC     PIK        PKI       QIK       QKI     P.AT.    P.REAT.
            (PU)       (PU)      (PU)      (PU)     (PU)      (PU)

 1   3     .126643-.126643 .593061-.556286 .000000 .036776
 2   3    -.700000 .700000-.200001 .263187 .000000 .063187

RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO INVERSOR
     (AJUSTE P/AS TENSOES CONVERGIDAS)

L          =        3          (BARRA DO INVERSOR )
UI2(L)     =          .940779 PU
NII2(L)    =       -4
TNIL2(L)   =          .9500
PIN2(L)    =      286.68       MW
GAMA2(L)   =       19.1374     GRAUS
QIN2(L)    =      146.55       MVAR


RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO RETIFICADOR

M          =        4          (BARRA DO RETIFICADOR)
UR2(M)     =          .967041 PU
NRR2(M)    =       -1
TNRL2(M)   =          .9875
PR2(M)     =      301.66       MW
ALF2(M)    =       15.4899     GRAUS
QR2(M)     =      150.42       MVAR
```

CASO TESTE II: 75% DA ORDEM DE CORRENTE (2/3)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

MATRIZ JACOBIANA DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
(FOZ DO IGUACU)

-9.660040	.583810	.000000
.564926	-9.370144	-.454304
.000000	.906238	-.263701

MATRIZ INVERSA DA MATRIZ JACOBIANA

-.103844	-.005546	.009555
-.005367	-.091766	.158095
-.018443	-.315364	-3.248861

= * = RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA CC = * =

=> O FLUXO DE CARGA "CC" CONVERGIU NA 3A. ITERACAO

=> TETAR(I)	=> URR(I)	=> ALFAR(I)	=> I
-.062426RAD	.967049PU	.270386RAD	1
-.062429RAD	.967041PU	.270352RAD	2
-3.576936GR	.967041PU	15.489944GR	3

=> O NOVO ANGULO DE FASE DA TENSAO CA
NA BARRA DO RETIFICADOR E DE:

=> TETAR(I) = -3.576936 GRAUS

=> A NOVA TENSAO CA NA BARRA DO RETIFICADOR E DE :

URR(I) = .967041 PU

=> O NOVO ANGULO DE DISPARO DO RETIFICADOR E DE :

ALFAR(I) = 15.489944 GRAUS

CASO TESTE II: 75% DA ORDEM DE CORRENTE (3/3)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA


VALORES DE ENTRADA PARA O INVERSOR E DE VDRN:

J     =      3       (BARRA DO INVERSOR)
RCI   =       .086   PU
GAMAM =     17.00    GRAUS
RD    =      2.87    OHM
CID   =      2.61    KA
CIDN  =      2.61    KA
VDIO  =    164.70    KV
VDIN  =    143.34    KV
VDRN  =    150.83    KV

VALORES DE ENTRADA PARA O RETIFICADOR :

K     =       4      (BARRA DO RETIFICADOR)
ALFA  =      15.00   GRAUS
RCR   =        .089  PU
VDRO  =     172.00   KV

POTENCIA BASE,NO.ITERACOES E TOLERANCIA

SB  =     500          MVA
NIM =      30
TC  =        .000001

DADOS DE BARRA

NO. TIP  VESP     PGAT     QGRE     PCAT     QCRE     QSHU
         (PU)     (MW)    (MVAR)    (MW)    (MVAR)   (MVAR)
1   2  1.0000      .00      .00      .00      .00      .00
2   0  1.0000      .00      .00   350.00   100.00      .00
3   1  1.0000      .00      .00      .00      .00      .00

 DADOS DE RAMOS:

ISEMI IBREC NCIRC RESIST REAT  SUSC  TAPE
                  (PU)  (PU)  (PU)  (PU)
 1     3     1    .0000 .1000 .0000 .0000
 2     3     1    .0000 .1000 .0000 .0000

DADOS DO SISTEMA

BRET = -10.00
BGER =  10.00
```

CASO TESTE III

DADOS DE ENTRADA

100% DA ORDEM DE CORRENTE

(SIMULAÇÃO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO NOMINAL)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA


A BARRA DO RETIFICADOR E  4
A BARRA DO GERADOR EM FOZ E  5
A TENSAO BASE DO LADO DE CORRENTE CONTINUA E DE  172  KV

A POTENCIA ATIVA GERADA E A POTENCIA REATIVA CONSUMIDA
NA BARRA DO INVERSOR(BARRA 3) SERAO CALCULADAS P/A PAR
TIDA PLANA E FIXADAS NA SUB-ROTINA "TAPES" E SAO DESIG
NADAS POR "PINI(J)" E "QINI(J)"

RESULTADOS PARA O AJUSTE DO TAPE NO INVERSOR
        (AJUSTE C/A PARTIDA PLANA)

J          =       3       (BARRA DO INVERSOR)
UII(J)     =       1.00    PU
NII(J)     =       0
TNIL(J)    =       1.0000
PINI(J)    =     374.12    MW
GAMAM      =      17.0000  GRAUS
QINI(J)    =     211.72    MVAR


RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO RETIFICADOR

K          =       4          (BARRA DO RETIFICADOR)
UR(K)      =       1.00       PU
NRS(K)     =       0
TNRL(K)    =       1.0000
PR(K)      =     393.67       MW
ALF(K)     =      15.0001     GRAUS
QR(K)      =     215.76       MVAR

=> AS POTENCIAS ATIVA/REATIVA SAO FIXADAS
   NA BARRA DO INVERSOR COMO :

PINI(J) =     374.12  MW        J =    3
QINI(J) =     211.72  MVAR      J =    3

=> O FLUXO DE CARGA "CA" CONVERGIU NA 7A. ITERACAO

 BARRA     TENSAO            ANGULO

            (PU)             (GRAU)
 1(INT)  1.000000             .000000
 2(TP)    .900067           -4.521496
 3(SRQ)   .925561             .298567
```

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA

OBTENCAO DIRETA DA TENSAO CA DA BARRA DO RETIFICADOR
E SEU RESPECTIVO ANGULO DE FASE

=> O MODULO DA TENSAO CA DA BARRA DO RETIFICADOR E DE
   UR2(M) =      .951202   PU


=> O ANGULO DE FASE DA TENSAO NA BARRA DO RETIFICADOR E
   TETAR  =    -4.295009   GRAUS


CALCULO DOS FLUXOS DE POTENCIA NAS LINHAS P/ GERAR O "CASO BASE"


EMI REC     PIK        PKI       QIK       QKI     P.AT.    P.REAT.
            (PU)       (PU)      (PU)      (PU)     (PU)      (PU)

 1   3    -.048231  .048231  .744514-.688852  .000000  .055662
 2   3    -.700000  .700000-.200001  .265421  .000000  .065420

RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO INVERSOR
     (AJUSTE P/AS TENSOES CONVERGIDAS)

L          =       3          (BARRA DO INVERSOR )
UI2(L)     =         .925561  PU
NII2(L)    =      -6
TNIL2(L)   =         .9250
PIN2(L)    =     374.12       MW
GAMA2(L)   =      17.1031     GRAUS
QIN2(L)    =     211.72       MVAR


RESULTADOS P/O AJUSTE DO TAPE NO RETIFICADOR

M          =       4          (BARRA DO RETIFICADOR)
UR2(M)     =         .950987  PU
NRR2(M)    =      -4
TNRL2(M)   =         .9500
PR2(M)     =     393.67       MW
ALF2(M)    =      15.2002     GRAUS
QR2(M)     =     216.94       MVAR
```

CASO TESTE III: OPERAÇÃO NOMINAL (2/3)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
 FLUXO DE CARGA CC NA BARRA DO RETIFICADOR
          ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA

MATRIZ JACOBIANA DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
              (FOZ DO IGUACU)

 -9.485308          .748919          .000000
   .712373        -9.052128         -.559158
   .000000          .921913         -.263254


MATRIZ INVERSA DA MATRIZ JACOBIANA

  -.105968         -.007208          .015310
  -.006856         -.091290          .193903
  -.024010         -.319698        -3.119566


 = * = RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA CC = * =


=> O FLUXO DE CARGA "CC" CONVERGIU NA 3A. ITERACAO


=> TETAR(I)      => URR(I)      => ALFAR(I)    => I

  -.082880RAD       .951014PU       .265390RAD      1
  -.082886RAD       .950987PU       .265293RAD      2
 -4.749058GR        .950987PU     15.200188GR       3


=> O NOVO ANGULO DE FASE DA TENSAO CA
   NA BARRA DO RETIFICADOR E DE:

=> TETAR(I) =    -4.749058   GRAUS


=> A NOVA TENSAO CA NA BARRA DO RETIFICADOR E DE :

   URR(I)    =    .950987   PU


=> O NOVO ANGULO DE DISPARO DO RETIFICADOR E DE :

   ALFAR(I) =    15.200188   GRAUS
```

CASO TESTE III: OPERAÇÃO NOMINAL (3/3)

A partir desses resultados do Fluxo de Carga indicados pelos Casos Testes I, II e III, inicia-se o processo de estimação para Foz do Iguaçu, após convergidos os mismatches de Potência Ativa (ΔP_{GR}) e Reativa (ΔQ_{GR}), CA bem como os mismatches de Tensão Contínua (ΔV_{DR}), em que novas Medidas do Elo CC são acrescentadas, assim como a inclusão da Ordem de Corrente, I_D, como variável de estado para Foz do Iguaçu, possibilita a monitoração do Elo. O Apêndice "B" descreve os Vetores de Estado e de Medidas utilizados, bem como a Condição de Redundâncias Local e Global além de indicar os Estimadores, independentes, para Foz do Iguaçu e São Roque, o Desacoplamento do Modelo adotado e o Estimador Integrado CA-CC.

4.3 - APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDOS PARA TESTES PARA O ESTIMADOR INTEGRADO CA-CC

4.3.1 - Sistema Elétrico e Sistema de Medição Associado

A Fig. 4.3.1, que a seguir se apresenta, indica o Sistema Elétrico utilizado pelo sistema equivalente idealizado, com os 18 equipamentos das Medidas mostradas pela expressão (22).

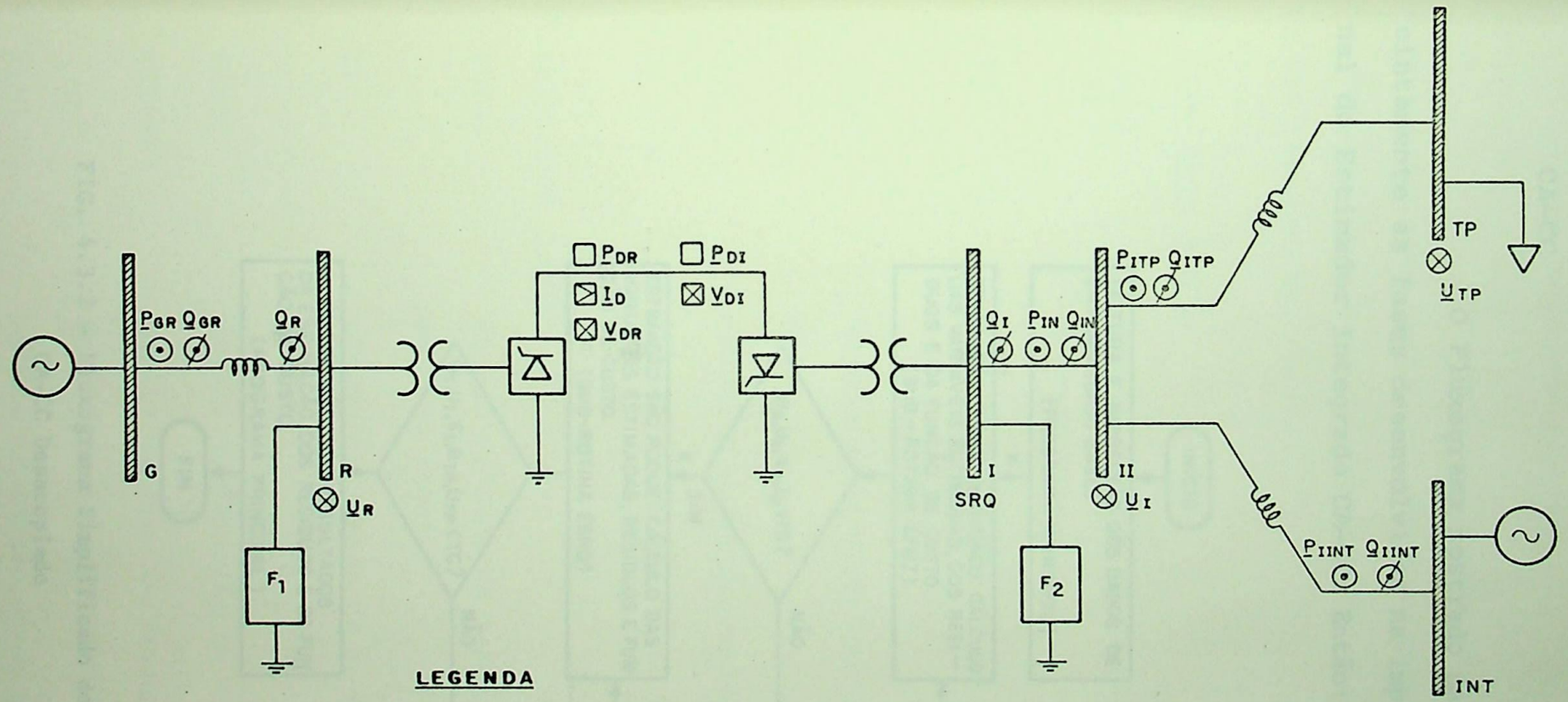


FIG. 4.3.1 – Sistema Elétrico e Sistema de Medição Associado

4.3.2 - Fluxograma Simplificado para o Estimador Integrado CA-CC

O Fluxograma mostrado na Fig. 4.3.2 indica sucintamente as fases desenvolvidas na implementação computacional do Estimador Integrado CA-CC. Então:

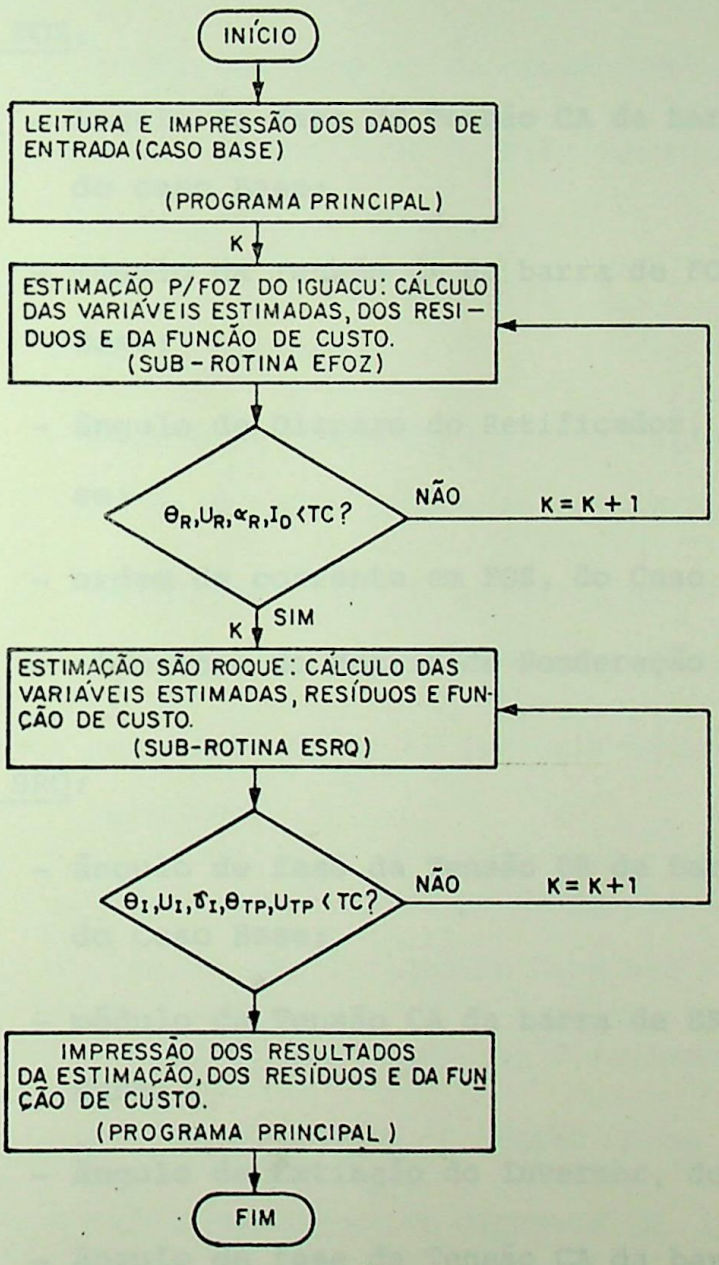


FIG. 4.3.2 - Fluxograma Simplificado do Estimador Integrado CA-CC Desacoplado

- TC é a tolerância de convergência do processo.

4.3.3 - Lista de Variáveis utilizadas pelo Programa para o Estimador Integrado CA-CC

Novamente se acrescenta o significado das variáveis apresentadas pela implementação computacional para os 3 Casos Testes, que a seguir se apresenta, visando um bom entendimento dos resultados. Assim:

Do Caso Base - FOZ:

TETAR - ângulo de fase da Tensão CA da barra de FOZ, do caso Base;

UR1 - módulo da Tensão CA da barra de FOZ, do Caso Base;

ALFAR - ângulo de Disparo do Retificador, do Caso Base;

ID1 - ordem de corrente em FOZ, do Caso Base;

W1(I,I) - elementos da Matriz de Ponderação para FOZ.

Do Caso Base - SRQ:

TETA1 - ângulo de fase da Tensão CA da barra de SRQ, do Caso Base;

UI1 - módulo da Tensão CA da barra de SRQ, do Caso Base;

GAMA1 - ângulo de Extinção do Inversor, do Caso Base;

TETATP1 - ângulo de fase da Tensão CA da barra de Tijuco Preto (TP), do Caso Base;

UTP1 - módulo da Tensão CA da barra de TP, do Caso Base;

W2(I,I) - elementos da Matriz de Ponderação para SRQ.

Da Estimação - FOZ:

K - nº de iteração;

TETAE(K) - ângulo de fase da Tensão CA da barra de FOZ, estimado;

URE(K) - módulo da Tensão CA da barra de FOZ, estimada;

ALFAE(K) - ângulo de Disparo do Retificador, estimado;

IDE(K) - ordem de corrente de FOZ, estimada.

Das Medidas - FOZ:

I - nº de medida

PGRM(I) - medida de fluxo de potência Ativa, CA, da barra do Gerador para o Retificador;

QGRM(I) - medida de fluxo de potência Reativa, CA, da barra do Gerador para o Retificador;

PDRM(I) - medida de fluxo de potência Ativa, CC, de FOZ para SRQ;

QRMM(I) - medida de fluxo de potência Reativa, CA, relacionada com o fluxo de potência Ativa CC;

VDRM(I) - medida de Tensão CC, no Retificador;

URMM(I) - medida de módulo de Tensão CA na barra de FOZ;

IDMM(I) - medida de Ordem de Corrente CC, em FOZ.

Da Estimação - SRQ;

TETAIE(K) - ângulo de fase da Tensão CA na barra de SRQ , estimado;

UIE(K) - módulo da Tensão CA na barra de SRQ, estimado;

GAMAE(K) - ângulo de Extinção do Inversor, estimado;

TETATPE(K) - ângulo de fase da Tensão CA na barra de TP, estimado;

UTPE(K) - módulo da Tensão CA na barra de TP, estimado.

Das Medidas - SRQ:

PDIM(I) - medida do fluxo de potência Ativa, CC, em SRQ;

QIMM(I) - medida de fluxo de potência Reativa, CA, relacionada com o fluxo de potência Ativa CC;

VDIM(I) - medida de Tensão CC, no Inversor;

PINM(I) - medida de fluxo de potência Ativa, CA, resultante da composição, na barra de SRQ;

QINM(I) - medida de fluxo de potência Reativa, CA, resultante da composição, na barra de SRQ;

PITPM(I) - medida de fluxo de potência Ativa, CA, da barra de SRQ para TP;

QITPM(I) - medida de fluxo de potência Reativa, CA, da barra de SRQ para TP;

PIINTM(I) - medida de fluxo de potência Ativa, CA, de Interlagos (INT) para SRQ;

QIINTM(I) - medida de fluxo de potência Reativa, CA, de INT para SRQ;

UINM(I) - medida de módulo de Tensão CA, na barra de SRQ;

UTPM(I) - medida de módulo de Tensão CA, na barra de TP.

Dos Resíduos da Estimação do Sistema Integrado CA-CC:

A esta altura, para não se tornar enfadonho, já se pode utilizar uma forma mneumônica para as variáveis utilizadas. Portanto, ao iniciarmos pela letra R todos os resíduos mantendo-se os respectivos sufixos, denominadores das funções, ficam esclarecidos os significados dos mesmos. Assim sendo:

RPGR(I), RQGR(I), RPDR(I), RQR(I), RVDR(I), RUR(I) e RID(I) são os Resíduos da Estimação para FOZ, e:

RPDI(I), RQI(I), RVDI(I), RPIN(I), RQIN(I), RPITP(I), RQITP(I), RPIINT(I), RQIINT(I), RUI(I) E RUTP(I), são os Resíduos da Estimação para SRQ.

Da Função de Custo do Sistema Integrado CA-CC:

Conforme já descrito pelo Apêndice "B", para o significado da mesma, tem-se como variável indicativa

CUSTO (I)

onde I é o nº do caso determinado pelo resultado de medida.

4.3.4 - Apresentação dos Resultados para o Estimador Integrado CA-CC

Analogamente ao Fluxo de Carga CC, descreveu-se o Estimador Integrado CA-CC, no Apêndice "B", que trata da Estimação Estática do Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, em Sistemas de Potência. Para que se obtivesse os Casos Base a estimar e aferir a performance do Estimador Integrado CA-CC, utiliza-se os 3 Casos Testes, anteriormente apresentados, justo por repre-

sentarem 3 condições de operação características do Elo CC. Convém observar que os Filtros dos harmônicos também não foram utilizados, mas os mesmos são eventualmente considerados na matriz de admitâncias de carga do sistema.

As medidas fornecidas ao Estimador são aquelas do Caso Base, inicialmente, e suas respectivas distorções percentuais indicadas para simular os erros da instrumentação.

A Entrada de Dados é feita via um Arquivo de Dados em que se fornece os valores das variáveis de Estado determinadas pelo Caso Base, pelo Fluxo de Carga CC (Θ_R, U_R, α_R) mais a Ordem de Corrente, I_D, para a Estimação de FOZ. Os valores para o Caso Base de SRQ (Θ_I, U_I, γ_I, Θ_{TP} e U_{TP}) são também obtidos do Fluxo de Carga CC, pela sub-rotina do Fluxo de Carga CA, utilizada para a Convergência das Tensões CA para subsequente Ajuste dos Taps. Além disso, obtém-se, do Arquivo de Dados, dados como sejam: os elementos da Matriz de Ponderação para ambos os extremos, FOZ e SRQ, o número de variáveis a estimar, o nº de iterações máximo, a tolerância de convergência e as Medidas recebidas, simuladas desta feita, a partir das equações das medidas utilizadas.

Os Casos Testes I, II e III, a seguir indicados, fornecem uma perfeita noção da performance do Estimador Integrado CA-CC com relação ao nº de iterações de convergência para as diversas distorções das Medidas. A tolerância de convergência utilizada foi de 10^{-6} (somente para efeito de convergência do processo) para os Ângulos de Fase das Tensões CA, os módulos das mesmas e a Ordem de Corrente. Para os Ângulos de Disparo e Extinção, dos Conversores, 10^{-3} (também por consideração de convergência).

Dado a importância da obtenção das medidas para o Estimador Integrado CA-CC desenvolvido, convém observar que, nesta dissertação, por simplicidade e objetividade de propósito simulou-se as mesmas após a geração do Caso Base a estimar (por substituição direta nas equações das medidas) com distorções percentuais simultânea e concomitantemente. É importante frisar que o Caso Base utilizado é obtido após os ajustes dos taps dos transformadores conversores para o "flat start" e o subsequente ajuste para as tensões convergidas onde, finalmente, fixa-se as Injeções de Potência na barra de SRQ.

CASO TESTE I

10% DA ORDEM DA CORRENTE

(SIMULAÇÃO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO MÍNIMA)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : .26KA

VALORES DAS VARIAVEIS DE ESTADO DO "CASO BASE"
SISTEMA INTEGRADO CA/CC

I . VALORES DO "CASO BASE" P/A ESTIMACAO DE FOZ DO IGUACU
(BLOCO SUPERIOR)

1.TETAR	=	-.452226	GRAUS
2.URi	=	.997547	PU
3.ALFAR	=	15.225021	GRAUS
4.IDi	=	.261000	KA

A - MATRIZ DE PONDERACAO DO BLOCO SUPERIOR

W1(I,I) =	1.00	I = 1
W1(I,I) =	1.00	I = 2
W1(I,I) =	1.00	I = 3
W1(I,I) =	1.00	I = 4
W1(I,I) =	1.00	I = 5
W1(I,I) =	1.00	I = 6
W1(I,I) =	1.00	I = 7

II. VALORES DO "CASO BASE" P/A ESTIMACAO DE SAO RO QUE
(BLOCO INFERIOR)

5.TETAi	=	-3.700965	GRAUS
6.UIi	=	.968529	PU
7.GAMAi	=	23.308372	GRAUS
8.TETATPi	=	-8.089544	GRAUS
9.UTPi	=	.944515	PU

B - MATRIZ DE PONDERACAO DO BLOCO INFERIOR

W2(I,I) =	1.00	I = 1
W2(I,I) =	1.00	I = 2
W2(I,I) =	1.00	I = 3
W2(I,I) =	1.00	I = 4
W2(I,I) =	1.00	I = 5
W2(I,I) =	1.00	I = 6
W2(I,I) =	1.00	I = 7
W2(I,I) =	1.00	I = 8
W2(I,I) =	1.00	I = 9
W2(I,I) =	1.00	I = 10
W2(I,I) =	1.00	I = 11

CASO TESTE I: VALORES DO "CASO BASE"

(SISTEMA INTEGRADO CA-CC)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE :  .26KA

IMPRESSAO DO JACOBIANO DA ESTIMACAO - JACE(I,J)
       (BLOCO SUPERIOR - FOZ DO IGUACU)

-9.975159        .078928        .000000        .000000
-3.060996        .024220        .077118        .026138
  .000000        .087908       -.024089        .868762
  .000000        .026976        .078501        .295699
  .000000        .879082       -.240889       -.081638
  .000000       1.000000        .000000        .000000
  .000000        .000000        .000000       1.000000


MATRIZ "G" P/ "FOZ"

108.873489      -.861451       -.236057       -.080007
  -.861451      1.788057       -.209893        .013214
  -.236057      -.209893        .070717        .023967
  -.080007       .013214        .023967       1.849534


INVERSA DA MATRIZ "G" DE "FOZ"

   .009435        .012693        .069365       -.000581
   .012693        .878240       2.662677       -.040229
   .069365       2.662677      22.379101       -.306015
  -.000581       -.040229       -.306015        .544905


INVERSA DA MATRIZ "G" X JACOBIANO TRANSPOSTO

   .0931    .0573    .4818   -.0026    .0232   -.1867  -1.5700
   .0086    .0011    .0219    .5709   -.4772   -.0056   -.2208
 -1.7381   -.1360    .0055   -.1339   3.0252    .0061   -.0127
  -.8782  -2.6627    .0402    .0006    .0402    .3060   -.5449
```

CASO TESTE I: MATRIZES JACOBIANA; "G", INVERSA DA "G"

E INVERSA DA "G" X JACOBIANA TRANSPOSTA

(FOZ) (2/8)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE :  .26KA

VALORES INICIAIS DAS MEDIDAS - FOZ


"CASO BASE"

=> I        =  1
=> PGRM(I) =   .078734PU
=> QGRM(I) =   .024160PU
=> PDRM(I) =   .087693PU
=> QRM(I)  =   .026910PU
=> VDRM(I) =   .876926PU
=> URMM(I) =   .997547PU
=> IDMM(I) =   .100000PU


"DISTORCAO DE +5%"

=> I        =  2
=> PGRM(I) =   .082671PU
=> QGRM(I) =   .025368PU
=> PDRM(I) =   .092078PU
=> QRM(I)  =   .028255PU
=> VDRM(I) =   .920772PU
=> URMM(I) =  1.047424PU
=> IDMM(I) =   .105000PU


"DISTORCAO DE -5%"

=> I        =  3
=> PGRM(I) =   .074797PU
=> QGRM(I) =   .022952PU
=> PDRM(I) =   .083308PU
=> QRM(I)  =   .025564PU
=> VDRM(I) =   .833080PU
=> URMM(I) =   .947670PU
=> IDMM(I) =   .095000PU
```

CASO TESTE I: MEDIDAS DISTORCIDAS PERCENTUALMENTE (FOZ)

(3/8)

```
COLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
TIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
        ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
        ORDEM DE CORRENTE :  .26KA

OZ"


TIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 1

PROCESSO CONVERGIU NA 1A. ITERACAO

 TETAE(K)            => URE(K)       => ALFAE(K)          => IDE(K)     => K
-.452226 GR          .997547 PU   15.224974 GR          .100000 PU        1


TIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 2

PROCESSO CONVERGIU NA 4A. ITERACAO

 TETAE(K)            => URE(K)       => ALFAE(K)          => IDE(K)     => K
-.007896 RAD         1.047223 PU      .264195 RAD         .102725 PU        1
-.007896 RAD         1.047218 PU      .264228 RAD         .102663 PU        2
-.007896 RAD         1.047218 PU      .264227 RAD         .102665 PU        3
-.452390 GR          1.047218 PU   15.139105 GR          .102665 PU        4


TIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 3

PROCESSO CONVERGIU NA 4A. ITERACAO

 TETAE(K)            => URE(K)       => ALFAE(K)          => IDE(K)     => K
-.007890 RAD          .947871 PU      .267255 RAD         .097275 PU        1
-.007890 RAD          .947866 PU      .267288 RAD         .097214 PU        2
-.007890 RAD          .947866 PU      .267289 RAD         .097212 PU        3
-.452054 GR           .947866 PU   15.314539 GR          .097212 PU        4
```

CASO TESTE I: VARIÁVEIS ESTIMADAS - SAÍDA (FOZ)

(4/8)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : .26KA

IMPRESSAO DO JACOBIANO DA ESTIMACAO - JACE(I,J)
(BLOCO INFERIOR - SAO ROQUE)

.000000	.089856	-.037850	.000000	.000000
.000000	.040995	.082962	.000000	.000000
.000000	.898557	-.378496	.000000	.000000
18.786171	.077254	.000000	-9.121080	.741121
8.570797	.035246	.086174	-4.161302	.338121
9.121080	.722746	.000000	-9.121080	.741121
.700000	9.953123	.000000	-.700000	-9.656893
9.665091	-.645491	.000000	.000000	.000000
-.625177	9.391434	.000000	.000000	.000000
.000000	1.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	1.000000

MATRIZ "G" P/ "SRQ"

603.867676	3.202769	.738579	-290.699951	16.820797
3.202769	190.027069	-.337063	-14.410719	-95.511429
.738579	-.337063	.159000	-.358595	.029137
-290.699951	-14.410719	-.358595	184.194672	-8.166849
16.820797	-95.511429	.029137	-8.166849	95.468414

INVERSA DA MATRIZ "G" DE "SRQ"

.007033	.001175	-.005035	.011221	.000897
.001175	.011196	.023600	.003275	.011267
-.005035	.023599	6.375011	.007338	.023179
.011221	.003275	.007338	.023556	.003312
.000897	.011267	.023179	.003312	.021865

INVERSA DA MATRIZ "G" X JACOBIANO TRANSPOSTO

-.0003-.0001 .2392-.0000-.0001 .0004-.0024-.5299-.0007-.0024-.0030
-.00112.3917-.0002-.0014-.0305-.0014 .1425 .0013-.0037-.0135-.0027
-.4843-.0000-.0037 .0367 .0027 .0786 .1077-.0023-.0001-.0012-.0024
.0080 .1007-.0672-.0041 .0639-.1063-.0014-.0066-.1044-.2248-.0237
-.1053-.0012-.0112-.0236-.0033-.0113-.0009-.0113-.0232-.0033-.0219

CASO TESTE I: MATRIZES JACOBIANA, "G", INVERSA DA "G" E

INVERSA DA "G" X JACOBIANA TRANSPOSTA (SRQ)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE :  ,26KA

"SRQ"


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 1

O PROCESSO CONVERGIU NA 1A. ITERACAO

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
-3.701174 GR   .968543 PU23.306206 GR -8.086426 GR   .944539 PU 1


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 2

O PROCESSO CONVERGIU NA 4A. ITERACAO

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
 -.067711 RAD  .967987 PU   .301246 RAD -.148348 RAD  .943436 PU 1
 -.067696 RAD  .967988 PU   .289325 RAD -.148357 RAD  .943445 PU 2
 -.067692 RAD  .967989 PU   .286441 RAD -.148357 RAD  .943447 PU 3

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
-3.878409 GR   .967990 PU16.369026 GR -8.500238 GR   .943448 PU 4


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 3

O PROCESSO CONVERGIU NA 4A. ITERACAO

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
 -.061484 RAD  .969099 PU   .513294 RAD -.133922 RAD  .945642 PU 1
 -.061469 RAD  .969100 PU   .500786 RAD -.133931 RAD  .945652 PU 2
 -.061472 RAD  .969099 PU   .503149 RAD -.133931 RAD  .945651 PU 3

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
-3.522046 GR   .969099 PU28.801727 GR -7.673699 GR   .945651 PU 4
```

CASO TESTE I: VARIÁVEIS ESTIMADAS - SAÍDA (SRQ)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : .26KA

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

INVERSA DA MATRIZ "G" DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
(FOZ DO IGUACU E SAO ROQUE)

.0094	.0127	.0694	-.0006	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0127	.8782	2.6627	-.0402	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0694	2.662722	.3791	-.3060	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-.0006	-.0402	-.3060	.5449	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0070	.0012	-.0050	.0112	.0009
.0000	.0000	.0000	.0000	.0012	.0112	.0236	.0033	.0113
.0000	.0000	.0000	.0000	-.0050	.0236	6.3797	.0073	.0232
.0000	.0000	.0000	.0000	.0112	.0033	.0073	.0236	.0033
.0000	.0000	.0000	.0000	.0009	.0113	.0232	.0033	.0219

MATRIZ JACOBIANA DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
(FOZ DO IGUACU E SAO ROQUE)

-9.9752	.0789	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.0610	.0242	.0771	.0261	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0879	-.0241	.9688	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0006	.0270	.0785	.2957	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.8791	-.2409	-.0816	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0899	-.0378	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0410	.0830	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.8986	-.3785	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	18.7867	.0767	.0000	-9.1215	.7406
.0000	.0000	.0000	.0000	8.5702	.0350	.0855	-4.1611	.3378
.0000	.0000	.0000	.0000	9.1215	.7222	.0000	-9.1215	.7406
.0000	.0000	.0000	.0000	.6995	9.9531	.0000	-.6995	-9.6571
.0000	.0000	.0000	.0000	9.6652	-.6455	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	-.6252	9.3917	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000

CASO TESTE I: MATRIZES JACOBIANA E "G" (SISTEMA INTEGRADO CA-CC) (8/8)

CASO TESTE II

75% DA ORDEM DA CORRENTE

(SIMULAÇÃO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO À TENSÃO REDUZIDA)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

VALORES DAS VARIAVEIS DE ESTADO DO "CASO BASE"
SISTEMA INTEGRADO CA/CC

I . VALORES DO "CASO BASE" P/A ESTIMACAO DE FOZ DO IGUACU
(BLOCO SUPERIOR)

1.TETAR	=	-3.576936	GRAUS
2.UR1	=	.967041	PU
3.ALFAR	=	15.489944	GRAUS
4.IDI	=	2.000000	KA

A - MATRIZ DE PONDERACAO DO BLOCO SUPERIOR

W1(I,I)	= 1.00	I = 1
W1(I,I)	= 1.00	I = 2
W1(I,I)	= 1.00	I = 3
W1(I,I)	= 1.00	I = 4
W1(I,I)	= 1.00	I = 5
W1(I,I)	= 1.00	I = 6
W1(I,I)	= 1.00	I = 7

II. VALORES DO "CASO BASE" P/A ESTIMACAO DE SAO RO QUE
(BLOCO INFERIOR)

5.TETA1	=	-.771312	GRAUS
6.UI1	=	.940779	PU
7.GAMA1	=	19.136490	GRAUS
8.TETATP1	=	-5.431424	GRAUS
9.UTP1	=	.915831	PU

B - MATRIZ DE PONDERACAO DO BLOCO INFERIOR

W2(I,I)	= 1.00	I = 1
W2(I,I)	= 1.00	I = 2
W2(I,I)	= 1.00	I = 3
W2(I,I)	= 1.00	I = 4
W2(I,I)	= 1.00	I = 5
W2(I,I)	= 1.00	I = 6
W2(I,I)	= 1.00	I = 7
W2(I,I)	= 1.00	I = 8
W2(I,I)	= 1.00	I = 9
W2(I,I)	= 1.00	I = 10
W2(I,I)	= 1.00	I = 11

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

IMPRESSAO DO JACOBIANO DA ESTIMACAO - JACE(I,J)
       (BLOCO SUPERIOR - FOZ DO IGUACU)


-9.651571        .623588        .000000        .000000
-4.797401        .310109        .451442        .150442
  .000000        .694076       -.200411        .810140
  .000000        .345394        .403193        .570247
  .000000        .906813       -.261536       -.087156
  .000000       1.000000        .000000        .000000
  .000000        .000000        .000000       1.000000


MATRIZ "G" P/ "FOZ"


116.167892     -7.509212     -2.165750      -.721729
 -7.509212      2.909964      -.097168       .727526
 -2.165750      -.097168       .474931       .158269
  -.721729       .727526       .158269      2.011736


INVERSA DA MATRIZ "G" DE "FOZ"


  .012206        .037403        .068151       -.014509
  .037403        .499937        .337475       -.193929
  .068151        .337475       2.585706       -.301020
 -.014509       -.193929       -.301020        .585693


INVERSA DA MATRIZ "G" X JACOBIANO TRANSPOSTO


  .0945   .0491   .4472  -.0190   .0184  -.0988  -.8997
  .0383  -.0006  -.1227   .5276  -.4001  -.0321  -.1982
 -.9874  -.1456  -.0174  -.3820   .3440   .1482  -.0374
 -.4999  -.3375   .1939   .0145   .1939   .3010  -.5857
```

CASO TESTE II: MATRIZES JACOBIANA, "G", INVERSA DA "G"

E INVERSA DA "G" X JACOBIANA TRANSPOSTA

(FOZ) (2/8)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

VALORES INICIAIS DAS MEDIDAS - FOZ


"CASO BASE"

=> I        =  1
=> PGRM(I) =    .603325PU
=> QGRM(I) =    .299888PU
=> PDRM(I) =    .671974PU
=> QRM(I)  =    .334011PU
=> VDRM(I) =    .876926PU
=> URMM(I) =    .967041PU
=> IDMM(I) =    .766284PU


"DISTORCAO DE +5%"

=> I        =  2
=> PGRM(I) =    .633491PU
=> QGRM(I) =    .314882PU
=> PDRM(I) =    .705573PU
=> QRM(I)  =    .350712PU
=> VDRM(I) =    .920772PU
=> URMM(I) =   1.015393PU
=> IDMM(I) =    .804598PU


"DISTORCAO DE -5%"

=> I        =  3
=> PGRM(I) =    .573159PU
=> QGRM(I) =    .284894PU
=> PDRM(I) =    .638375PU
=> QRM(I)  =    .317310PU
=> VDRM(I) =    .833080PU
=> URMM(I) =    .918669PU
=> IDMM(I) =    .727970PU
```

CASO TESTE II: MEDIDAS DISTORCIDAS PERCENTUALMENTE (FOZ)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA


"FOZ"



ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 1


O PROCESSO CONVERGIU NA 1A. ITERACAO


=> TETAE(K)          => URE(K)       => ALFAE(K)          => IDE(K)     =>
 -3.576936 GR        .967041 PU    15.489939 GR           .766284 PU


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 2


O PROCESSO CONVERGIU NA 4A. ITERACAO


=> TETAE(K)          => URE(K)       => ALFAE(K)          => IDE(K)     =>
  -.062985 RAD       1.007963 PU      .258817 RAD         .788724 PU
  -.062974 RAD       1.007788 PU      .258848 RAD         .788329 PU
  -.062974 RAD       1.007792 PU      .258854 RAD         .788337 PU
 -3.608166 GR        1.007792 PU    14.831247 GR          .788337 PU


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 3


O PROCESSO CONVERGIU NA 4A. ITERACAO


=> TETAE(K)          => URE(K)       => ALFAE(K)          => IDE(K)     =>
  -.061873 RAD        .926119 PU      .281883 RAD         .743843 PU
  -.061862 RAD        .925945 PU      .281939 RAD         .743448 PU
  -.061862 RAD        .925941 PU      .281935 RAD         .743439 PU
 -3.544436 GR         .925941 PU    16.153664 GR          .743439 PU
```

CASO TESTE II: VARIÁVEIS ESTIMADAS (FOZ) (4/8)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA


IMPRESSAO DO JACOBIANO DA ESTIMACAO - JACE(I,J)
          (BLOCO INFERIOR - SAO ROQUE)

    .000000      .703885     -.248765      .000000      .000000
    .000000      .384849      .458220      .000000      .000000
    .000000      .925095     -.324638      .000000      .000000
  17.994400      .609448      .000000    -8.587461      .764333
   9.769041      .330866      .510053    -4.662076      .414951
   8.587461      .744064      .000000    -8.587461      .764333
    .699999     9.687546      .000000     -.699999    -9.376690
   9.406937     -.134615      .000000      .000000      .000000
   -.126643     8.816406      .000000      .000000      .000000
    .000000     1.000000      .000000      .000000      .000000
    .000000      .000000      .000000      .000000     1.000000


MATRIZ "G" P/ "SRQ"

 581.973511    24.986931     4.982730  -274.304688    17.807381
  24.986931   175.138062     -.131562   -19.947029   -89.665283
   4.982730     -.131562      .637393    -2.377907      .211647
-274.304688   -19.947029    -2.377907   169.713959    -8.498209
  17.807381   -89.665283      .211647    -8.498209    90.262894


INVERSA DA MATRIZ "G" DE "SRQ"

    .007341      .000230     -.013676      .011696     -.000086
    .000230      .012333      .006053      .002529      .012430
   -.013676      .006053     1.684571      .002460      .004992
    .011696      .002529      .002460      .025257      .002577
   -.000086      .012430      .004992      .002577      .023675


INVERSA DA MATRIZ "G" X JACOBIANO TRANSPOSTO

.0036-.0072 .4148-.0012-.0076 .0062-.0075-.7742-.0021-.0071-.0047
.0094 .5413-.0015-.0099-.0317 .0006 .2597 .0029-.0020-.0103-.0028
.7182 .0003-.0036 .0373 .0011 .1302 .1126-.0045 .0000-.0013-.0005
.0092 .1034-.0690-.0005 .1295-.1097 .0025-.0011-.1087-.0551-.0208
.1096-.0002-.0123-.0061-.0025-.0124 .0001-.0124-.0050-.0026-.0237
```

CASO TESTE II: MATRIZES JACOBIANA, "G", INVERSA DE "G" E

INVERSA DA "G" X JACOBIANA TRANSPOSTA (SRQ)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA


VALORES INICIAIS DAS MEDIDAS - SRQ


"CASO BASE"

=> I          =  1
=> PDIM(I)    =    .666904PU
=> QIM(I)     =    .362058PU
=> VDIM(I)    =    .870310PU
=> PINM(I)    =    .573356PU
=> QINM(I)    =    .311272PU
=> PITPM(I)   =    .700000PU
=> QITPM(I)   =    .263188PU
=> PIINTM(I)  =    .126643PU
=> QIINTM(I)  =    .556236PU
=> UINM(I)    =    .940779PU
=> UTPM(I)    =    .915831PU

"DISTORCAO DE +5%"

=> I          =  2
=> PDIM(I)    =    .700249PU
=> QIM(I)     =    .380161PU
=> VDIM(I)    =    .913825PU
=> PINM(I)    =    .602024PU
=> QINM(I)    =    .326835PU
=> PITPM(I)   =    .735000PU
=> QITPM(I)   =    .276347PU
=> PIINTM(I)  =    .132975PU
=> QIINTM(I)  =    .584100PU
=> UINM(I)    =    .987818PU
=> UTPM(I)    =    .961623PU

"DISTORCAO DE -5%"

=> I          =  3
=> PDIM(I)    =    .633559PU
=> QIM(I)     =    .343955PU
=> VDIM(I)    =    .826795PU
=> PINM(I)    =    .544688PU
=> QINM(I)    =    .295708PU
=> PITPM(I)   =    .665000PU
=> QITPM(I)   =    .250029PU
=> PIINTM(I)  =    .120311PU
=> QIINTM(I)  =    .529472PU
=> UINM(I)    =    .893740PU
=> UTPM(I)    =    .870039PU
```

CASO TESTE II: MEDIDAS DISTORCIDAS PERCENTUALMENTE (SRQ)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA


"SRQ"



ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 1


O PROCESSO CONVERGIU NA 1A. ITERACAO


  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
 -.771544 GR    .940844 PU19.148010 GR -5.430107 GR    .915931 PU 1


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 2


O PROCESSO CONVERGIU NA 3A. ITERACAO


  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
 -.013954 RAD   .939765 PU   .309812 RAD -.099814 RAD   .914291 PU 1
 -.013948 RAD   .939767 PU   .309649 RAD -.099828 RAD   .914302 PU 2

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
 -.799134 GR    .939768 PU17.741505 GR -5.719712 GR    .914303 PU 3


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 3


O PROCESSO CONVERGIU NA 3A. ITERACAO


  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
 -.012978 RAD   .941923 PU   .358580 RAD -.089733 RAD   .917571 PU 1
 -.012972 RAD   .941925 PU   .358468 RAD -.089747 RAD   .917583 PU 2

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
 -.743240 GR    .941925 PU20.533666 GR -5.142100 GR    .917583 PU 3
```

CASO TESTE II: VARIÁVEIS ESTIMADAS - SAÍDA (SRQ)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC, DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

INVERSA DA MATRIZ "G" DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
(FOZ DO IGUACU E SAO ROQUE)

.0122	.0374	.0682	-.0145	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0374	.4999	.3375	-.1939	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0682	.3375	2.5857	-.3010	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-.0145	-.1939	-.3010	.5857	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0073	.0002	-.0137	.0117	-.0001
.0000	.0000	.0000	.0000	.0002	.0123	.0061	.0025	.0124
.0000	.0000	.0000	.0000	-.0137	.0061	1.6834	.0025	.0050
.0000	.0000	.0000	.0000	.0117	.0025	.0025	.0253	.0026
.0000	.0000	.0000	.0000	-.0001	.0124	.0050	.0026	.0237

MATRIZ JACOBIANA DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
(FOZ DO IGUACU E SAO ROQUE)

-9.6516	.6239	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-4.7974	.3101	.4514	.1504	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.6949	-.2004	.8101	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.3454	.4032	.5702	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.9068	-.2615	-.0872	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.7088	-.2489	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.3849	.4584	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.9250	-.3248	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	7.9966	.6092	.0000	-8.5890	.7641
.0000	.0000	.0000	.0000	9.7735	.3309	.5102	-4.6645	.4150
.0000	.0000	.0000	.0000	8.5890	.7439	.0000	-8.5890	.7641
.0000	.0000	.0000	.0000	.6999	9.6878	.0000	-.6999	-9.3774
.0000	.0000	.0000	.0000	9.4076	-.1347	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	-.1267	8.8178	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000

CASO TESTE II: MATRIZES JACOBIANA E "G" (SISTEMA INTEGRADO CA-CC) (8/8)

CASO TESTE III

100% DA ORDEM DE CORRENTE

(SIMULAÇÃO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO NOMINAL)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA

VALORES DAS VARIAVEIS DE ESTADO DO "CASO BASE"
SISTEMA INTEGRADO CA/CC

I . VALORES DO "CASO BASE" P/A ESTIMACAO DE FOZ DO IGUACU
(BLOCO SUPERIOR)

1.TETAR	=	-4.749058	GRAUS
2.UR1	=	.950987	PU
3.ALFAR	=	15.200188	GRAUS
4.ID1	=	2.610000	KA

A - MATRIZ DE PONDERACAO DO BLOCO SUPERIOR

W1(I,I)	=	1.00	I = 1
W1(I,I)	=	1.00	I = 2
W1(I,I)	=	1.00	I = 3
W1(I,I)	=	1.00	I = 4
W1(I,I)	=	1.00	I = 5
W1(I,I)	=	1.00	I = 6
W1(I,I)	=	1.00	I = 7

II. VALORES DO "CASO BASE" P/A ESTIMACAO DE SAO RO QUE
(BLOCO INFERIOR)

5.TETA1	=	.298567	GRAUS
6.UI1	=	.925561	PU
7.GAMA1	=	17.103065	GRAUS
8.TETATP1	=	-4.521496	GRAUS
9.UTP1	=	.900067	PU

B - MATRIZ DE PONDERACAO DO BLOCO INFERIOR

W2(I,I)	=	1.00	I = 1
W2(I,I)	=	1.00	I = 2
W2(I,I)	=	1.00	I = 3
W2(I,I)	=	1.00	I = 4
W2(I,I)	=	1.00	I = 5
W2(I,I)	=	1.00	I = 6
W2(I,I)	=	1.00	I = 7
W2(I,I)	=	1.00	I = 8
W2(I,I)	=	1.00	I = 9
W2(I,I)	=	1.00	I = 10
W2(I,I)	=	1.00	I = 11

CASO TESTE III: VALORES DO "CASO BASE" (SISTEMA

INTEGRADO CA-CC) (1/8)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.6iKA

IMPRESSAO DO JACOBIANO DA ESTIMACAO - JACE(I,J)
(BLOCO SUPERIOR - FOZ DO IGUACU)

-9.477222	.827918	.000000	.000000
-5.217601	.455803	.557772	.189333
.000000	.922122	-.262465	.787833
.000000	.507666	.476740	.644611
.000000	.922122	-.262465	-.089092
.000000	1.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	1.000000

MATRIZ "G" P/ "FOZ"

117.041107	-10.224562	-2.910231	-.987864
-10.224562	3.851547	.012210	1.057870
-2.910231	.012210	.676165	.229521
-.987864	1.057870	.229521	2.079989

INVERSA DA MATRIZ "G" DE "FOZ"

.013674	.042192	.065630	-.022206
.042192	.433513	.251216	-.228164
.065630	.251216	1.859299	-.301765
-.022206	-.228164	-.301765	.619567

INVERSA DA MATRIZ "G" X JACOBIANO TRANSPOSTO

.0947	.0409	.4140	-.0216	.0197	-.0744	-.7520
.0391	-.0042	-.1541	.4941	-.3569	-.0384	-.1925
-.8194	-.1397	-.0237	-.3541	.2295	.1864	-.0422
-.4335	-.2512	.2282	.0222	.2282	.3018	-.6196

CASO TESTE III: MATRIZES JACOBIANA, "G", INVERSA DE "G"
E INVERSA DE "G" X JACOBIANA TRANSPOSTA
(FOZ) (2/8)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA

VALORES INICIAIS DAS MEDIDAS - FOZ


"CASO BASE"

=> I        =   1
=> PGRM(I) =    .787339PU
=> QGRM(I) =    .433463PU
=> PDRM(I) =    .876926PU
=> QRM(I)  =    .482784PU
=> VDRM(I) =    .876926PU
=> URMM(I) =    .950987PU
=> IDMM(I) =   1.000000PU


"DISTORCAO DE +5%"

=> I        =   2
=> PGRM(I) =    .826706PU
=> QGRM(I) =    .455136PU
=> PDRM(I) =    .920772PU
=> QRM(I)  =    .506923PU
=> VDRM(I) =    .920772PU
=> URMM(I) =    .998536PU
=> IDMM(I) =   1.050000PU


"DISTORCAO DE -5%"

=> I        =   3
=> PGRM(I) =    .747972PU
=> QGRM(I) =    .411790PU
=> PDRM(I) =    .833080PU
=> QRM(I)  =    .458645PU
=> VDRM(I) =    .833080PU
=> URMM(I) =    .903438PU
=> IDMM(I) =    .950000PU
```

CASO TESTE III: MEDIDAS DISTORCIDAS PERCENTUALMENTE

(FOZ) (3/8)

```
: FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
-CAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
     ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
     ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA



ACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 1

CESSO CONVERGIU NA 1A. ITERACAO

TAE(K)          => URE(K)       => ALFAE(K)        => IDE(K)     => K
49055 GR        .950987 PU    15.200218 GR       1.000000 PU       1


ACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 2

CESSO CONVERGIU NA 4A. ITERACAO

AE(K)           => URE(K)       => ALFAE(K)        => IDE(K)     => K
3997 RAD        .987128 PU      .250205 RAD      1.030978 PU       1
3979 RAD        .986870 PU      .250088 RAD      1.030526 PU       2
3979 RAD        .986876 PU      .250095 RAD      1.030536 PU       3
1668 GR         .986876 PU    14.329332 GR       1.030536 PU       4


-CAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 3

-ESSO CONVERGIU NA 4A. ITERACAO

-E(K)           => URE(K)       => ALFAE(K)        => IDE(K)     => K
 776 RAD        .914846 PU      .280382 RAD       .969022 PU       1
 758 RAD        .914590 PU      .280310 RAD       .968569 PU       2
 758 RAD        .914583 PU      .280304 RAD       .968560 PU       3
381 GR          .914583 PU    16.060196 GR        .968560 PU       4
```

CASO TESTE III: VARIÁVEIS ESTIMADAS - SAÍDA (FOZ)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2,61KA

IMPRESSAO DO JACOBIANO DA ESTIMACAO - JACE(I,J)
(BLOCO INFERIOR - SAO ROQUE)

.000000	.940870	-.292549	.000000	.000000
.000000	.532447	.516954	.000000	.000000
.000000	.940870	-.292549	.000000	.000000
17.556690	.808407	.000000	-8.301207	.777719
9.935493	.457485	.586421	-4.697730	.440118
8.301207	.756297	.000000	-8.301207	.777719
.699999	9.542379	.000000	-.699999	-9.222878
9.255484	.052110	.000000	.000000	.000000
.048231	8.511354	.000000	.000000	.000000
.000000	1.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	1.000000

MATRIZ "G" P/ "SRQ"

562.017700	32.588928	5.826380	-261.815979	18.026974
32.588928	167.991669	-.006972	-21.817734	-86.589951
5.826380	-.006972	.782301	-2.754847	.258095
-261.815979	-21.817734	-2.754847	160.378754	-8.523565
18.026974	-86.589951	.258095	-8.523565	87.464859

INVERSA DA MATRIZ "G" DE "SRQ"

.007576	-.000159	-.013707	.012084	-.000501
-.000159	.013087	.005079	.002310	.013199
-.013707	.005079	1.387400	.002358	.003989
.012084	.002310	.002358	.026443	.002366
-.000501	.013199	.003989	.002366	.024822

INVERSA DA MATRIZ "G" X JACOBIANO TRANSPOSTO

-.0039	-.0108	.4011	-.0015	-.0113	.0072	-.0096	-.7199	-.0024	-.0091	-.0039
-.0108	.4011	-.0015	-.0113	-.0322	.0011	.2530	.0036	-.0015	-.0102	-.0023
-.6704	.0007	-.0032	.0379	.0003	.1264	.1156	-.0055	.0001	-.0014	-.0004
.0098	.1050	-.0701	.0008	.1266	-.1120	.0039	.0010	-.1114	-.0426	-.0202
-.1123	.0002	-.0131	-.0051	-.0023	-.0132	.0005	-.0132	-.0040	-.0024	-.0248

CASO TESTE III: MATRIZES JACOBIANA, "G", INVERSA DE "G"

E INVERSA DE "G" X JACOBIANA TRANSPOSTA

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA


VALORES INICIAIS DAS MEDIDAS - SRQ


"CASO BASE"

=> I          =   1
=> PDIM(I)    =    .870833PU
=> QIM(I)     =    .492612PU
=> VDIM(I)    =    .870833PU
=> PINM(I)    =    .748231PU
=> QINM(I)    =    .423431PU
=> PITPM(I)   =    .700000PU
=> QITPM(I)   =    .265421PU
=> PIINTM(I)  =   -.048231PU
=> QIINTM(I)  =    .688853PU
=> UINM(I)    =    .925561PU
=> UTPM(I)    =    .900067PU

"DISTORCAO DE +5%"

=> I          =   2
=> PDIM(I)    =    .914375PU
=> QIM(I)     =    .517453PU
=> VDIM(I)    =    .914375PU
=> PINM(I)    =    .785643PU
=> QINM(I)    =    .444603PU
=> PITPM(I)   =    .735000PU
=> QITPM(I)   =    .278692PU
=> PIINTM(I)  =   -.050643PU
=> QIINTM(I)  =    .723296PU
=> UINM(I)    =    .971839PU
=> UTPM(I)    =    .945070PU

"DISTORCAO DE -5%"

=> I          =   3
=> PDIM(I)    =    .827291PU
=> QIM(I)     =    .468171PU
=> VDIM(I)    =    .827291PU
=> PINM(I)    =    .710819PU
=> QINM(I)    =    .402259PU
=> PITPM(I)   =    .665000PU
=> QITPM(I)   =    .252150PU
=> PIINTM(I)  =   -.045819PU
=> QIINTM(I)  =    .654410PU
=> UINM(I)    =    .879283PU
=> UTPM(I)    =    .855064PU
```

CASO TESTE III: MEDIDAS DISTORCIDAS PERCENTUALMENTE (SRQ)

```
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
          ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
          ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA


"SRQ"



ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 1

O PROCESSO CONVERGIU NA 1A. ITERACAO

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
  .298016 GR    .925690 PU17.126835 GR -4.518801 GR    .900256 PU 1


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 2

O PROCESSO CONVERGIU NA 3A. ITERACAO

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
  .005625 RAD   .924251 PU   .280760 RAD -.083216 RAD   .898242 PU 1
  .005631 RAD   .924251 PU   .280690 RAD -.083234 RAD   .898252 PU 2

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
  .322652 GR    .924251 PU16.082352 GR -4.768940 GR    .898252 PU 3


ESTIMACAO DO CASO DETERMINADO PELA MEDIDA NO.: 3

O PROCESSO CONVERGIU NA 3A. ITERACAO

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
  .004728 RAD   .927128 PU   .317216 RAD -.074599 RAD   .902271 PU 1
  .004735 RAD   .927128 PU   .317176 RAD -.074616 RAD   .902281 PU 2

  =>TETAIE(K)  =>UIE(K)     =>GAMAE(K)    =>TETATPE(K) =>UTPE(K) =>K
  .271277 GR    .927128 PU18.172756 GR -4.275191 GR    .902281 PU 3
```

CASO TESTE III: VARIÁVEIS ESTIMADAS - SAÍDA (SRQ)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA

INVERSA DA MATRIZ "G" DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
(FOZ DO IGUACU E SAO ROQUE)

.0137	.0422	.0656	-.0222	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0422	.4335	.2512	-.2282	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0656	.2512	1.8593	-.3018	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-.0222	-.2282	-.3018	.6196	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0076	-.0002	-.0137	.0121	-.0005
.0000	.0000	.0000	.0000	-.0002	.0131	.0051	.0023	.0132
.0000	.0000	.0000	.0000	-.0137	.0051	1.3723	.0023	.0040
.0000	.0000	.0000	.0000	.0121	.0023	.0023	.0264	.0024
.0000	.0000	.0000	.0000	-.0005	.0132	.0040	.0024	.0248

MATRIZ JACOBIANA DO SISTEMA INTEGRADO CA/CC
(FOZ DO IGUACU E SAO ROQUE)

-9.4772	.8279	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-5.2176	.4558	.5578	.1893	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.9221	-.2625	.7878	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.5077	.4767	.6446	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.9221	-.2625	-.0891	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.9402	-.2947	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.5337	.5192	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.9402	-.2947	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	7.5609	.8080	.0000	-8.3041	.7773
.0000	.0000	.0000	.0000	9.9684	.4586	.5899	-4.7138	.4412
.0000	.0000	.0000	.0000	8.3041	.7559	.0000	-8.3041	.7773
.0000	.0000	.0000	.0000	.6998	9.5430	.0000	-.6998	-9.2242
.0000	.0000	.0000	.0000	9.2568	.0520	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0481	8.5139	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000

CASO TESTE III: MATRIZES JACOBIANA E "G"

(SISTEMA INTEGRADO CA-CC) (8/8)

4.4 - ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O ESTIMADOR INTEGRADO CA-CC

Os resultados obtidos com a modelagem implementada nos 3 Casos eleitos para Testes produz aspectos que merecem um espaço para análise neste trabalho. Analisa-se sequencialmente, os Valores das V. E. do Caso Base a ser estimado, os Valores das Medidas utilizadas, o Jacobiano da Estimação, a Matriz de Sensitividade "G", sua Inversa e o Produto da Inversa da Matriz "G" pelo Jacobiano transposto, bem como as Estimações dos casos determinados pelas medidas.

4.4.1 - Análise dos Resultados obtidos

Para melhor compreensão, analisa-se as saídas indicadas pela implementação computacional no item 4.3.4.

Valores das V. E. do Caso Base

Para FOZ, eles são originados do Fluxo de Carga CC, de onde obtém-se θ_R, U_R e α_R, mais a Ordem de Corrente, I_D, imposta ao Elo CC, pelo referido fluxo de carga. Para SRQ, os mesmos são obtidos do Fluxo de Carga CA, de onde provêm os módulos das Tensões CA e os respectivos Ângulos de Fase, quando da obtenção das tensões convergidas para o Ajuste dos Tapes, para SRQ e TP. O Ângulo de Extinção do Inversor, γ_I, é originado das Injeções de Potência no mesmo, após o Ajuste dos Tapes referido.

Valores das Medidas utilizadas

São todos determinados por substituição direta das V. E. nas expressões (23) à (40), das Medidas, para o Caso Base. Os outros 2 casos apresentados são obtidos por distorções de +5% e -5%, destas medidas, para simular os erros da instrumentação.

Jacobianos da Estimação

Em FOZ, observa-se a preponderância dos elementos CA na estrutura do Jacobiano, em contraposição com os elementos CC. No entanto, a 2ª linha do citado Jacobiano indica claramente a integração CA-CC proposta por este trabalho, em que a Medida de Fluxo de Potência Reativa, CA, influencia mais no Ângulo de Disparo do Retificador do que na Ordem de Corrente do Elo CC, enquanto que a Medida de Fluxo de Potência Ativa CC influencia bastante, tanto na Ordem de Corrente CC, quanto no módulo da Tensão CA. Com relação ao Fluxo de Potência Reativa, CA, devido ao Fluxo de Potência Ativa, CC, a influência nas 3 V.E. U_R, α_R e I_D é clara, sendo mais decisiva, no entanto, em I_D. A influência da Medida de Tensão Contínua V_{DR} é grande, sobre U_R, com menos influência em α_R e em I_D.

Em SRQ, novamente, a preponderância dos elementos CA sobre os elementos CC é observada para as Medidas de Fluxos de Potência, CA, do Estimador Integrado. Neste caso, na 5ª linha do Jacobiano, encontra-se caracterizada a filosofia de integração proposta em que também se obtém valores para todas as derivadas com relação a todas as V. E. É muito importante observar a contribuição das 2 Medidas CC do Elo, mais a Medida

CA, correspondente ao Fluxo de Potência Ativo CC, na integração, para a determinação do módulo da Tensão CA, da barra do Inversor, U_I, bem como, no Ângulo de Extinção, γ_I.

Matriz de Sensitividade "G"

Esta matriz caracteriza a sensitividade dos incrementos de estado com relação aos resíduos das medidas, por onde se observa, claramente, a tendência da convergência do processo.

Inversa da Matriz "G"

Desta matriz, observa-se a influência das reavaliações correspondentes ao Ângulo de Disparo do Retificador e ao Ângulo de Extinção do Inversor, cuja não linearidade, apresentada por estes estados CC, retarda o processo com relação à convergência.

Inversa da Matriz "G" pelo Jacobiano transposto

Neste caso, esta matriz produto indica a ponderação existente entre as Medidas CA e CC para todas as reavaliações das 9 V. E. com relação às 18 Medidas.

Estimação dos Casos determinados pelas Medidas

Os casos determinados pelas Medidas são os 3 analisados: Caso Base, Distorção nas Medidas, de +5%, e Distorção nas Medidas de -5%. O que se nota das estimações procedidas é que, para o Caso Base, no caso extremo, o processo converge em 2 iterações para as tolerâncias de convergência adotadas. Para distorções de +5% e -5%, obtém-se em 4 iterações do processo

os valores estimados.

4.4.2 - Comparação dos Resultados

Compara-se, a seguir, para os 3 Casos Testes considerados, os resultados obtidos.

Desde que a Ordem de Corrente seja especificada no momento em que calcula-se o Fluxo de Carga CC, todas as V. E. são determinadas. Com a determinação de todos os Estados do Elo CC, bem como dos Estados CA resultantes da Integração é possível obter-se os valores das Medidas para o Caso Base e distorcê-las, simulando os erros de leitura dos equipamentos de medição. Esse é o princípio adotado por este trabalho.

A comparação dos resultados dos 3 Casos Testes resume-se em avaliar as estimativas feitas pelo Estimador Integrado CA-CC, com relação ao número de iterações necessárias para a convergência do processo, diante da tolerância adotada. Desta forma, tem-se os seguintes resultados:

a) Condição de Operação Mínima (Caso Teste I)

Neste caso, a convergência para FOZ é imediata, mantendo-se o Ângulo de Disparo do Retificador dentro de sua faixa de variação, o qual oscila bem pouco, dada a configuração do sistema em FOZ ser a de um parque gerador, eminentemente. No entanto, no Inversor, dada a fixação das Potências Injetadas naquele extremo, a margem de comutação varia bastante, bem como o novo valor estimado do Ângulo de Extinção do Inversor.

Mesmo para o Caso Base, a Estimação em FOZ, em

bora mantenha o Ângulo de Disparo do Retificador em sua faixa de variação, é lenta pois a mesma é obtida na 2ª iteração. Em SRQ, por outro lado, apesar do Ângulo de Extinção do Inversor sair bem, de sua faixa de variação, a convergência é obtida em 4 iterações para distorções de 5%.

b) Condição de Operação à Tensão Reduzida (Caso Teste II)

Desta vez, o comportamento do Estimador Integrado CA-CC não apresenta peculiaridades, dado que ambas as Estimações, de FOZ e SRQ, são bastante razoáveis. A convergência para ambos os casos é similar à Operação Mínima do Elo CC pois, com distorções de 5% das Medidas, obtém-se em 4 iterações a convergência estabelecida (teórica). Pode-se dizer que o Elo CC é bem condicionado para esta Condição de Operação.

c) Condição de Operação Nominal (Caso Teste III)

Este é o caso da Operação do Elo CC de Itaipu à plena carga, ou seja: em seu 6º e último estágio de operação. O comportamento de todos os Estados do Elo - tanto CA, quanto CC - é bom, dado que a convergência dos casos considerados oscila de 1 iteração, para o Caso Base, até 2, 3 e 4 iterações para distorções de ± 5%, em FOZ e em SRQ.

4.5 - INDICADORES DE PERFORMANCE DO ESTIMADOR ESTÁTICO DE ESTADO INTEGRADO CA-CC, DESACOPLADO

São analisados 2 indicadores de performance para o Estimador Integrado CA-CC, quais sejam: os Resíduos da Es-

timação e os Valores da Função de Custo nos pontos estimados. Os referidos indicadores são apresentados adiante, pelos 3 Casos Testes considerados.

4.5.1 - Resíduos da Estimação

Dado que uma forma de aferir a qualidade da estimação seja a substituição das variáveis estimadas nas Equações de Medidas do Estimador, indica-se pelos Casos Testes, anteriormente apresentados, os cálculos dos Resíduos da Estimação para o Caso Base e para os 2 outros casos determinados pelos resultados das Medidas (Distorções de $\pm$ 5%), a seguir.

4.5.2 - Valores da Função de Custo

O meio utilizado para a Estimação Estática de Estado é a minimização de uma função, denominada pela literatura, Função de Custo. Por esta razão, apresenta-se as citadas Funções de Custo calculadas para o Caso Base e os 2 outros casos determinados pelos resultados das Medidas.

Observa-se, portanto, que para o Caso Base, nos 3 Casos Testes indicados por 4.3.4, as referidas Funções de Custo são nulas, como era de se esperar, conforme se indica a seguir. Além disso, é importante notar que, nos 2 outros casos, as mesmas apresentam valores diferentes de zero, que crescem à medida que a Ordem de Corrente do Elo CC cresce.

Assim sendo, conclui-se este Capítulo de resultados apresentando-se os Indicadores de Performance descritos

por 4.5.1 e 4.5.2, de uma só vez, para cada Caso Teste considerado.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : .26KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"CASO BASE"

RPGR(I)	=	.000000
RQGR(I)	=	.000000
RPDR(I)	=	.000000
RQR(I)	=	.000000
RVDR(I)	=	.000000
RUR(I)	=	.000000
RID(I)	=	.000000
RPDI(I)	=	.000001
RQI(I)	=	.000000
RVDI(I)	=	.000000
RPIN(I)	=	.000000
RQIN(I)	=	.000000
RPITP(I)	=	.000000
RQITP(I)	=	.000001
RPIINT(I)	=	.000000
RQIINT(I)	=	.000001
RUI(I)	=	.000000
RUTP(I)	=	.000000

<FUNCAO DE CUSTO P/O CASO BASE>

=> CUSTO(I) = .000000 I = 1

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : .26KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"DISTORCAO DE +5%"

RPGR(I)	=	.000014
RQGR(I)	=	.000044
RPDR(I)	=	.002506
RQR(I)	=	.000713
RVDR(I)	=	.000024
RUR(I)	=	.000261
RID(I)	=	.002275
RPDI(I)	=	.000907
RQI(I)	=	.010798
RVDI(I)	=	.009058
RPIN(I)	=	.002679
RQIN(I)	=	.008037
RPITP(I)	=	.001131
RQITP(I)	=	.004906
RPIINT(I)	=	.001549
RQIINT(I)	=	.010998
RUI(I)	=	.048983
RUTP(I)	=	.048330

<FUNCAO DE CUSTO P/A DISTORCAO DE +5%>

=> CUSTO(I) = .005167 I = 2

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : .26KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"DISTORCAO DE -5%"

RPGR(I)	=	.000013
RQGR(I)	=	.000042
RPDR(I)	=	.002318
RQR(I)	=	.000662
RVDR(I)	=	.000030
RUR(I)	=	.000196
RID(I)	=	.002214
RPDI(I)	=	.000450
RQI(I)	=	.009709
RVDI(I)	=	.004584
RPIN(I)	=	.002393
RQIN(I)	=	.006698
RPITP(I)	=	.001035
RQITP(I)	=	.004974
RPIINT(I)	=	.001358
RQIINT(I)	=	.010899
RUI(I)	=	.048954
RUTP(I)	=	.048340

<FUNCAO DE CUSTO P/A DISTORCAO DE -5%>

=> CUSTO(I) = .005060 I = 3

CASO TESTE I: RESÍDUOS DA ESTIMAÇÃO E VALORES DA FUNÇÃO DE CUSTO

(SISTEMA INTEGRADO CA-CC)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"CASO BASE"

```
RPGR(I)   =   .000000
PQGR(I)   =   .000001
RPDR(I)   =   .000000
PQR(I)    =   .000000
RVDR(I)   =   .000000
RUR(I)    =   .000000
RID(I)    =   .000000
RPDI(I)   =   .000000
PQI(I)    =   .000000
RVDI(I)   =   .000001
RPIN(I)   =   .000000
PQIN(I)   =   .000000
RPITP(I)  =   .000000
PQITP(I)  =   .000001
RPIINT(I) =   .000000
PQIINT(I) =   .000001
RUI(I)    =   .000000
RUTP(I)   =   .000000
```

<FUNCAO DE CUSTO P/O CASO BASE>

=> CUSTO(I) = .000000 I = 1

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"DISTORCAO DE +5%"

```
RPGR(I)   =   .000957
PQGR(I)   =   .001338
RPDR(I)   =   .016168
PQR(I)    =   .005974
RVDR(I)   =   .005698
RUR(I)    =   .007430
RID(I)    =   .015874
RPDI(I)   =   .028260
PQI(I)    =   .029509
RVDI(I)   =   .036879
RPIN(I)   =   .003831
PQIN(I)   =   .010684
RPITP(I)  =   .001934
PQITP(I)  =   .004953
RPIINT(I) =   .001897
PQIINT(I) =   .018350
RUI(I)    =   .048121
RUTP(I)   =   .047437
```

<FUNCAO DE CUSTO P/A DISTORCAO DE +5%>

=> CUSTO(I) = .000732 I = 2

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.00KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"DISTORCAO DE -5%"

```
RPGR(I)   =   .000713
PQGR(I)   =   .001450
RPDR(I)   =   .014918
PQR(I)    =   .005448
RVDR(I)   =   .005522
RUR(I)    =   .007255
RID(I)    =   .015477
RPDI(I)   =   .027852
PQI(I)    =   .029822
RVDI(I)   =   .036347
RPIN(I)   =   .003816
PQIN(I)   =   .009942
RPITP(I)  =   .001989
PQITP(I)  =   .005026
RPIINT(I) =   .001826
PQIINT(I) =   .018302
RUI(I)    =   .048123
RUTP(I)   =   .047449
```

<FUNCAO DE CUSTO P/A DISTORCAO DE -5%>

=> CUSTO(I) = .008612 I = 3

CASO TESTE II: RESÍDUOS DA ESTIMAÇÃO E VALORES DA FUNÇÃO DE CUSTO

(SISTEMA INTEGRADO CA-CC)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"CASO BASE"

RPGR(I)	=	.000000
PQGR(I)	=	.000000
RPDR(I)	=	.000000
PQR(I)	=	.000001
RVDR(I)	=	.000000
RUR(I)	=	.000000
RID(I)	=	.000000
RPDI(I)	=	.000000
PQI(I)	=	.000001
RVDI(I)	=	.000000
RPIN(I)	=	.000000
PQIN(I)	=	.000000
RPITP(I)	=	.000000
PQITP(I)	=	.000000
RPIINT(I)	=	.000000
PQIINT(I)	=	.000001
RUI(I)	=	.000000
RUTP(I)	=	.000000

<FUNCAO DE CUSTO P/O CASO BASE>

=> CUSTO(I) = .000000 I = 1

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"DISTORCAO DE +5%"

RPGR(I)	=	.001477
PQGR(I)	=	.001625
RPDR(I)	=	.018845
PQR(I)	=	.007608
RVDR(I)	=	.009388
RUR(I)	=	.011408
RID(I)	=	.019022
RPDI(I)	=	.039682
PQI(I)	=	.034719
RVDI(I)	=	.039682
RPIN(I)	=	.003260
PQIN(I)	=	.009148
RPITP(I)	=	.001627
PQITP(I)	=	.004988
RPIINT(I)	=	.001435
PQIINT(I)	=	.022178
RUI(I)	=	.047724
RUTP(I)	=	.047027

<FUNCAO DE CUSTO P/A DISTORCAO DE +5%>

=> CUSTO(I) = .010458 I = 2

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
ESTIMACAO DE ESTADO INTEGRADA CA/CC,DESACOPLADA
ESTIMADOR INTEGRADO CA/CC
ORDEM DE CORRENTE : 2.61KA

<RESIDUOS DA ESTIMACAO>

"DISTORCAO DE -5%"

RPGR(I)	=	.001052
PQGR(I)	=	.001938
RPDR(I)	=	.017389
PQR(I)	=	.006824
RVDR(I)	=	.009081
RUR(I)	=	.011152
RID(I)	=	.018569
RPDI(I)	=	.039379
PQI(I)	=	.035117
RVDI(I)	=	.039379
RPIN(I)	=	.003530
PQIN(I)	=	.008443
RPITP(I)	=	.001685
PQITP(I)	=	.005063
RPIINT(I)	=	.001144
PQIINT(I)	=	.022142
RUI(I)	=	.047722
RUTP(I)	=	.047038

<FUNCAO DE CUSTO P/A DISTORCAO DE -5%>

=> CUSTO(I) = .010334 I = 3

CASO TESTE III: RESÍDUOS DA ESTIMAÇÃO E VALORES DA FUNÇÃO DE CUSTO

(SISTEMA INTEGRADO CA-CC)

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 5 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

5.1 - INTRODUÇÃO

Este breve capítulo permite que se encerre de forma coerente a proposta inicialmente colocada, sobre o trabalho desenvolvido na Estimação Estática de Estado Integrada CA-CC, Desacoplada, do Elo de Corrente Contínua de Itaipu e sua correspondente integração ao Sistema CA. Por isto, assinala-se alguns Comentários e Conclusões sobre o comportamento do Elo CC diante das simulações submetidas, para a avaliação de algumas condições de operação.

É bem verdade que não se objetivou atender a determinadas imposições de projeto ao desenvolvimento, mas, sim, testar algumas simulações de operação para obter resultados que possibilitassem uma análise menos imediatista e mais voltada ao comportamento do Elo. Por esta razão, conclui-se sobre o trabalho, propriamente, bem como apresenta-se sugestões para trabalhos futuros nos itens subsequentes.

5.2 - COMENTÁRIOS

Na Operação Mínima estabelece-se uma peculiaridade apresentada pelo Elo CC, mas que para as Operações à Tensão Reduzida e Nominal, obtém-se um comportamento bem condicionado, que deduz-se pelos resultados apresentados pelo Capítulo 4. No entanto, o caráter de convergência do processo é observa

do para qualquer tipo de operação da integração CA-CC, desacoplada, dada a rapidez de convergência obtida pelo pequeno número de iterações necessário e curto tempo de execução, consequentemente. Por outro lado - e muito importante na análise - para que se efetivasse tal simulação, teve-se que levar mão de um Sistema Equivalente Idealizado em que utiliza-se uma condição de carga fictícia, na barra de Tijuco Preto, que pode ser uma condição particular de operação do sistema integrado. Apesar disso, a sensitividade mostrada pelo γ_I em frente aos erros de medição confirma a Ref. [2] no que se refere à utilização da barra de SRQ para modular a margem de comutação dos conversores.

5.3 - CONCLUSÕES

Apresenta-se, finalmente, a consumação do objetivo deste trabalho.

5.3.1 - Conclusões do trabalho, propriamente

Dada a necessidade do desenvolvimento da pesquisa para a Estimação Estática de Estado, no contexto da integração do Elo de Corrente Contínua de Itaipu, para os sistemas CA do Sul e Sudeste do país, uma modelagem física para a citada integração é sugerida que, com bons níveis de Redundância Local e Global, retrata o perfil da integração de ambos os sistemas. Um Fluxo de Carga CC é implementado para a barra do Retificador, em FOZ, de onde torna-se possível gerar Casos Base para a análi

se pretendida. Deste modo, iniciou-se a implementação do Estimador Estático de Estado Integrado CA-CC, Desacoplado, com as equações das 18 medidas propostas, a partir das quais simulou-se os 3 Casos Testes indicados, cujos resultados obtidos para os Resíduos da Estimação e Funções de Custo, anexas, podem aferir a performance do Estimador desenvolvido.

5.3.2 - Sugestões para trabalhos futuros.

A inclusão de uma rotina para implementar os Filtros de Harmônicos de Corrente Alternada, em FOZ e SRQ, mais os Capacitores em Derivação e os Compensadores Síncronos, somente em SRQ, para complementar a matriz de admitâncias de carga do sistema, para qualquer condição de operação, considerando os Filtros, é relevante para o Estimador Integrado desenvolvido.

Um outro aspecto não explorado por este trabalho é o aproveitamento da esparsidade das matrizes "G", quando da integração do sistema CA, do Elo CC, uma vez que utilizou-se um modelo equivalente como representação do sistema Sul-Sudeste.

A Estimação de Estado on-line, em Tempo Real, é o que se pretende com o prosseguimento da pesquisa. Além disso - um aspecto ainda não contemplado por este trabalho - o tratamento formalizado para a Detecção, Identificação e Eliminação dos Erros Grosseiros, após a geração das medidas gaussianamente, é relevante na implementação de um bom Estimador.

APÊNDICE A

APÊNDICE A - INCLUSÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU NO FLUXO DE CARGA

A.1 - INTRODUÇÃO

A solução do Fluxo de Carga está condicionada a 3 estágios cíclicos, de uma maneira iterativa:

i) calcular as Potências Ativas e Reativas requeridas nos terminais do conversor, bem como a posição do tape;

ii) determinar as condições de Potência exigidas entre o interface CA-CC em que as restrições de Potência do lado CA, do Inversor, são determinadas, levando-se em conta o transformador conversor, os filtros e a compensação VAR, e

iii) determinar a solução completa do Fluxo de Carga, usando as restrições de Potência encontradas previamente para a simulação do Conversor.

Neste Apêndice, trata-se da Modelagem do Conversor CA-CC, da Determinação das Condições de Contorno do Elo CC, da Inclusão do Elo CC no Fluxo de Carga, na Obtenção das Equações de Medida para o Fluxo de Carga e do Algoritmo de Inclusão do Elo de Corrente Contínua no Fluxo de Carga.

A.2 - MODELAGEM DO CONVERSOR CA-CC

Para a inclusão do Elo CC de Itaipu no Fluxo de Carga, cuidou-se de obedecer a alguns critérios, quais sejam:

i) iniciar o estudo representando os Conversores por Fontes de Correntes;

ii) incluir o transformador conversor para a simulação do Elo de Corrente Contínua;

iii) os barramentos do sistema CA são aqueles onde os capacitores e bancos de Filtros são conectados e as tensões U_R e U_I podem ser consideradas senoidais, dentro de certa tolerância;

iv) as componentes harmônicas do Fluxo de Carga são amplamente absorvidas pelos Filtros do circuito e não conseguem penetrar no sistema CA devido às capacitâncias das linhas, das cargas, etc. Além disso, os Filtros, à frequência fundamental, servem de Compensação de Reativos da Rede CA, e

v) com erros da ordem de 1% (para $\mu < 30^{o}$) pode-se admitir que a Relação das Correntes do lado CC e o valor eficaz da corrente fundamental do lado CA, à frequência fundamental, sejam dados por:

$$[I_R] = [I_I] = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_D \qquad (A.1)$$

Assim, conhecida a posição do tape, I_R e I_I podem ser calculadas, o que justifica o item i).

A.3 - CONDIÇÕES DE CONTORNO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU

Definem-se, basicamente, 3 Condições de Contor

no para o Elo de Corrente Contínua de Itaipu. Destas, uma é a própria Ordem de Corrente do Elo, a qual se conhece por ser calculada do Centro de Controle, em Foz do Iguaçu. A segunda condição de contorno a considerar é a Potência transferida, a qual se conhece tão logo se conheça a posição do tape do transformador conversor do retificador, que é a terceira condição de contorno em questão.

Então, em Itaipu, como o Retificador controla continuamente a Corrente e o Inversor, discretamente a Tensão, tem-se que a posição do tape como sendo a única condição de contorno a considerar por se saber que o Fluxo de Potência Constante é a base da transmissão de Itaipu.

A.4 - INCLUSÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU NO FLUXO DE CARGA

O procedimento adotado para a Inclusão do Elo CC no Fluxo de Carga é o mesmo empregado por sua Filosofia de Controle, em que o Controle da Corrente é feito pelo Retificador, continuamente, agindo sobre o Ângulo de Disparo, α_R, com a determinação da Tensão pelo Inversor, discretamente, mantendo o Ângulo de Extinção, γ_I, constante.

Desta maneira, a Figura A.4, a seguir indicada, ilustra a Filosofia de Controle referida:

Dado que, tendo sido ajustados os tapes dos Transformadores Conversores para uma dada condição de carga, $P_{IN}+jQ_{IN}$, o Fluxo de Carga CC, no Retificador, pode ser determi

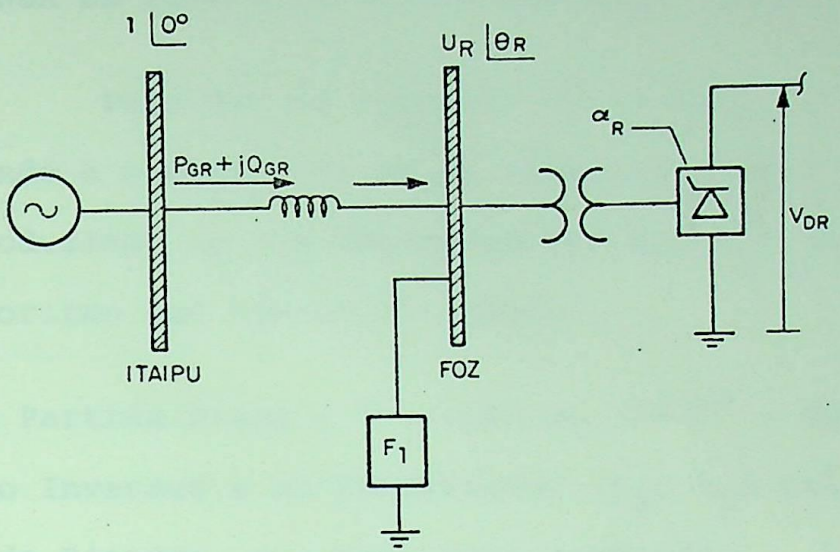


FIG. A.4 - Modelo do Elo CC para o Fluxo de Carga CC

do ao resolver-se o sistema de 2 barras acima indicado para calcular as 3 Variáveis de Estado, x_{cc}, abaixo:

$$x_{cc} = \{\theta_R, U_R, \alpha_R\} \qquad (A.2)$$

Para obter-se uma boa performance do Elo CC, no entanto, convém manter-se α_R em valores baixos para se conseguir altos Fatores de Potência e minimizar a Potência Reativa consumida pelo Retificador. Por outro lado, os controles do Inversor são projetados de modo a manter a Tensão CC, V_{DI}, no valor mais alto possível, produzindo um alto rendimento ao Elo CC e manter o Ângulo de Extinção em seu valor mínimo, para absorver a máxima Potência Reativa (a margem de comutação mínima para Itaipu é de 17º EL.).

A.5 - REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A INCLUSÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DE ITAIPU NO FLUXO DE CARGA E ALGORITMO UTILIZADO

Para ter-se o Ângulo de Disparo, α_R, continuamente variando e manter o Fluxo de Potência Constante, no Retificador, produzindo um bom desempenho do Elo CC, deve-se cumprir ao Algoritmo que abaixo se indica:

i) com a Partida Plana - U = 1.00 pu, $\Theta = 0^o$ - ajustar os tapes no Inversor e no Retificador (t_R, t_I) calculando o ângulo de Disparo, α_R, para esta condição;

ii) determinar as Injeções de Potência no Inversor e fixá-las. Determinar, em seguida, as Injeções de Potência no Retificador e rodar o Fluxo de Carga CA;

iii) com as tensões convergidas, ajustar os tapes no Inversor e no Retificador, e calcular o novo Ângulo de Disparo para esta nova condição (α'_R), e

iv) calcular as novas Injeções de Potência no Retificador e, com as condições existentes na barra do Retificador, de Tensão CA, Ânqulo de Fase da Tensão CA e Ângulo de Disparo do Retificador como partida, com t'_R permanente, calcular os novos valores de Θ''_R, U''_R e α''_R, tais que:

$$P'_{GR} - B_R U'_R \operatorname{sen}\Theta'_R = 0 \qquad (A.3)$$

$$P'_{GR} \cdot \frac{\sqrt{1-(\cos\alpha'_R - R_{CR} \cdot I_D)^2}}{\cos\alpha'_R - R_{CR} I_D} - B_R U'^2_R + B_R U'_R \cos\Theta'_R = 0 \qquad (A.4)$$

$$V'_{DR} - (t'_R)^{-1} U'_R (\cos\alpha'_R - R_{CR} I_D) = 0 \qquad (A.5)$$

Assim sendo, o Capítulo 4 indica os resultados obtidos com este Algoritmo implementado, cuja metodologia de Newton-Raphson empregada para o Fluxo de Carga CC, fornece uma convergência muito rápida, tendo sido obtidos os resultados lá indicados para os 3 Casos Testes empregados. O método do Fluxo de Carga CA, empregado para a determinação das Tensões convergidas dadas pelo passo iii) do algoritmo é o Desacoplado Rápido . Neste mesmo capítulo, acima referido, anexa-se um Fluxograma Simplificado das etapas cumpridas pelo Fluxo de Carga CC, que possibilitou a geração do Caso Base utilizado.

Convém ressalvar que o Filtro F1 representado pela Figura A.4 é eventualmente considerado na matriz de admitância de carga do sistema.

APÊNDICE B

APÊNDICE B - ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO INTEGRADA CA-CC, DESACOPLADA, EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

B.1 - INTRODUÇÃO

Este Apêndice visa formalizar a implementação computacional desenvolvida através da definição dos Vetores de Estado e de Medidas, para Foz do Iguaçu e São Roque, incluindo o Elo de Corrente Contínua integrado ao Sistema Equivalente Idealizado com a Dedução das Matrizes Jacobianas envolvidas, Obtenção das Matrizes "G", Desenvolvimento do Algoritmo de Estimação e indicação dos Cálculos dos Resíduos da Estimação e do Valor da Função de Custo no ponto estimado

B.2 - OS VETORES DE ESTADO E DE MEDIDAS

São indicados a seguir os Vetores de Estado e de Medidas para o Elo de Corrente Contínua e para o Sistema Integrado CA-CC.

B.2.1 - Para o Elo de Corrente Contínua de Itaipu

B.2.1.1 - Vetor de Estado

O Vetor de Estado considerado para o Elo CC de Itaipu consiste das 3 variáveis de Estado indicadas por (B.1),

abaixo, que são: o Ângulo de Disparo do Retificador, a Ordem de Corrente do Elo CC e o Ângulo de Extinção do Inversor, respectivamente.

Assim:

$$x_{cc} = [\alpha_R, I_D, \gamma_I]^t \qquad (B.1)$$

B.2.1.2 - Vetor de Medidas

Neste caso, 5 Medidas do Elo CC são consideradas possíveis, que a seguir se indica por (B.2), que são: 1 medida de Ordem de Corrente I_D, 2 medidas de Tensão Contínua V_{DR} e V_{DI} e 2 medidas de Fluxos de Potência Ativa, no Retificador e no Inversor, respectivamente.

Assim:

$$\underline{z}_{cc} = [\underline{I}_D, \underline{V}_{DR}, \underline{V}_{DI}, \underline{P}_{DR}, \underline{P}_{DI}]^t \qquad (B.2)$$

B.2.2 - Para o Sistema Integrado CA-CC

B.2.2.1 - Vetor de Estado

O Vetor de Estado considerado é indicado abaixo, em que as 3 Tensões Nodais, CA, do Sistema Equivalente Idealizado com seus respectivos Ângulos de Fase são adicionadas aos Estados do Elo CC, representados por (B.1), resultando em (B.3), que abaixo se indica:

$$x_{CA-CC} = \{\Theta_R, U_R, \alpha_R, I_D, \Theta_I, U_I, \gamma_I, \Theta_{TP}, U_{TP}\} \quad (B.3)$$

B.2.2.2 - Vetor de Medidas

Com a integração do Sistema CA, 13 novas medidas são adicionadas, indicadas por (B.4), que a seguir se apresenta, quais sejam: 2 Medidas de Fluxos de Potência Ativa e Reativa, CA, entre as barras do Gerador, em Itaipu, e o Retificador, em FOZ, 1 Medida de Fluxo de Potência Reativa, CA, relacionada com o Fluxo de Potência Ativa, CC, 1 Medida de Tensão Nodal CA na mesma barra, 6 Medidas de Fluxo de Potência Ativa e Reativa, CA, entre a barra do Inversor, em SRQ, e Interlagos (2), entre a barra do Inversor e Tijuco Preto (2) e da resultante da composição das 4 Medidas anteriormente citadas (2), 1 Medida de Fluxo de Potência Reativa, CA, relacionada com o Fluxo de Potência Ativa, CC, e 2 Medidas de Tensão Nodal CA. Assim:

$$\underline{z}_{CA-CC} = \{\underline{P}_{GR}, \underline{Q}_{GR}, \underline{U}_R, \underline{V}_{DR}, \underline{I}_D, \underline{P}_{DR}, \underline{Q}_R, \underline{P}_{DI}, \underline{Q}_I, \underline{V}_{DI}, \underline{P}_{ITP}, \underline{Q}_{ITP}, \underline{P}_{IINT}, \underline{Q}_{IINT}, \underline{P}_{IN}, \underline{Q}_{IN}, \underline{U}_I, \underline{U}_{TP}\} \quad (B.4)$$

B.2.3 - Condições de Redundância dos Sistemas

São descritas, separadamente, as Condições de Redundância Local em Foz do Iguaçu e em São Roque, bem como a Redundância Global do Sistema Integrado CA-CC.

B.2.3.1 - Condição de Redundância para FOZ

Para a estimação do Elo CC, no terminal Retifi

cador, obtém-se 7 Medidas do Sistema Integrado CA-CC contra 4 Variáveis de Estado, conforme abaixo se indica:

$$\underline{z}_{FOZ} = [\underline{P}_{GR}, \underline{Q}_{GR}, \underline{U}_{R}, \underline{V}_{DR}, \underline{I}_{D}, \underline{P}_{DR}, \underline{Q}_{R}]^{t} \quad (B.5)$$

$$x_{FOZ} = [\Theta_{R}, U_{R}, \alpha_{R}, I_{D}]^{t} \quad (B.6)$$

Assim sendo, obtém-se uma Redundância Local para FOZ, resultante, de:

$$\eta_{FOZ} = \frac{7}{4} = 1.75 \quad (B.7)$$

B.2.3.2 - Condições de Redundância em SRQ

Neste caso, para a Estimação do Elo CC, no terminal Inversor, obtém-se 11 Medidas do Sistema Integrado CA-CC, contra 5 Variáveis de Estado, conforme abaixo se indica:

$$\underline{z}_{SRQ}=[\underline{P}_{DI}, \underline{Q}_{I}, \underline{V}_{DI}, \underline{P}_{ITP}, \underline{Q}_{ITP}, \underline{P}_{IINT}, \underline{Q}_{IINT}, \underline{P}_{IN}, \underline{Q}_{IN}, \underline{U}_{I}, \underline{U}_{TP}]^{t} \quad (B.8)$$

$$x_{SRQ} = [\gamma_{I}, \Theta_{I}, U_{I}, \Theta_{TP}, U_{TP}]^{t} \quad (B.9)$$

Assim sendo, obtém-se uma Redundância Local resultante, para SRQ, de:

$$\eta_{SRQ} = \frac{11}{5} = 2.20 \quad (B.10)$$

B.2.3.3 - Condições de Redundância no Sistema Integrado CA-CC

Com as Redundâncias Locais anteriormente descritas, integrando-se ambos os terminais do Elo CC, de FOZ e SRQ, obtém-se 18 Medidas e 9 Variáveis de Estado, produzindo assim a Redundância Global que em (B.11) se indica.

$$\eta_{CA-CC} = \frac{18}{9} = 2.00 \qquad (B.11)$$

Desta maneira, com as Variáveis de Estado e as Medidas de ambos os terminais, separadas com a Variável de Estado I_D, desacopla-se ambos os sistemas.

B.3 - MATRIZ DESACOPLADA DO SISTEMA INTEGRADO CA-CC

Por existir interdependência entre os mismatches de Potência Ativa e Reativa, CA, (P_{GR} e Q_{GR}) e de Tensão Contínua (V_{DR}) para Foz do Iguaçu e dos mismatches de Potência Ativa e Reativa, CA, (P_{IN} e Q_{IN}) e de Tensão Contínua (V_{DI}), para São Roque, é conveniente combinar as equações das Matrizes Jacobianas do Elo CC e do Sistema CA, e remover a necessidade de resolver o interface entre os 2 circuitos. Por isso, são indicadas, a seguir, as Matrizes Jacobianas para FOZ, SRQ e para o Sistema Integrado CA-CC.

B.3.1 - Matriz Jacobiana para FOZ

As equações (23) à (29), do texto, indicam as

equações H1(x) à H7(x), de onde são deduzidos os elementos da Matriz Jacobiana que a seguir se indica por (B.12). Assim:

$$H_1(x) = \begin{array}{c} \\ (\underline{P}_{GR}) \\ (\underline{Q}_{GR}) \\ (\underline{P}_{DR}) \\ (\underline{Q}_{R}) \\ (\underline{V}_{DR}) \\ (\underline{U}_{R}) \\ (\underline{I}_{D}) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} (\Theta_R) & (U_R) & (\alpha_R) & (I_D) \end{array} \\ \left[\begin{array}{c|c|c|c} J1 & J2 & 0 & 0 \\ \hline J3 & J4 & J5 & J6 \\ \hline 0 & J7 & J8 & J9 \\ \hline 0 & J10 & J11 & J12 \\ \hline 0 & J13 & J14 & J15 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \end{array} \qquad (B.12)$$

onde:

$$x = (\Theta_R, U_R, \alpha_R, I_D) \qquad (B.13)$$

$$J1 = -B_R U_R \operatorname{sen}\Theta_R \qquad (B.14)$$

$$J2 = -B_R \operatorname{sen}\Theta_R \qquad (B.15)$$

$$J3 = -B_R U_R \cos\Theta_R \operatorname{tg}\phi_R \qquad (B.16)$$

$$J4 = -B_R \operatorname{sen}\Theta_R \operatorname{tg}\phi_R \qquad (B.17)$$

$$J5 = -(B_R U_R \operatorname{sen}\Theta_R \operatorname{sen}\alpha_R)/((AUX1)^2.AUX2) \qquad (B.18)$$

$$J6 = P_R.R_{CR}.(\operatorname{tg}\phi_R/AUX1 + 1./AUX2) \qquad (B.19)$$

$$J7 = t_R^{-1} I_D AUX1 \qquad (B.20)$$

$$J8 = -t_R^{-1} U_R I_D \operatorname{sen}\alpha_R \qquad (B.21)$$

$$J9 = t_R^{-1} U_R (\cos\alpha_R - 2R_{CR} I_D) \qquad (B.22)$$

$$J10 = t_R^{-1} \; I_D \; AUX2 \tag{B.23}$$

$$J11 = t_R^{-1} \; U_R I_D \; sen\alpha_R \; / tg\phi_R \tag{B.24}$$

$$J12 = t_R^{-1} \; U_R \; (AUX2 + R_{CR} I_D \; / tg\phi_R) \tag{B.25}$$

$$J13 = t_R^{-1} \; . \; AUX1 \tag{B.26}$$

$$J14 = -t_R^{-1} \; . \; U_R \; . \; sen\alpha_R \tag{B.27}$$

$$J15 = -t_R^{-1} \; U_R \; R_{CR} \tag{B.28}$$

com:

$$AUX1 = cos\alpha_R - R_{CR} I_D \tag{B.29}$$

$$AUX2 = \sqrt{1-(cos\alpha_R - R_{CR} I_D)^2} \tag{B.30}$$

$$tg\phi_R = AUX2/AUX1 \tag{B.31}$$

B.3.2 - Matriz Jacobiana para São Roque

As equações (30) à (40), do texto, indicam as equações H8(x) à H18(x), de onde são deduzidos os elementos da Matriz Jacobiana que, a seguir, se indica por (B.32). Assim:

$$H_2(x) = \begin{array}{c} \\ (\underline{P}_{DI}) \\ (\underline{Q}_{I}) \\ (\underline{V}_{DI}) \\ (\underline{P}_{IN}) \\ (\underline{Q}_{IN}) \\ (\underline{P}_{ITP}) \\ (\underline{Q}_{ITP}) \\ (\underline{P}_{IINT}) \\ (\underline{Q}_{IINT}) \\ (\underline{U}_{I}) \\ (\underline{U}_{TP}) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} (\Theta_I) & (U_I) & (\gamma_I) & (\Theta_{TP}) & (U_{TP}) \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccc} 0 & J16 & J17 & & \\ 0 & J18 & J19 & 0 & 0 \\ 0 & J20 & J21 & 0 & 0 \\ J22 & J23 & 0 & J24 & J25 \\ J26 & J27 & J28 & J29 & J30 \\ J31 & J32 & 0 & J33 & J34 \\ J35 & J36 & 0 & J37 & J38 \\ J39 & J40 & 0 & 0 & 0 \\ J41 & J42 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \end{array} \qquad (B.32)$$

onde:

$$x = (\Theta_I,\ U_I, \gamma_I,\ \Theta_{TP},\ U_{TP}) \qquad (B.33)$$

$$J16 = t_I^{-1} \cdot AUX3 \cdot I_D \qquad (B.34)$$

$$J17 = -t_I^{-1}\ I_D\ \text{sen}\gamma_I \qquad (B.35)$$

$$J18 = t_I^{-1} \cdot AUX4 \cdot I_D \qquad (B.36)$$

$$J19 = t_I^{-1}\ U_I I_D\ \text{sen}\gamma_I\ /\text{tg}\phi_I \qquad (B.37)$$

$$J20 = t_I^{-1}\ AUX3 \qquad (B.38)$$

$$J21 = -t_I^{-1}\ U_I\ \text{sen}\gamma_I \qquad (B.39)$$

$$J22 = B_I U_I\ (\cos\Theta_I + U_{TP}\ \cos\Theta_{ITP}) \qquad (B.40)$$

$$J23 = B_I\ (\text{sen}\Theta_I + U_{TP}\ \text{sen}\Theta_{ITP}) \qquad (B.41)$$

$$J24 = -B_I U_I U_{TP}\ \cos\Theta_{ITP} \qquad (B.42)$$

$$J25 = B_I U_I \operatorname{sen}\Theta_{ITP} \tag{B.43}$$

$$J26 = B_I U_I (\cos\Theta_I + U_{TP} \cos\Theta_{ITP}) \ \operatorname{tg}\phi_I \tag{B.44}$$

$$J27 = B_I (\operatorname{sen}\Theta_I + U_{TP} \operatorname{sen}\Theta_{ITP}) \cdot \operatorname{tg}\phi_I \tag{B.45}$$

$$J28 = \frac{B_I U_I (\operatorname{sen}\Theta_I + U_{TP} \operatorname{sen}\Theta_{ITP}) \operatorname{sen}\gamma_I}{(AUX3)^2 \cdot AUX4} \tag{B.46}$$

$$J29 = -B_I U_I \cos\Theta_{ITP} \cdot \operatorname{tg}\phi_I \tag{B.47}$$

$$J30 = B_I U_I \operatorname{sen}\Theta_I \operatorname{tg}\phi_I \tag{B.48}$$

$$J31 = B_I U_I U_{TP} \cos\Theta_{ITP} \tag{B.49}$$

$$J32 = B_I U_I U_{TP} \operatorname{sen}\Theta_{ITP} \tag{B.50}$$

$$J33 = -B_I U_I U_{TP} \cos\Theta_{ITP} \tag{B.51}$$

$$J34 = B_I U_I \operatorname{sen}\Theta_{ITP} \tag{B.52}$$

$$J35 = B_I U_I U_{TP} \operatorname{sen}\Theta_{ITP} \tag{B.53}$$

$$J36 = B_I (2U_I - U_{TP} \cos\Theta_{ITP}) \tag{B.54}$$

$$J37 = -B_I U_I U_{TP} \operatorname{sen}\Theta_{ITP} \tag{B.55}$$

$$J38 = -B_I U_I \cos\Theta_{ITP} \tag{B.56}$$

$$J39 = B_I U_I \cos\Theta_I \tag{B.57}$$

$$J40 = B_I \operatorname{sen}\Theta_I \tag{B.58}$$

$$J41 = B_I U_I \operatorname{sen}\Theta_I \tag{B.59}$$

$$J42 = B_I (2U_I - \cos\Theta_I) \tag{B.60}$$

em que:

$$AUX3 = \cos\gamma_I - R_{CI} I_D \tag{B.61}$$

$$AUX4 = \sqrt{1-(\cos\gamma_I - R_{CI} I_D)^2} \tag{B.62}$$

$$tg\phi_I = AUX4/AUX3 \tag{B.63}$$

B.3.3 - Matriz Jacobiana para o Sistema Integrado CA-CC

Tendo sido estimados, independentemente, os terminais Retificador e Inversor, desacoplando-os, por considerar a Corrente I_D somente Variável de Estado para o terminal Retificador e, como parâmetro, para o terminal Inversor, resulta o Jacobiano Integrado CA-CC, abaixo indicado por (B.64).

$$H(x) = \begin{array}{c|ccccccccc}
 & (\theta_R) & (U_R) & (\alpha_R) & (I_D) & (\theta_I) & (U_I) & (\gamma_I) & (\theta_{TP}) & (U_{TP}) \\
\hline
(\underline{P}_{GR}) & J1 & J2 & 0 & 0 & & & & & \\
(\underline{Q}_{GR}) & J3 & J4 & J5 & J6 & & & & & \\
(\underline{P}_{DR}) & 0 & J7 & J8 & J9 & & & & & \\
(\underline{Q}_{R}) & 0 & J10 & J11 & J12 & & & & & \\
(\underline{V}_{DR}) & 0 & J13 & J14 & J15 & & & & & \\
(\underline{U}_{R}) & 0 & 1 & 0 & 0 & & & & & \\
(\underline{I}_{D}) & 0 & 0 & 0 & 1 & & & & & \\
\hline
(\underline{P}_{DI}) & & & & & 0 & J16 & J17 & 0 & 0 \\
(\underline{Q}_{I}) & & & & & 0 & J18 & J19 & 0 & 0 \\
(\underline{V}_{DI}) & & & & & 0 & J20 & J21 & 0 & 0 \\
(\underline{P}_{IINT}) & & & & & J22 & J23 & 0 & J24 & J25 \\
(\underline{Q}_{IINT}) & & & & & J26 & J27 & J28 & J29 & J30 \\
(\underline{P}_{ITP}) & & & & & J31 & J32 & 0 & J33 & J34 \\
(\underline{Q}_{ITP}) & & & & & J35 & J36 & 0 & J37 & J38 \\
(\underline{P}_{IN}) & & & & & J39 & J40 & 0 & 0 & 0 \\
(\underline{Q}_{IN}) & & & & & J41 & J42 & 0 & 0 & 0 \\
(\underline{U}_{I}) & & & & & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
(\underline{U}_{TP}) & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{array} \tag{B.64}$$

onde:

$$x = [\Theta_R, U_R, \alpha_R, I_D, \Theta_I, U_I, \gamma_I, \Theta_{TP}, U_{TP}]^t \qquad (B.65)$$

Observar, pois, que a forma estrutural do Jacobiano Integrado CA-CC permite, quando da utilização do Algoritmo da Estimação, dado por (4), do texto, a inversão da matriz Jacobiana por blocos, significando assim grande economia tanto em memória, quanto em tempo computacional. O Desacoplamento de FOZ e SRQ é evidenciado na forma de apresentação dada por (B.64).

O Capítulo 4 indica as saídas do Fluxo de Carga CC implementado, bem como do Estimador Integrado CA-CC, indicando os respectivos Jacobianos.

B.4 - ALGORITMO DO ESTIMADOR INTEGRADO CA-CC UTILIZADO, OBTENÇÃO DAS MATRIZES "G" E CÁLCULO DOS RESÍDUOS DA ESTIMAÇÃO E DA FUNÇÃO DE CUSTO

A Matriz "G" é a Matriz de Sensitividade do Incremento da Variável de Estado com relação aos Resíduos das Medidas.

B.4.1 - Algoritmo do Estimador Integrado CA-CC, Desacoplado

De acordo com o algoritmo da estimação dado pela expressão (4), do texto, o algoritmo do Estimador Integrado CA-CC, Desacoplado, indicado por (B.66), é utilizado para a obtenção dos resultados apresentados pelo Capítulo 4. Desta forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta\Theta_R^{(k)} \\ \Delta U_R^{(k)} \\ \Delta\alpha_R^{(k)} \\ \Delta I_D^{(k)} \\ \hline \Delta\Theta_I^{(k)} \\ \Delta U_I^{(k)} \\ \Delta\gamma_I^{(k)} \\ \Delta\Theta_{TP}^{(k)} \\ \Delta U_{TP}^{(k)} \end{bmatrix} = -([H(x)]^t\ W^{-1}[H(x)])^{-1}.[H(x)]^t.W^{-1}. \begin{bmatrix} \Delta P_{GR}^{(k)} \\ \Delta Q_{GR}^{(k)} \\ \Delta P_{DR}^{(k)} \\ \Delta Q_R^{(k)} \\ \Delta V_{DR}^{(k)} \\ \Delta U_R^{(k)} \\ \Delta I_D^{(k)} \\ \hline \Delta P_{DI}^{(k)} \\ \Delta V_{DI}^{(k)} \\ \Delta Q_I^{(k)} \\ \Delta P_{IN}^{(k)} \\ \Delta Q_{IN}^{(k)} \\ \Delta P_{ITP}^{(k)} \\ \Delta Q_{ITP}^{(k)} \\ \Delta P_{IINT}^{(k)} \\ \Delta Q_{IINT}^{(k)} \\ \Delta U_I^{(k)} \\ \Delta U_{TP}^{(k)} \end{bmatrix} \qquad (B.66)$$

onde:

$\Delta\Theta_R^{(k)} \ldots\ \Delta U_{TP}^{(k)}$ são os incrementos das V.E. para as reavaliações, na iteração (k);

$H(x)$ é a Matriz Jacobiana do Sistema Integrado CA-CC dada por (B.64);

W é a matriz de Ponderação; e,

$\Delta P_{GR}^{(k)} \ldots \Delta U_{TP}^{(k)}$ são os mismatches das Medidas utilizados.

Em seguida, atualiza-se as V.E., conforme indicado por (B.67) à (B.75), ao fazer-se:

$$\Theta_R^{(k+1)} = \Theta_R^{(k)} + \Delta\Theta_R^{(k)} \quad \text{(B.67)}$$

$$U_R^{(k+1)} = U_R^{(k)} + \Delta U_R^{(k)} \quad \text{(B.68)}$$

$$\alpha_R^{(k+1)} = \alpha_R^{(k)} + \Delta\alpha_R^{(k)} \quad \text{(B.69)}$$

$$I_D^{(k+1)} = I_D^{(k)} + \Delta I_D^{(k)} \quad \text{(B.70)}$$

$$\Theta_I^{(k+1)} = \Theta_I^{(k)} + \Delta\Theta_I^{(k)} \quad \text{(B.71)}$$

$$U_I^{(k+1)} = U_I^{(k)} + \Delta U_I^{(k)} \quad \text{(B.72)}$$

$$\gamma_I^{(k+1)} = \gamma_I^{(k)} + \Delta\gamma_I^{(k)} \quad \text{(B.73)}$$

$$\Theta_{TP}^{(k+1)} = \Theta_{TP}^{(k)} + \Delta\Theta_{TP}^{(k)} \quad \text{(B.74)}$$

$$U_{TP}^{(k+1)} = U_{TP}^{(k)} + \Delta U_{TP}^{(k)} \quad \text{(B.75)}$$

Assim, roda-se o Estimador Integrado CA-CC, Desacoplado, até a convergência.

B.4.2 - OBTENÇÃO DA MATRIZ "G" PARA O SISTEMA INTEGRADO CA-CC, DESACOPLADO

A expressão (B.76) indica a Matriz "G" utilizada. É conveniente, no entanto, observar que, dada a forma de tratamento desacoplado, que este trabalho desenvolveu e implementou, não há a necessidade de explorar-se a esparsidade da Matriz "G" do Sistema Integrado CA-CC, já que trabalha-se com o Modelo Equivalente Idealizado do sistema. Assim:

$$G(x) = ([H^t(x) \cdot W^{-1} \cdot H(x)]) \qquad (B.76)$$

onde H(x) é a matriz Jacobiana do Sistema Integrado CA-CC, dada por (B.64) e W, a matriz de Ponderação do sistema.

Portanto, levando-se em conta o desacoplamento indicado pela expressão acima, vem que:

$$G(x) = \begin{bmatrix} G1(x) & \\ \hline & G2(x) \end{bmatrix} \qquad (B.77)$$

cujo tratamento desacoplado produz matrizes G1(x) de ordem $n_1 \times n_1$ e G2(x), de ordem $n_2 \times n_2$, 4×4 e 5×5, respectivamente, reduzindo os gastos de memória e tempo computacional.

B.4.3 - Cálculo dos Resíduos da Estimação e da Função de Custo

Finalmente, após a implementação dos Estimadores de Estado para Foz do Iguaçu, São Roque e Integrado CA-CC,

Desacoplado, determina-se os Resíduos da Estimação e as Funções de Custo, para avaliar-se a performance do Estimador desenvolvido.

B.4.3.1 - Resíduos da Estimação

São os valores determinados pelas expressões das medidas no ponto estimado que indica-se, abaixo, por (B.78) à (B.95). Assim:

$$RP_{GR}(I) = H1(K) \quad (B.78)$$

$$RQ_{GR}(I) = H2(K) \quad (B.79)$$

$$RP_{DR}(I) = H3(K) \quad (B.80)$$

$$RQ_{R}(I) = H4(K) \quad (B.81)$$

$$RV_{DR}(I) = H5(K) \quad (B.82)$$

$$RU_{R}(I) = H6(K) \quad (B.83)$$

$$RI_{D}(I) = H7(K) \quad (B.84)$$

$$RP_{DI}(I) = H8(K) \quad (B.85)$$

$$RV_{DI}(I) = H9(K) \quad (B.86)$$

$$RQ_{I}(I) = H10(K) \quad (B.87)$$

$$RP_{IN}(I) = H11(K) \quad (B.88)$$

$$RQ_{IN}(I) = H12(K) \quad (B.89)$$

$$RP_{ITP}(I) = H13(K) \quad (B.90)$$

$$RQ_{ITP}(I) = H14(K) \quad (B.91)$$

$$RP_{IINT}(I) = H15(K) \quad (B.92)$$

$$RQ_{IINT}(I) = H16(K) \quad (B.93)$$

$$RU_I(I) = H17(K) \tag{B.94}$$

$$RU_{TP}(I) = H18(K) \tag{B.95}$$

onde:

I é o nº da Medida;

K é o nº da iteração do valor estimado; e,

$RP_{GR}(I)... RU_{TP}(I)$ são Resíduos da Estimação procurados.

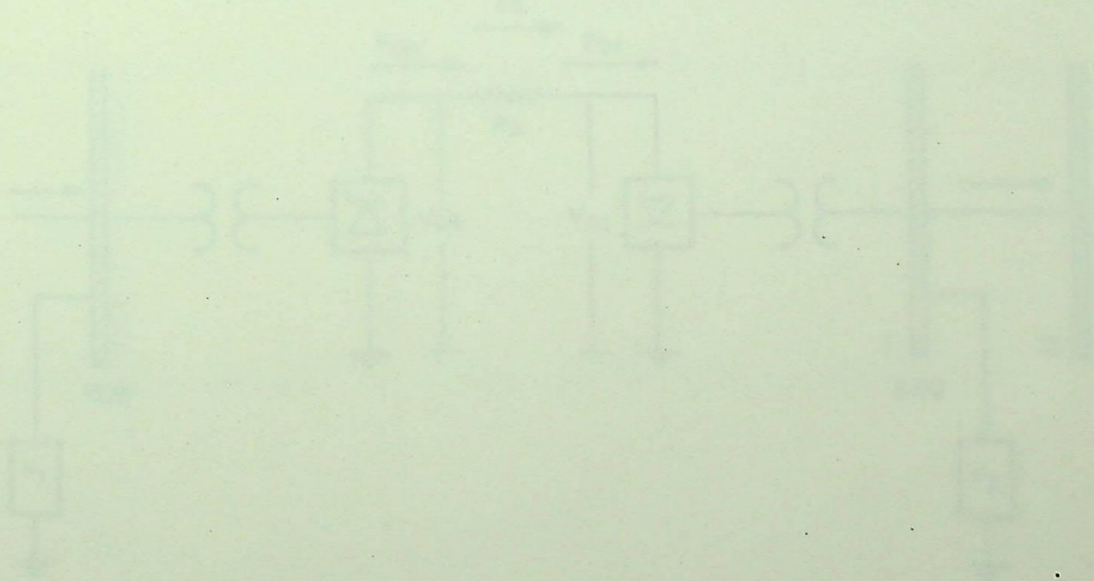
B.4.3.2 - Cálculo das Funções de Custo

Neste caso, analisa-se o valor obtido no ponto mínimo da Função de Custo, para os 3 Casos Testes simulados. Então:

$$\begin{aligned} CUSTO\ (I) = {} & (HP_{GR}(K))^2 + (HQ_{GR}(K))^2 + (HP_{DR}(K))^2 + (HV_{DR}(K))^2 + \\ & + (HQ_R(K))^2 + (HU_R(K))^2 + HI_D(K))^2 + (HP_{DI}(K)^2 + \\ & + (HV_{DI}(K))^2 + (HQ_I(K))^2 + (HP_{IN}(K))^2 + (HQ_{IN}(K))^2 + \\ & + HP_{ITP}(K))^2 + (HQ_{ITP}(K))^2 + (HP_{IINT}(K))^2 + (HQ_{IINT}(K))^2 + \\ & + (HU_I(K))^2 + (HU_{TP}(K))^2 \end{aligned} \tag{B.96}$$

com:

$HP_{GR}(K)...HU_{TP}(K)$ sendo as equações das medidas da medida I, na iteração K.



APÊNDICE C

APÊNDICE C - DEDUÇÃO DOS MODELOS DAS MEDIDAS - SISTEMAS POR UNIDADE

C.1 - INTRODUÇÃO

São indicados neste Apêndice os Modelos das Medidas CA-CC utilizados ao longo deste trabalho. Subdivide-se o Apêndice nas partes da Dedução dos Modelos CC, Dedução dos Modelos CA, Interdependência das Medidas CA-CC e, finalmente, no Sistema Por Unidade, comum a ambos.

C.2 - DEDUÇÃO DAS MEDIDAS CC

A Figura C.2, abaixo indicada, ilustra as medidas CC relacionadas neste item, bem como 2 medidas CA relacionadas diretamente com as medidas CC, Q_R e Q_I.

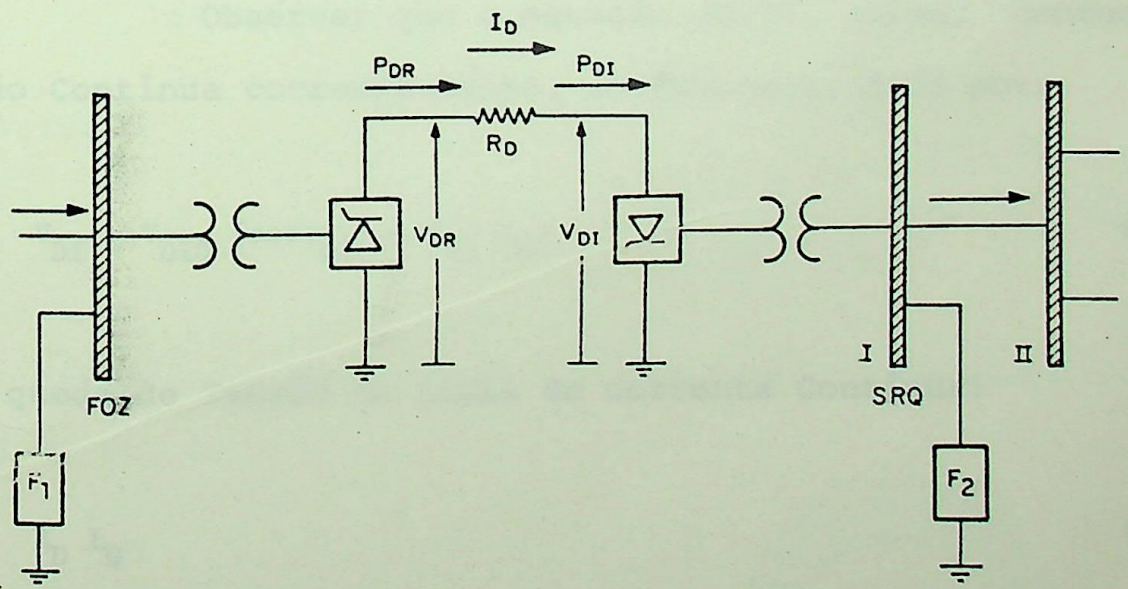


FIG. C.2 - Modelo do Elo CC para a obtenção das Medidas

A tensão numa linha de Corrente Contínua é dada por:

$$V_{DR} = V_{DIO} [\cos\gamma_{min} - (R_{CI} - R_D) I_D] \qquad (C.1)$$

para o lado do Retificador, onde:

V_{DIO} → Módulo da Tensão de Corrente Contínua Ideal, sem carga, interna ao Inversor;

R_{CI} → resistência de Comutação do transformador conversor do lado do Inversor;

R_D → resistência da linha de Corrente Contínua;

γ_{min} → margem de Comutação mínima do Inversor (Ângulo de Extinção do Inversor), e:

I_D → ordem de corrente do Elo de Corrente Contínua.

Observar que a equação (C.1), acima, contempla a Tensão Contínua correspondente, no Inversor, dada por:

$$V_{DI} = V_{DIO} (\cos\gamma_{min} - R_{CI} I_D) \qquad (C.2)$$

mais a queda de Tensão na Linha de Corrente Contínua:

$$R_D I_D \qquad (C.3)$$

Uma outra forma de representar a Tensão Contínua no Retificador é dada por (C.4), conforme abaixo se indica:

$$V_{DR} = V_{DRO} \ (\cos\alpha_N - R_{CR} \ I_D) \qquad (C.4)$$

A Corrente, I_D, do Elo de Corrente Contínua é de 2.61 kA para a operação com Ordem de Corrente Nominal. De uma forma geral, I_D é dada por:

$$I_D = \frac{V_{DR} - V_{DI}}{R_D} \qquad (C.5)$$

O Fluxo de Potência Ativa numa linha de Corrente Contínua é dado por:

No Retificador:

$$P_{DR} = V_{DR} \ I_D \qquad (C.6)$$

O Fluxo de Potência Reativa, CA, relacionado ao Fluxo de Potência Ativa, CC, é:

$$Q_R = V_{DR} \cdot I_D \cdot tg\phi_R \qquad (C.7)$$

No Inversor:

$$P_{DI} = V_{DI} \cdot I_D \qquad (C.8)$$

O Fluxo de Potência Reativa, CA, relacionado ao Fluxo de Potência Ativa, CC, é:

$$Q_I = V_{DI} \cdot I_D \cdot tg\phi_I \qquad (C.9)$$

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

onde: $tg\phi_R$ e $tg\phi_I$ são os Fatores de Potência no Retificador e no Inversor, respectivamente, dados por:

$$tg\phi_R = \frac{\sqrt{1-(\cos\alpha_R - R_{CR}\, I_D)^2}}{\cos\alpha_R - R_{CR}\cdot I_D} \qquad (C.10)$$

$$tg\phi_I = \frac{\sqrt{1-(\cos\gamma_I - R_{CI}\, I_D)^2}}{\cos\gamma_I - R_{CI}\cdot I_D} \qquad (C.11)$$

O Ângulo de Disparo num Conversor Retificador é dado por:

$$\alpha_R = \cos^{-1}\left(\frac{1+0.0125\ NR}{V_{DRO}\cdot U_R}\ V_{DRN} + R_{CR}\ I_D\right) \qquad (C.12)$$

C.3 - DEDUÇÃO DAS MEDIDAS C.A.

As Figuras C.3.1 e C.3.2, abaixo, indicam as Medidas CA usadas por este trabalho, para o Retificador e para o Inversor, respectivamente.

C.3.1 - Medidas CA em FOZ

O Fluxo de Potência em FOZ é dado por:

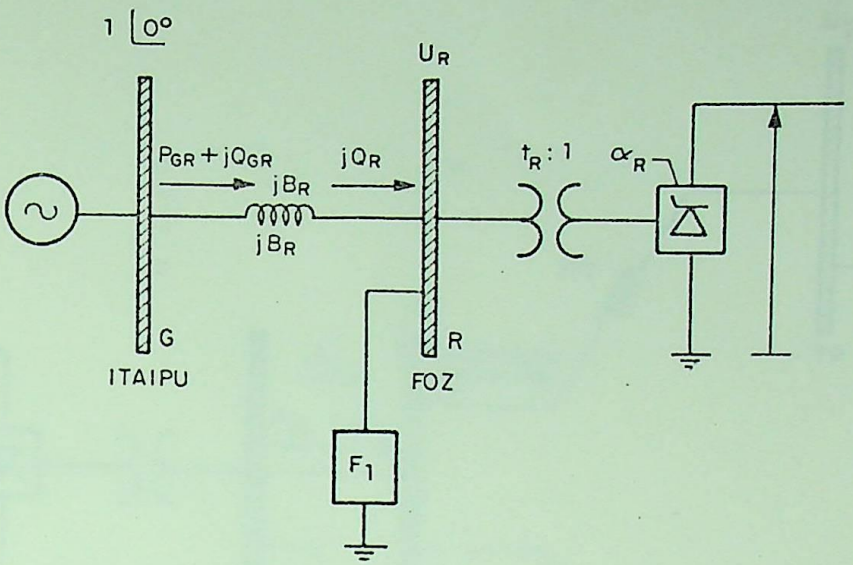


FIG. C.3.1 - Modelo do Sistema Equivalente Idealizado para FOZ

$$P_{GR} = \frac{R_{GR}(U_R\, U_{GR} \cos\Theta_{RG} - U_R^2) - U_R\, U_G\, X_R \operatorname{sen}\Theta_{RG}}{Z_{RG}^2} \qquad (C.13)$$

$$Q_{GR} = \frac{X_{GR}(U_R\, U_G \cos\Theta_{RG} - U_R^2) + U_R\, U_G\, R_R \operatorname{sen}\Theta_{RG}}{Z_{RG}^2} \qquad (C.14)$$

Obs.: - a Medida de Q_R é relacionada com o Fluxo de Potência Ativa, CC, e já encontra-se indicada por (C.7);

- a Medida de U_R obtida diretamente da barra CA de FOZ.

C.3.2 - Medidas CA em SRQ

A Figura C.3.2, a seguir, ilustra as medidas CA.

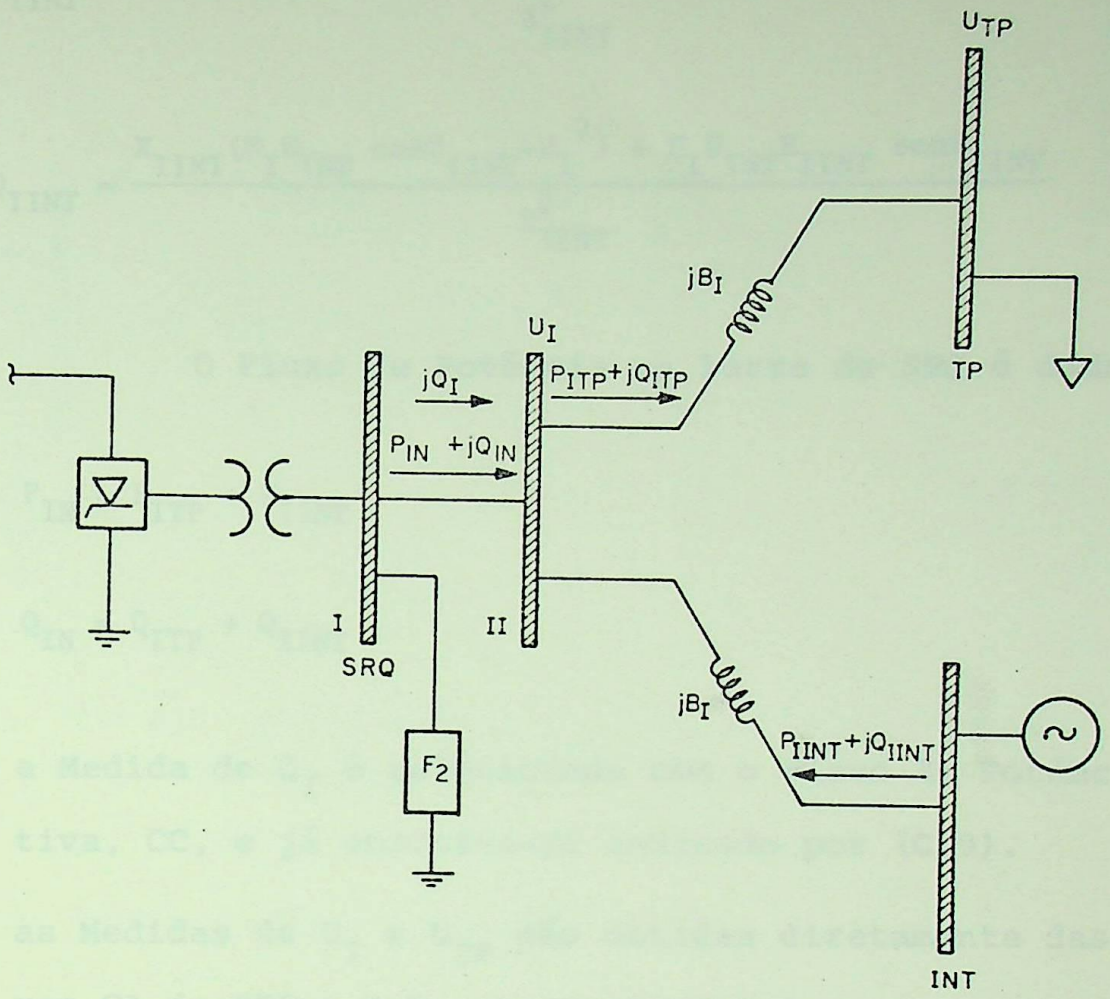


FIG. C.3.2 - Modelo do Sistema Equivalente Idealizado para SRQ

O Fluxo de Potência entre SRQ e TP é dado por:

$$P_{ITP} = \frac{R_{ITP}(U_I.U_{TP}.\cos\Theta_{ITP}-U_I^2) - U_I\,U_{TP}\,X_{ITP}\,\text{sen}\Theta_{ITP}}{Z^2_{ITP}} \qquad (C.15)$$

$$Q_{ITP} = \frac{X_{ITP}(U_I.U_{TP}.\cos\Theta_{ITP}-U_I^2) + U_I\,U_{TP}\,R_{ITP}\,\text{sen}\Theta_{ITP}}{Z^2_{ITP}} \qquad (C.16)$$

O Fluxo de Potência entre SRQ e INT é dado por:

$$P_{IINT} = \frac{R_{IINT}(U_I U_{INT} \cos\Theta_{IINT} - U_I^2) - U_I U_{INT} X_{IINT} \operatorname{sen}\Theta_{IINT}}{Z^2_{IINT}} \qquad (C.17)$$

$$Q_{IINT} = \frac{X_{IINT}(U_I U_{INT} \cos\Theta_{IINT} - U_I^2) + U_I U_{INT} R_{IINT} \operatorname{sen}\Theta_{IINT}}{Z^2_{IINT}} \qquad (C.18)$$

O Fluxo de Potência na barra de SRQ é dado por:

$$P_{IN} = P_{ITP} + P_{IINT} \qquad (C.19)$$

$$Q_{IN} = Q_{ITP} + Q_{IINT} \qquad (C.20)$$

Obs.: - a Medida de Q_I é relacionada com o Fluxo de Potência Ativa, CC, e já encontra-se indicado por (C.9).

- as Medidas de U_I e U_{TP} são obtidas diretamente das barras CA de SRQ e T.P., respectivamente.

- os valores das resistências indicadas nas expressões são desprezados.

C.4 - INTERDEPENDÊNCIA DAS MEDIDAS DOS ESTADOS CA E CC

A Figura C.4, a seguir indicada, representa o Modelo Equivalente do Elo de Corrente Contínua Idealizado para o Sistema Integrado CA-CC, amplamente utilizado por este trabalho que indica as medidas interdependentes dos estados CA e CC.

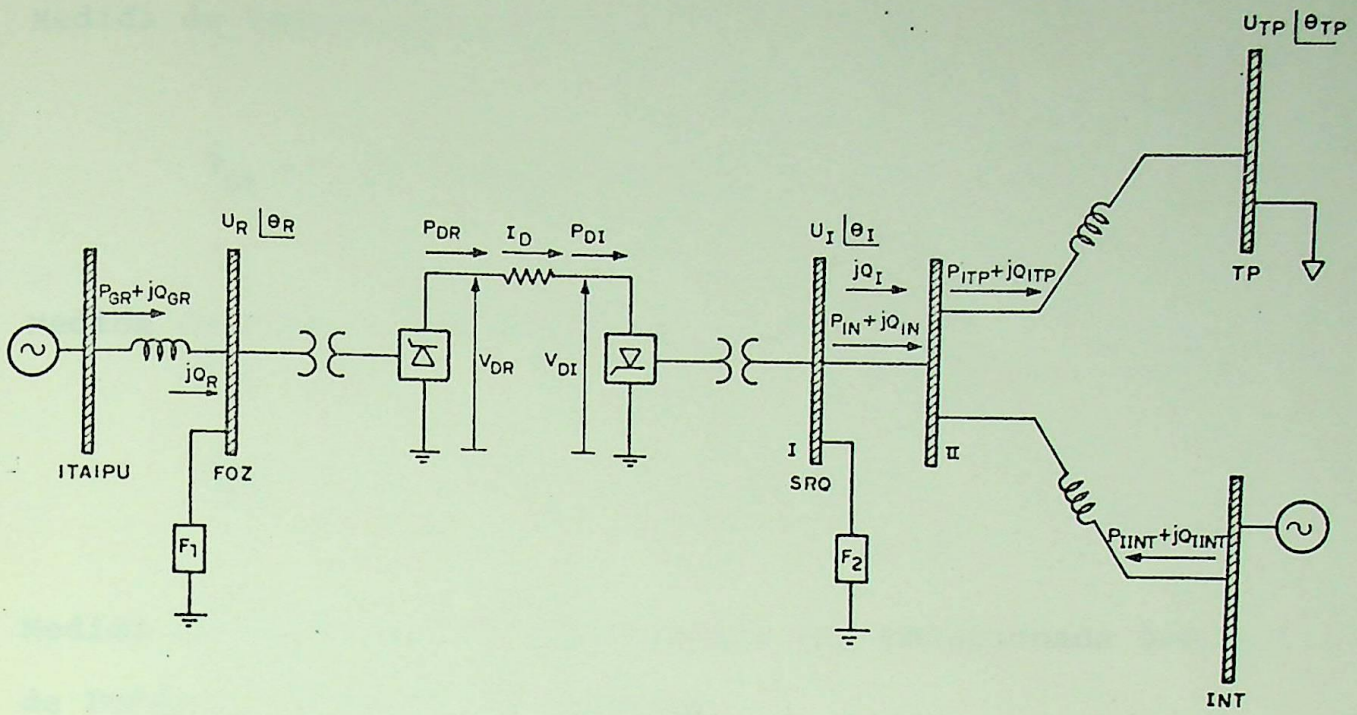


FIG. C.4 - Modelo Equivalente do Sistema Idealizado para o Sistema Integrado CA-CC

Medida de Tensão Contínua no Retificador

$$V_{DR} = t_R^{-1} \, U_R \, (\cos\alpha_R - R_{CR} \, I_D) \qquad (C.21)$$

Medida de Fluxo de Potência Contínua no Retificador

$$P_{DR} = t_R^{-1} \, U_R \, (\cos\alpha_R - R_{CR} \, I_D) \cdot I_D \qquad (C.22)$$

Medida de Fluxo de Potência Reativa CA, relacionada com o Fluxo de Potência Ativa CC do Retificador

$$Q_R = t_R^{-1} \, U_R \sqrt{1-(\cos\alpha_R - R_{CR} \, I_D)^2} \; I_D \qquad (C.23)$$

Medida de Tensão Contínua no Inversor

$$V_{DI} = t_I^{-1} U_I (\cos\gamma_I - R_{CI} I_D) \qquad (C.24)$$

Medida de Fluxo de Potência Ativa Contínuo no Inversor

$$P_{DI} = t_I^{-1} U_I (\cos\gamma_I - R_{CI} I_D) \cdot I_D \qquad (C.25)$$

Medida de Fluxo de Potência Reativa CA, relacionada com o Fluxo de Potência Ativa CC do Inversor

$$Q_I = t_I^{-1} U_I \sqrt{1-(\cos\gamma_I - R_{CI} I_D)^2} \cdot I_D \qquad (C.26)$$

C.5 - SISTEMAS POR UNIDADE

Sejam S_{CAB} e S_{DB} as Potências Base do lado CA e CC, respectivamente, definidas por:

$$S_{CAB} = \sqrt{3}\ U_{CAB}\ I_{CAB} \qquad (C.27)$$

$$S_{DB} = V_{DB} \cdot I_{DB} \qquad (C.28)$$

onde:

U_{CAB} é o módulo da tensão Base, em Volt, do lado CA (fase-fase)

V_{DB} é o módulo da tensão Base, em Volt, do lado CC

I_{CAB} é a corrente Base, em Ampère, do lado CA

I_{DB} é a corrente Base, em Ampère, do lado CC

Se:

$$S_{CAB} = S_{DB} \tag{C.29}$$

e:

$$V_{DB} = kU_{CAB} \tag{C.30}$$

em que k seja uma constante arbitrária, tem-se, de (C.27):

$$\sqrt{3}\ U_{CAB}^2\ Y_{CAB} = kU_{CAB}\ I_{DB}$$

$$I_{DB} = \frac{\sqrt{3}}{k}\ U_{CAB}\ Y_{CAB} \tag{C.31}$$

consequentemente:

$$Y_{DB} = \frac{S_{DB}}{V_{DB}^2} = \frac{\sqrt{3}\ U_{CAB}^2\ Y_{CAB}}{(kU_{CAB})^2} = \frac{\sqrt{3}}{K^2}\ Y_{CAB} \tag{C.32}$$

em que, Y_{DB} e Y_{CAB} são as admitâncias base, em mho, dos lados CC e CA, respectivamente.

Adotando-se $k = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$, tem-se uma escolha conveniente dos valores Base pois, assim:

$$V_{DB} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{CAB} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_{CAB}^{2}}{\sqrt{3}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_{CAmB} \qquad (C.33)$$

$$I_{CAB} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{DB} \qquad (C.34)$$

Sendo U_{CAmB} o valor máximo base da tensão fase-neutro e consegue-se uma relação entre os valores base, semelhantes àqueles encontrados na Teoria dos Conversores.

REFERÊNCIAS

[1] H.R. Sirisena and E.P.M. Brown, "Inclusion of HVDC links in AC power-system state estimation", Proceedings of IEE, vol. 128, Pt. C, May 1981.

[2] A.G. Figueiredo, N.L. Shore, Hans Bjorklund, A.A.S. Praça e R. Fraga, "Master Control CCAT para as Estações Conversoras do Sistema de Transmissão de Itaipu", VI SNPTEE, Balneário de Camboriú - 1981.

[3] M.Z.T. Filho, A. Ogale e J.C. Lopes, "Sistema de Transmissão de Itaipu em Corrente Contínua - Aspectos sobre a Operação em Paralelo das Estações Conversoras" VI SNPTEE, Balneário de Camboriú - 1981.

[4] W.C. Mendonça, J.C.C. Oliveira, A.W. Filho e T. Adielsson, "Sistema de Transmissão de Itaipu em Corrente Contínua - Análise das Diversas Condições de Operação em Regime Permanente", VI SNPTEE, Balneário de Camboriú - 1981.

[5] P.C.A. Fernandes, D.O.C. Brasil, J.B. Veiga e L.E.B. Ferreira, "Programa Digital para Cálculo das Condições em Regime Permanente do Elo de Corrente Contínua de Itaipu", VI SNPTEE, Balneário de Camboriú - 1981.

[6] M.Z.T. Filho, P. Martin, L.B. Reis e T. Peterson, "Sistema de Transmissão de Itaipu em Corrente Contínua - Com-

pensação Reativa das Estações Conversoras", VI SNPTEE, Balneário de Camboriú - 1981.

[7] A. Garcia, A. Monticelli and P. Abreu, "Fast decoupled State Estimation and Bad Data Processing", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS - 98, p.p. 1645 - 1651, Sept./Oct. 1979.

[8] José Carlos de Oliveira, João Roberto Cogo, "Transmissão em Corrente Contínua", Notas do Curso CATCC, EFEI, 1979.

[9] J. Arrilaga and P. Bodger, "Integration of h.v.d.c. links with fast decoupled load-flow solutions", Proceedings of IEE , vol. 124, Nº 5, 1977.

[10] D.A. Braunagel, L.A. Kraft and J.L. Whysong, "Inclusion of D.C. Converter and Transmission Equations Directly in a Newton Power Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems", vol. PAS - 95, p.p. 76-88, Jan./Feb. 1976.

[11] Erich Uhlmann, "Power Transmission by Direct Current" , Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1975.

[12] Edward Kimbark, "Direct Current Transmission", Vol. I, John Wiley & Sons, 1971.

DATA 22/11/1983
PROC.
PED.
LIV. CPG/CTES
NC.$ Geração

I V [illegible] O
BIM - EFEI
DATA | Rubrica

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200377
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA