

TESE

298

ros

E fei.

ESTUDO DE EQUIVALENTES
EXTERNOS NA OPERAÇÃO DE
SISTEMAS INTERLIGADOS

Adriano Alber de França Mendes Carneiro



ELETROBRÁS

Centrais Elétricas
Brasileiras S.A.

EFEI

Escola Federal de
Engenharia de Itajubá

EEM

Escola de Engenharia
Maua



A impressão deste trabalho foi feita com recursos do Fundo de Desenvolvimento Tecnológico (FDT) geridos pelo Departamento de Capacitação e Desenvolvimento de Pessoal (DECP) da Diretoria de Gestão Empresarial (DGE) da ELETROBRÁS, responsável também pelo programa que tornou possível sua realização na Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

Adriano Alber de França Mendes Carneiro
Professor da Escola de Engenharia Mauã
Departamento de Engenharia Elétrica
Estrada das Lágrimas, 2035
Fone: (011) 442-1900
09500 - SÃO CAETANO DO SUL - SP

CLASS. 519.41:621.316.004.15(043.2)

CUTT. C 289 e

TOMO 298



30201



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 126 de 19 / 06 / 80, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "ESTUDO DE EQUIVALENTES EXTERNOS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS INTERLIGADOS"

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Engenharia ELÉTRICA na Área de Concentração de SISTEMAS DE POTÊNCIA satisfeitas as demais exigências regimentais à ADRIANO ALBER DE FRANÇA MENDES CARNEIRO.

Itajubá, 21 de Junho de 1980.

1º Examinador

Prof. Alcir José Monticelli

2º Examinador

Prof. Renato de Aquino Faria Nunes

3º Examinador

Prof. Hector Arango (Orientador)



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "ESTUDO DE EQUIVALENTES EXTERNOS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS INTERLIGADOS"

Autor: ADRIANO ALBER DE FRANÇA MENDES CARNEIRO

JULGAMENTO

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

Resultado médio: Conceito A+, ou seja Aprovado com Distinção.

Observações: _____

Itajubá, 21 de Junho de 1980.

1º Examinador

Prof. Alcir José Monticelli

2º Examinador

Prof. Renato de Aquino Faria Nunes

3º Examinador

Prof. Hector Arango - Orientador

A G R A D E C I M E N T O S

À Eletrobrás, através da Diretoria de Gestão Empresarial, responsável pelo programa que possibilitou a realização deste trabalho.

À Escola de Engenharia Mauá, por intermédio de sua Diretoria e do Departamento de Engenharia Elétrica, pelo apoio constante, confiança e empenho demonstrados na formação e aperfeiçoamento de seus professores e em especial na concretização desta tarefa.

À Escola Federal de Engenharia de Itajubá, através de seus professores e funcionários, direta ou indiretamente ligados à pós-graduação, pela atenção e colaboração prestadas, bem como pela orientação específica na elaboração desta dissertação.

Aos colegas e amigos do CESE-79 pelo companheirismo e cooperação durante todo o transcorrer do curso.

Aqueles que mais de perto acompanharam a realização deste trabalho com dedicação, ajuda e incentivo, mostrando-se amigos em todos os momentos.

R E S U M O

Neste trabalho são estudados alguns aspectos da supervisão e controle de sistemas elétricos de potência interligados, tendo-se como ponto principal o problema dos equivalentes externos. É feita uma abordagem das funções de segurança e controle em sistemas interligados onde propõe-se uma estrutura hierárquica para os mesmos. Mostra-se em seguida a aplicação dos equivalentes, indicando-se os principais modelos existentes e faz-se um estudo dos equivalentes chamados topológicos tipo Ward. Analisa-se o modelo Ward estendido e propõe-se uma versão aperfeiçoada do mesmo. Apresenta-se também um estudo sobre técnicas de esparsidade em métodos computacionais para uso nos equivalentes. Finalmente faz-se uma aplicação dos estudos anteriores no sistema elétrico brasileiro.

Í N D I C E

I	- INTRODUÇÃO	1
II	- CONTROLE E SEGURANÇA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	3
	A. INTRODUÇÃO	3
	1. Restrições de operação	3
	2. Estados de segurança	4
	3. Tipos de variáveis e observabilidade	6
	B. CENTROS DE CONTROLE	7
	1. Esquema hierárquico	7
	2. Funções de controle	8
	3. Aquisição de dados	10
	C. FUNÇÕES DE SEGURANÇA	14
	1. Classificação da segurança	14
	2. Etapas de execução da segurança	15
	3. Observabilidade e funções de segurança	16
	D. REPRESENTAÇÃO DE PARTES DO SISTEMA ELÉTRICO	19
	1. Divisão do sistema	19
	2. Importância e requisitos da representação de sistemas	19
	3. Equivalentes	21
	4. Tipos de equivalentes	22
III	- EQUIVALENTE WARD	25
	A. INTRODUÇÃO	25
	1. Redução de circuitos	25
	2. Variações no equivalente Ward	28
	B. OBTENÇÃO DO EQUIVALENTE	29
	1. Eliminação de Gauss	29
	2. Aplicação da eliminação	30
	3. Representação esquemática do equivalente	35
	4. Redução de Kron	36

C.	ANÁLISE DOS EQUIVALENTES WARD	39
1.	Método Ward com injeção	39
2.	Método Ward com admitância	42
3.	Método Ward com ajuste na fronteira	44
4.	Comparação entre os métodos	46
D.	APLICAÇÃO DO WARD COM AJUSTE NA FRONTEIRA	47
1.	Dados para o equivalente	47
2.	Cálculo do equivalente	51
3.	Avaliação do desempenho	55
IV	- EQUIVALENTES WARD MODIFICADOS	57
A.	INTRODUÇÃO	57
1.	Eliminação de barras PV externas	57
2.	Considerações sobre as admitâncias "shunt"	60
3.	Ward "desacoplado"	61
B.	EQUIVALENTE WARD ESTENDIDO	63
1.	Conceituação do modelo	64
2.	Cálculo do Ward estendido	68
3.	Comparações entre as diferentes versões	70
4.	Exemplo de cálculo	71
C.	EQUIVALENTE WARD ESTENDIDO COM CALIBRAÇÃO	79
1.	Princípios da calibração	79
2.	Cálculo do Ward estendido com calibração	82
3.	Exemplo de cálculo	83
4.	Avaliações do modelo	88
D.	TESTES E COMPARAÇÕES	89
1.	Condições dos testes	89
2.	Testes realizados	90
3.	Análise dos desempenhos	99
V	- TÉCNICAS DE ESPARSIDADE	100
A.	ESTRUTURA DE DADOS	100
1.	Conceitos introdutórios	101
2.	Implementação computacional	106

B. SOLUÇÃO DE SISTEMAS LINEARES	119
1. Introdução	119
2. Métodos de substituição	120
3. Decomposição triangular	123
C. MÉTODOS PARA MATRIZES ESPARSAS	130
1. Representação	130
2. Rotinas de modificação	132
3. Implementação da eliminação de Gauss	143
4. Aplicação na obtenção de equivalentes externos	145
VI - CONCLUSÕES	147
A. APLICAÇÕES NO SISTEMA BRASILEIRO	147
1. Estrutura hierárquica	147
2. Equivalentes externos	151
B. COMENTÁRIOS E SUGESTÕES FINAIS	153
1. Análise complementar	154
2. Sugestões	155
APÊNDICE	156
BIBLIOGRAFIA	159

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figuras

II.1	Estados de operação dos sistemas quanto a segurança	5
II.2	Estrutura de um sistema de supervisão e controle com sistemas de comunicações	9
II.3	Funções em um sistema de supervisão e controle em função do nível hierárquico e do tempo	11
II.4	Esquema de recepção de dados em um centro de controle	12
II.5	Estrutura do Sistema de Supervisão e Coordenação	13
II.6	Esquema de funcionamento em um sistema de segurança	15
II.7	Fluxograma de tarefas relacionadas com a segurança em sistemas elétricos de potência	17
II.8	Sistema interligado com centros de controle	18
II.9	Divisão do sistema quanto a observabilidade	20
II.10	Equivalente de parte do sistema	22
III.1	Sequência de obtenção do equivalente	26
III.2	Sistema para obtenção do equivalente	30
III.3	Sistema com equivalente	34
III.4	Ward com injeção de corrente	41
III.5	Ward com admitância	43
III.6	Ward com ajuste na fronteira	45
III.7	Sistema para cálculo do equivalente	47
III.8	Sistema com equivalente	55
IV.1	Redução de sistema com retenção de barra PV: a- sistema completo; b- equivalente	58
IV.2	Modelo com zona de amortecimento	59

IV.3	Equivalente Ward "desacoplado": a- parte ativa; b- parte reativa	63
IV.4	Esquema do Ward estendido com ligação "shunt"	65
IV.5	Esquema do Ward estendido com barra fictícia	67
IV.6	Equivalente Ward com barra fictícia	70
IV.7	Representação do sistema externo e fronteira para cálculo do Ward estendido	72
IV.8	Sistema com equivalente Ward estendido	79
IV.9	Equivalente Ward com calibração: a- com o ramo fictício e o incremento; b- com o ramo fictício já modificado	81
IV.10	Sistema para cálculo do equivalente Ward estendido com calibração	84
IV.11	Sistema com equivalente Ward estendido com calibração	87
V.1	Representação de uma estrutura em sistemas elétricos de potência	101
V.2	Representação das variáveis indexadas KEY e TEM	102
V.3	Variável indexada IPO com ponteiro J	103
V.4	Exemplo de sistema para implantação das variáveis indexadas IPO e KOM	104
V.5	Conjunto de variáveis indexadas do sistema da figura V.4	105
V.6	Fluxograma da rotina de busca rápida	108
V.7	Variáveis indexadas com nova montagem	111
V.8	Valores assumidos na execução da rotina PONT	113
V.9	Valores de KOM(k) ao fim da execução da rotina PONT	113
V.10	Busca de linhas "penduradas" em uma barra	115
V.11	Busca de linhas de saída e chegada	116
V.12	Matrizes $F_{(i,j)}$ e $F_{(i,j)}^A$ para zerar o elemento A_{ij}	125

V.13	Aplicação do método de Gauss no processo de triangularização	127
V.14	Produto das matrizes \underline{F} para eliminar uma sub-coluna	128
V.15	Valor da matriz $\underline{F}^{-1}(*,j)$	129
V.16	Matriz final \underline{F}^{-1}	129
V.17	Sistema para armazenamento conforme figura V.18	131
V.18	Armazenamento do sistema da figura V.17	132
V.19	Registro LAVS e lista IPO antes de serem utilizados	134
V.20	Inclusão de elemento com a rotina POEM	139
V.21	Efeito da rotina POEX: a- antes; b- depois	141
V.22	Obtenção do equivalente Ward	146
VI.1	Possíveis áreas de controle no sistema brasileiro	149
VI.2	Distribuição hierárquica sugerida para o sistema interligado	150
VI.3	Sistema Eletrosul isolado	152
VI.4	Equivalente do sistema visto pela Eletrosul	153

Tabelas

II.1	Classificação de trabalhos publicados sobre equivalentes	24
III.1	Dados de linha do sistema da figura III.7	48
III.2	Dados de barra do sistema da figura III.7	48
III.3	Perfil de tensões e gerações das barras PV e referência	50
III.4	Fluxos nas linhas	50

IV.1	Fluxos obtidos com a saída da linha 1-4	85
IV.2	Resultados apresentados para a contin <u>g</u> ência 1	93
IV.3	Resultados apresentados para a contin <u>g</u> ência 2	95
IV.4	Resultados apresentados para a contin <u>g</u> ência 3	97

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O estudo de equivalentes em sistemas elétricos de potência tem merecido uma atenção muito grande em anos recentes, continuando ainda como um tema extremamente importante, para o qual muitas soluções ainda estão por ser dadas. Os equivalentes de sistemas externos tornaram-se bastante interessantes e úteis com o aumento dos sistemas interligados e com o advento de uma filosofia de supervisão e controle em tempo real e centralizados para estes sistemas.

Este trabalho pretende estudar os problemas na obtenção e utilização dos equivalentes estáticos de sistemas externos, enfocando os equivalentes ditos topológicos. É proposta uma versão alternativa de um modelo já existente, no intuito de melhorar seu desempenho.

É analisado também o problema de supervisão e coordenação de operações em um sistema elétrico de potência interligado, propondo-se uma estrutura para tal fim. Também são abordadas técnicas de esparsidade que permitam obter e manipular de forma eficiente os equivalentes externos.

No capítulo II é estudado o sistema de supervisão e controle para um sistema interligado, analisando-se as funções de controle e segurança e apresentando-se formas de implementação. Uma estrutura hierárquica é proposta definindo-se suas principais características. É apresentado o problema do equivalente e sua aplicação, fazendo-se um apanhado geral dos vários tipos existentes, com citação bibliográfica.

O capítulo III apresenta o equivalente tipo Ward, básico para o desenvolvimento dos outros modelos, mostrando-se os tipos existentes. É apresentada a forma de obtenção, com aplicação da eliminação de Gauss, e também é feita uma análise dos tipos apresentados. Finalmente é desenvolvi

do um exemplo numérico de aplicação.

No capítulo IV são mostradas algumas das deficiências dos tipos já apresentados e as formas de solução para as mesmas. Como decorrência é apresentado o método Ward estendido, sua conceituação, cálculo e um exemplo numérico. Ainda neste capítulo é proposta uma versão modificada do modelo anterior, chamada Ward estendido com calibração, para a qual também é apresentada uma aplicação numérica. Finalmente são apresentados resultados de testes realizados com alguns modelos e comparados com várias opções do Ward estendido com calibração. Faz-se também avaliações dos modelos e análise dos desempenhos.

O capítulo V abrange a parte de técnicas de esparsidade e tem o objetivo de definir linhas gerais de procedimento. Parte-se da conceituação de estrutura de dados, analisa-se a solução de sistemas lineares chegando-se até aos métodos para matrizes esparsas. É feita implementação da eliminação de Gauss e sua aplicação na obtenção de equivalentes externos, com eliminação de Gauss truncada.

Várias rotinas são propostas fixando-se assim uma base apta para programação estruturada.

Finalmente o capítulo VI apresenta as conclusões finais, mostrando também uma aplicação esquemática para o sistema brasileiro. É feita uma última análise dos equivalentes apresentados e são indicados vários temas para estudos posteriores.

CAPÍTULO II

CONTROLE E SEGURANÇA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A. INTRODUÇÃO

Modernamente os sistemas elétricos de potência vêm experimentando grandes transformações, tanto no que diz respeito ao crescimento e às interligações entre sistemas, como também no crescente grau de sofisticação de seu funcionamento. Com isto cresce a preocupação no sentido de operá-los da forma mais eficiente possível.

1. Restrições de operação

Operar eficientemente um sistema elétrico de potência significa operá-lo de forma segura, confiável e econômica. Em outras palavras, o sistema deve cumprir as restrições de carga, isto é, deve atender todas as cargas, e ao mesmo tempo deve cumprir as restrições de operação, isto é, as variações de tensão e frequência devem estar dentro das faixas estabelecidas e os equipamentos não devem sofrer sobrecargas. Atender a essas restrições e continuar atendendo-as mesmo após mudanças (contingências) que possam ocorrer no sistema significa atender as restrições de segurança em estado permanente. Além disso, dentro da idéia de eficiência, o sistema deve operar de modo econômico, isto é, o custo da energia entregue ao consumidor deve ser o menor possível.

2. Estados de segurança

Sabe-se que os sistemas elétricos de potência mudam constantemente de estado durante sua operação. Estas mudanças são devidas a causas várias, tais como, alterações de cargas, desconexão de linhas de transmissão por qualquer causa, perda de geração, etc. Isto é, as mudanças de estado, em estado permanente, são devidas a contingências no sistema, ações de controle ou ainda variações normais de carga. Desta forma, deve-se entender como contingência em um sistema elétrico de potência a saída ou entrada de qualquer equipamento, carga ou geração, ou seja, qualquer mudança na configuração do sistema.

Os estados de um sistema elétrico de potência podem ser classificados quanto à segurança, em quatro situações descritas em seguida |1, 2, 3, 4|.

Estado normal é o estado onde são cumpridas as restrições de carga, de operação e de segurança. Isto é, todas as cargas são atendidas, a frequência e a tensão mantêm-se dentro das faixas estipuladas, não havendo sobrecarga em equipamento, e ainda, caso ocorra uma contingência, o sistema continuará operando e respeitando as restrições de carga e operação.

Estado de alerta é o estado onde ainda são cumpridas as restrições de carga e de operação, mas já não se cumpre a restrição de segurança. Isto é, todas as cargas são atendidas, os limites de tensão e frequência são respeitados e nenhum equipamento está com sobrecarga, porém, existe alguma emergência que, caso venha a ocorrer, levará o sistema a uma situação onde não mais se respeitarão as restrições de carga e/ou operação. Em outros termos, podem ocorrer contingências que levem o sistema a um estado de emergência. O estado de alerta também é conhecido como estado normal inseguro.

Estado de emergência é o estado onde não se cumprem as restrições de carga e/ou de operação e o estado do

sistema está em deteriorização. Isto é, algumas cargas não são atendidas e/ou os limites de tensão e frequência não são respeitados e/ou algum equipamento está com sobrecarga e além disso as condições do sistema estão piorando.

Estado de restauração é o estado seguinte a uma emergência, mas onde a situação foi estabilizada, ou seja, é o estado onde não se cumprem as restrições de carga e/ou de operação, mas o estado do sistema está estabilizado e é um passo prévio ao estabelecimento do estado normal, passando pelo de alerta. Em outros termos, algumas cargas não são atendidas e/ou os limites de tensão e frequência não são respeitados e/ou algum equipamento está com sobrecarga, porém as condições do sistema estão estabilizadas.

Os quatro estados são mostrados na figura II.1, juntamente com as principais transições entre estados.

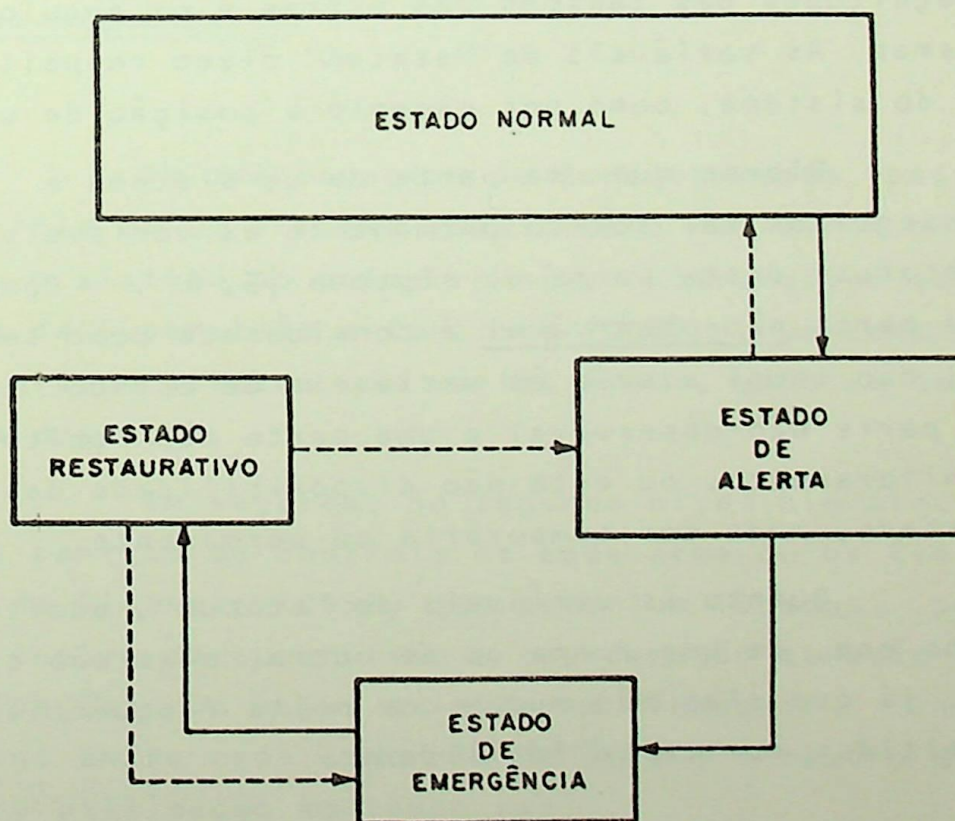


Fig.II.1 - Estados de operação dos sistemas quanto a segurança

Em geral, as transições tracejadas na figura 11.1 devem-se a ações de controle e as de linhas cheias a contingências. O controle que leva o sistema do estado de alerta para o normal é chamado de corretivo, o que leva do estado de emergência para o restaurativo é chamado de controle de emergência e o que leva do restaurativo para o estado de alerta é o controle restaurativo.

3. Tipos de variáveis e observabilidade

O controle de sistemas elétricos de potência implica na obtenção e manipulação de uma série de variáveis, entre as quais destacam-se as que informam a situação do sistema, ou seja, o estado dos diversos componentes e os valores das grandezas típicas. Estas variáveis podem ser divididas em variáveis de estado e variáveis de "status". As variáveis de estado são as que definem o estado do sistema, como por exemplo, as magnitudes das tensões das barras e os ângulos de fase das mesmas. As variáveis de "status" dizem respeito à configuração do sistema, como por exemplo a posição de uma chave.

Diz-se que uma parte de um sistema é observável se conseguimos ter acesso permanente às variáveis de estado e de "status" desta parte do sistema [5, 6]. Consequentemente, uma parte não-observável é considerada como sendo aquela na qual não temos acesso às variáveis de estado. Em outros termos, a parte não-observável é uma parte não monitorada. Este não monitoramento, ou esta não disponibilidade das variáveis de estado, pode ser temporária ou permanente.

Quanto às variáveis de "status", admite-se neste trabalho que, de uma forma ou de outra, elas são sempre acessíveis, já que elas não mudam com muita frequência e podem ser transmitidas com certa facilidade.

B. CENTROS DE CONTROLE

Um sistema elétrico de potência interligado apresenta melhores condições de funcionamento no que diz respeito à segurança, confiabilidade e economia. Ele é dividido em várias áreas cada uma delas sendo subdividida em várias regiões.

Estas áreas se caracterizam por razões geográficas, por pertencerem a diferentes companhias, ou ainda por razões de operação.

O sistema interligado exige, para um funcionamento eficiente, vários centros de controle bem equipados, atuando de forma hierárquica, contando com computadores e canais de comunicações que constituiriam um Sistema de Supervisão e Coordenação [1, 2, 7, 8,].

1. Esquema hierárquico

Um dos esquemas de funcionamento possíveis para o controle de um sistema interligado seria com um centro para todo o sistema no primeiro nível hierárquico, que seria um Centro de Supervisão e Controle (CSC) ou um centro abrangendo um grande sistema com várias áreas, como um centro nacional de despacho.

Em seguida, no segundo nível hierárquico, teríamos os centros de controle de cada área ou os Centros de Operação de Sistemas (COS), que estariam ligados permanentemente ao centro de supervisão e coordenação através de canais de comunicações. Ou seja, existiriam fluxos de informações permanentes entre cada controle de área e o centro de supervisão para utilização em tempo real.

Existiriam também trocas de informações entre os centros de área, de forma não permanente, referentes às va

riáveis de "status" com utilização "off-line". Esta troca de informações pode ser feita via telefone ou teletipo |1, 2|.

Os Centros de Operação de Distribuição (COD) estariam no terceiro nível hierárquico da estrutura, a nível de região, e seriam ligados aos centros de área por canais de comunicação e de sinais de controle. Isto é, existiriam fluxos de informações e de sinais de controle entre os centros regionais e os centros de controle de área.

A figura 11.2 mostra a estrutura de um Sistema de Supervisão e Coordenação com os canais de ligação entre os centros.

2. Funções de controle

O CSC recebe informações de todo o sistema via centros de áreas (COS) e fornece as normas gerais de operação. Entre suas principais funções pode-se destacar |7, 9, 10|:

- controle potência-frequência;
- despacho econômico;
- monitoração de segurança;
- estimação de estado;
- análise de segurança;
- planejamento do sistema;
- controle tensão/VAR;
- previsão a curto, médio e longo prazo;
- pré-despacho e programação de manutenção.

Os centros tipo COS definem a forma de operação para suas respectivas áreas dentro das normas dadas pelo CSC. Suas funções principais são: construção de equivalentes, fluxo de carga equivalente, alocação de geração própria, ressaltando fluxos entre áreas e perfil de tensões na fronteira, análise de falta, etc. Os centros tipo COD têm funções de a

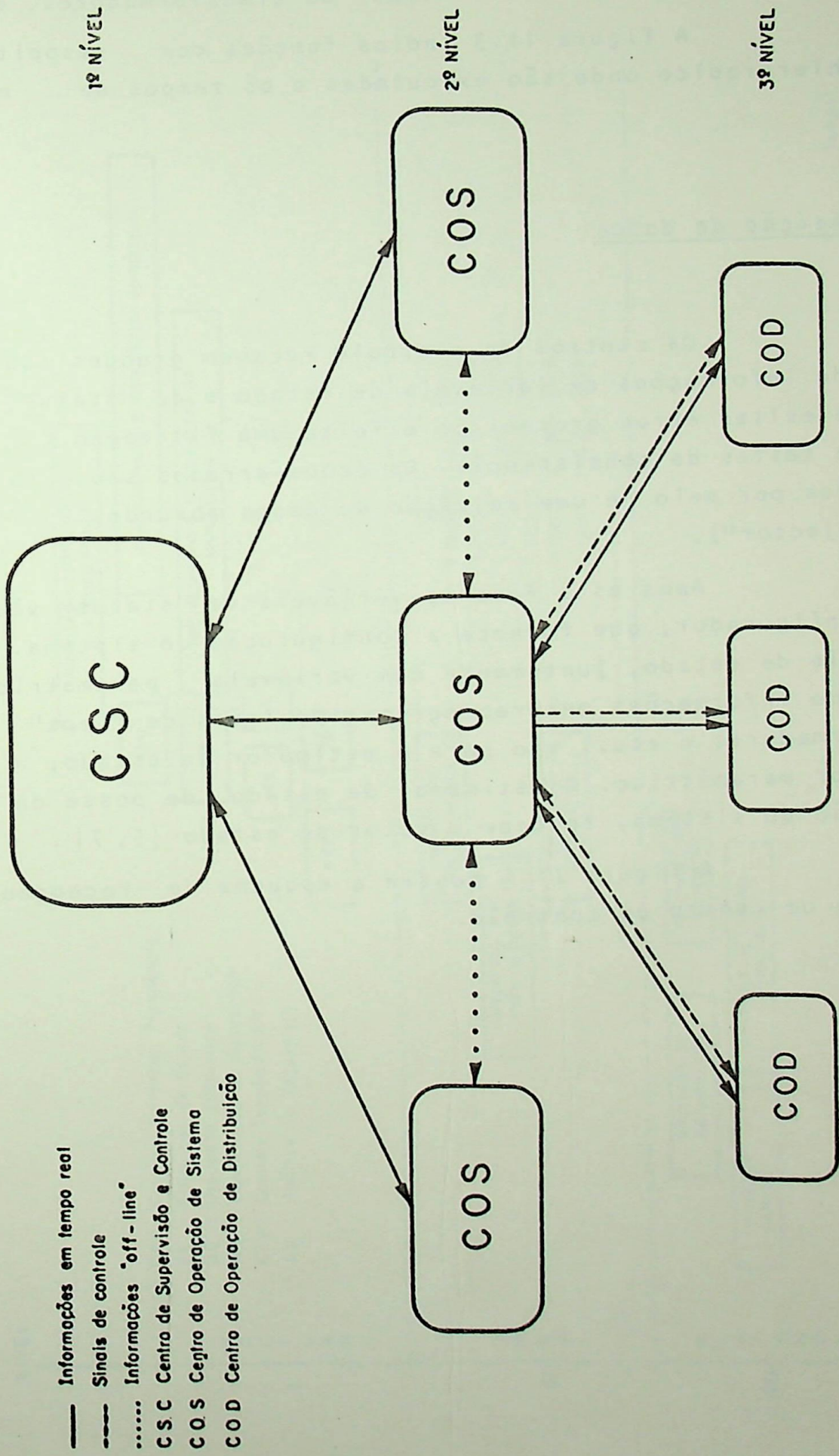


Fig. II.2 - Estrutura de um sistema de supervisão e controle com sistemas de comunicações

Juste de proteção, ajuste de "taps" de transformadores, etc.

A figura 11.3 indica funções com respeito ao nível hierárquico onde são executadas e os tempos de execução.

3. Aquisição de dados

Os centros de controle recebem grandes quantidades de informações de variáveis de estado e de "status" e para se evitar erros grosseiros é feita uma filtragem por meio de testes de consistência. Os dados errados são assim eliminados por meio de uma rejeição de dados absurdos ("bad data rejector").

Após esta fase as variáveis de "status" vão para o configurador, que fornece a configuração do sistema. As variáveis de estado, juntamente com variáveis paramétricas, tais como informações meteorológicas, posições de "taps" de transformadores e etc., vão para o estimador de estado, via estimador paramétrico. O estimador de estado, de posse da configuração do sistema, fornece o vetor de estado $|5, 7|$.

A figura 11.4 mostra o esquema de recepção de dados de um centro de controle.

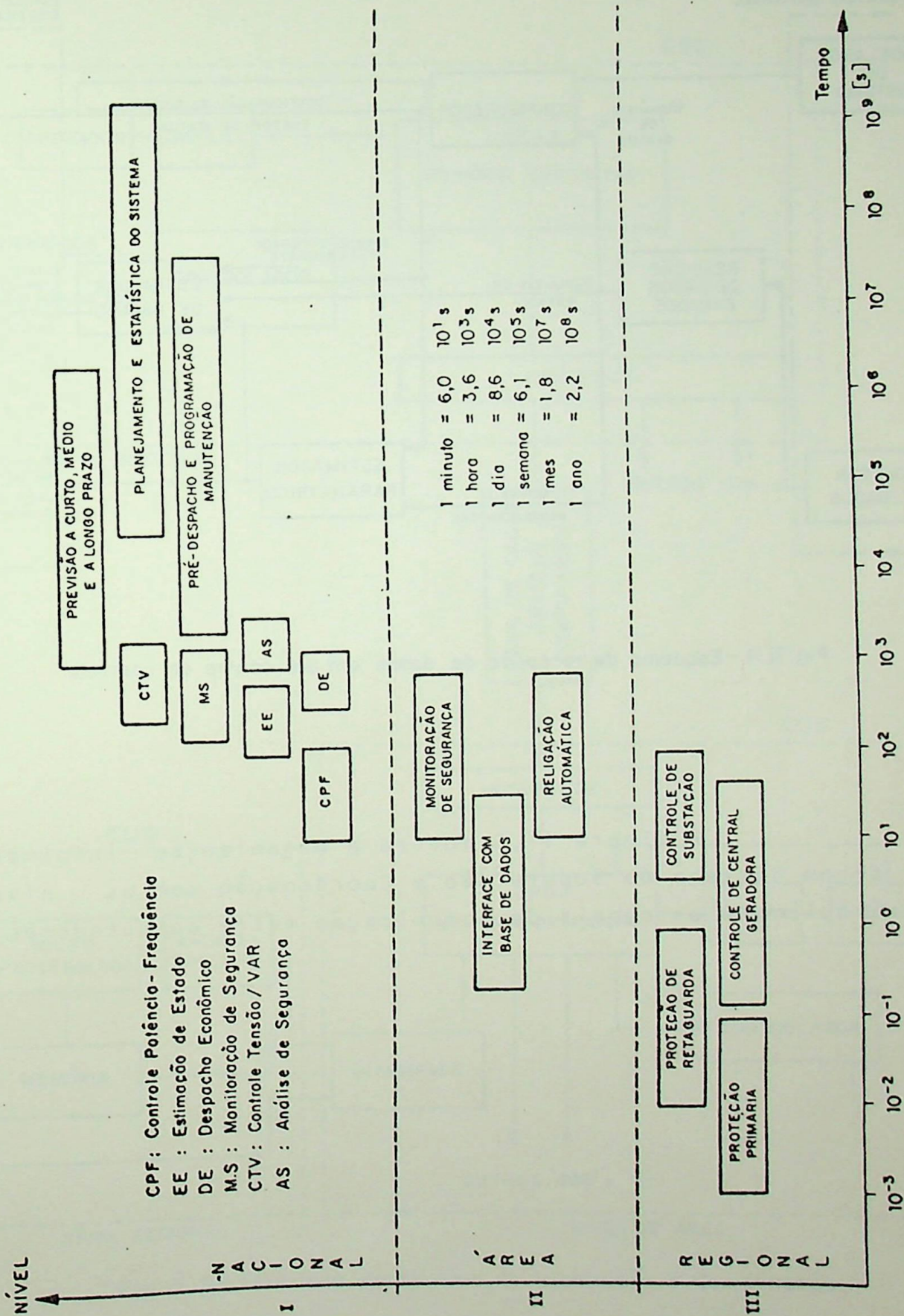


Fig. II. 3- Funções em um sistema de supervisão e controle em função do nível hierárquico e do tempo

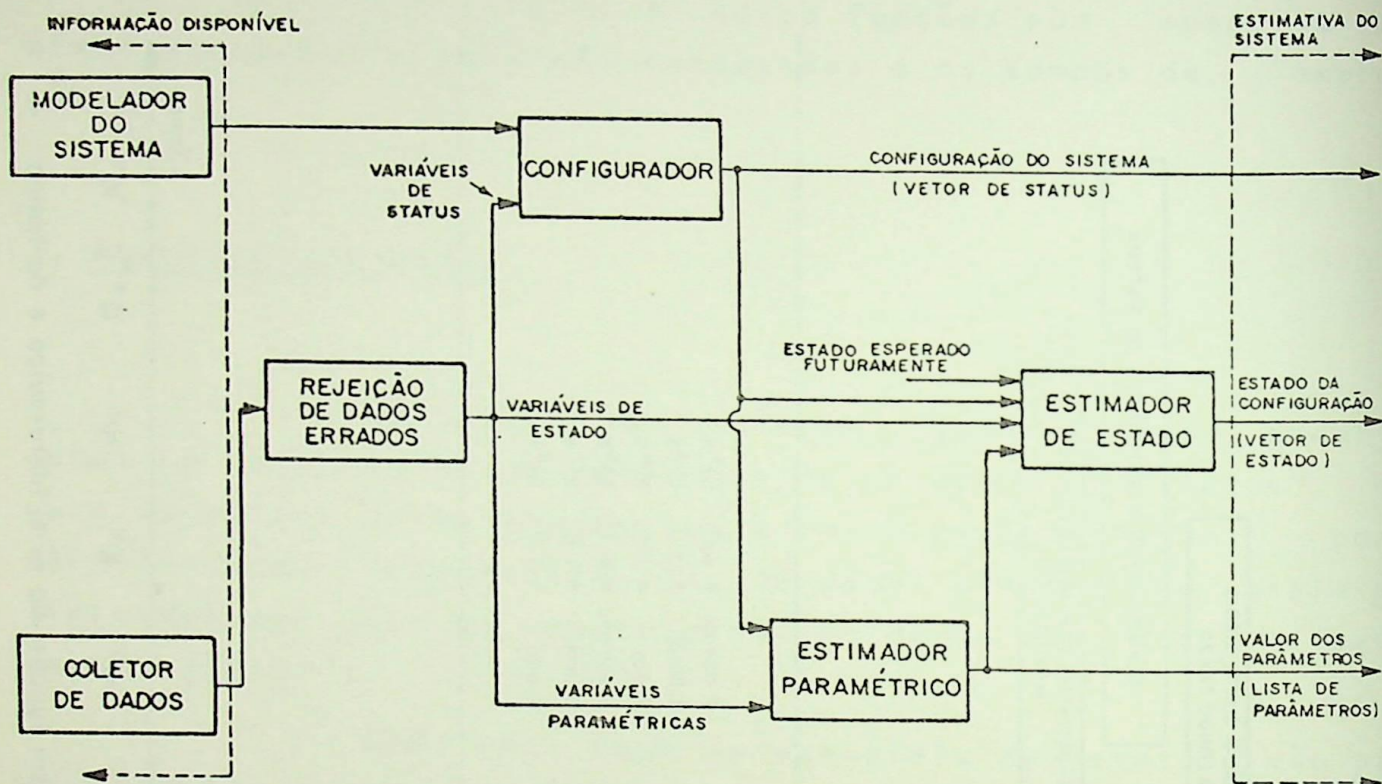


Fig. II.4 - Esquema de recepção de dados em um centro de controle

A figura 11.5 mostra a organização informacional de um Sistema de Supervisão e Coordenação com os níveis hierárquicos e os canais de comunicação entre computadores.

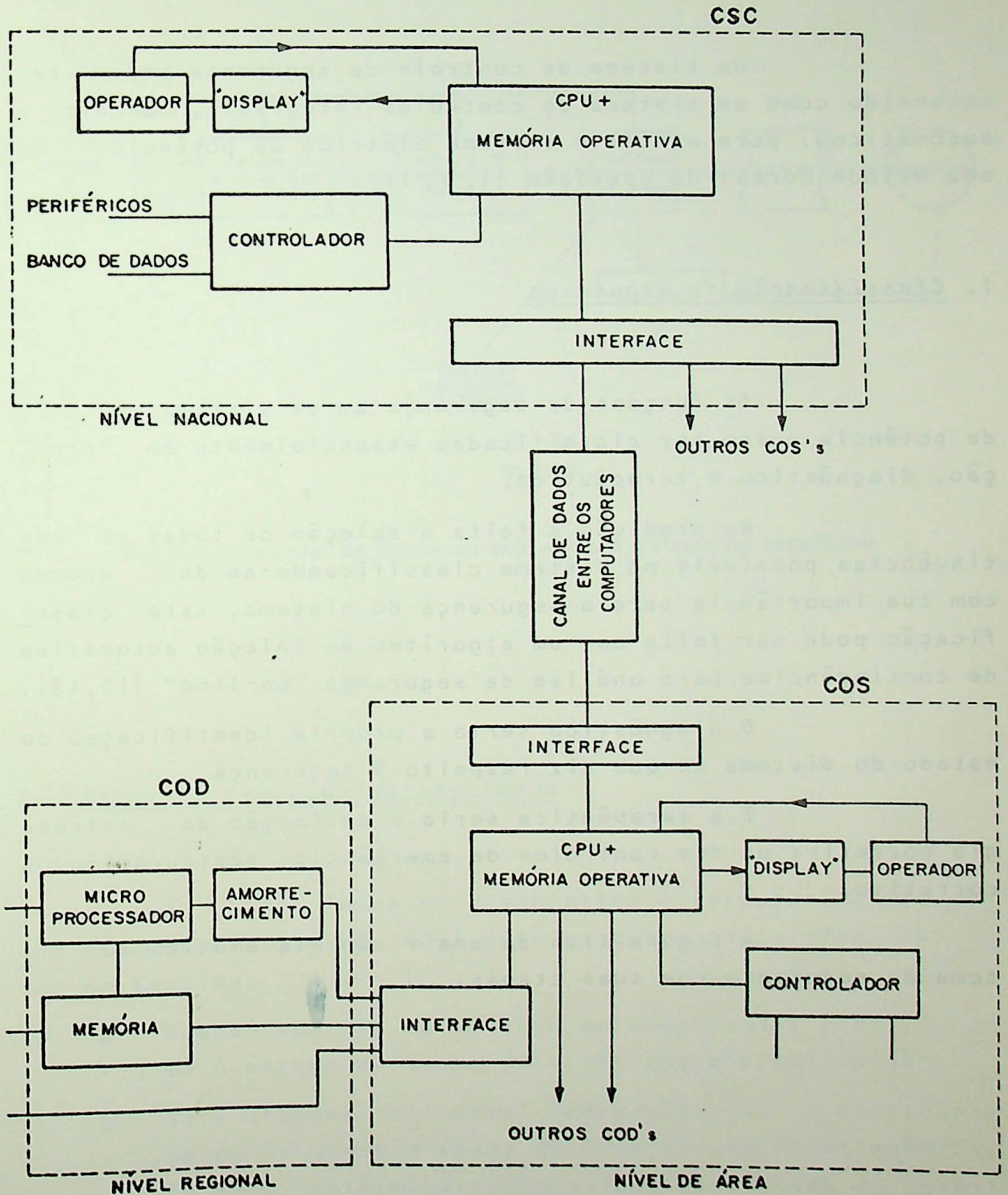


Fig. II.5 - Estrutura do Sistema de Supervisão e Coordenação

C. FUNÇÕES DE SEGURANÇA

Um sistema de controle de segurança pode ser entendido como um sistema de controles integrados, manuais e automáticos, para manter o sistema elétrico de potência no seu estado normal de operação [1, 7, 11].

1. Classificação da segurança

As funções de segurança em um sistema elétrico de potência podem ser classificadas essencialmente em predição, diagnóstico e terapêutica.

Na predição é feita a seleção de todas as contingências possíveis no sistema classificando-as de acordo com sua importância para a segurança do sistema. Esta classificação pode ser feita com um algoritmo de seleção automática de contingências para análise de segurança "on-line" [12,13].

O diagnóstico seria a própria identificação do estado do sistema no que diz respeito à segurança.

E a terapêutica seria a aplicação da estratégia corretiva ou dos controles de emergência, restaurativo ou corretivo.

A figura 11.6 dá uma visão esquemática do sistema de segurança com suas etapas.

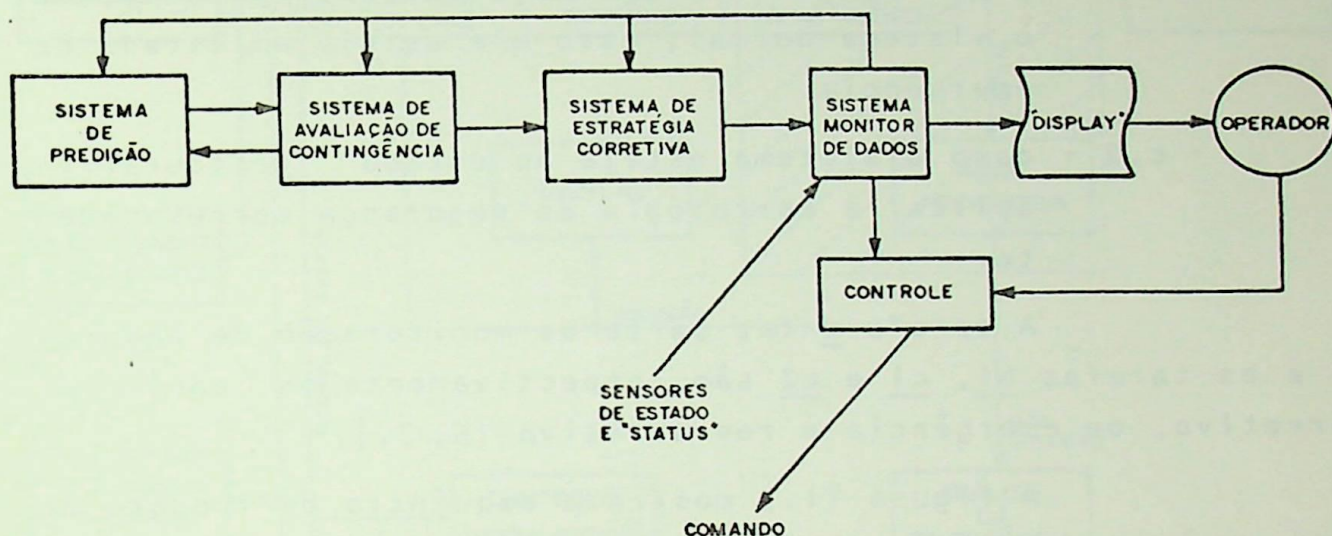


Fig.II.6 - Esquema de funcionamento em um sistema de segurança

2. Etapas de execução da segurança

Nas fases de diagnóstico e terapêutica um centro de controle (SCS ou COS) deve executar as tarefas descritas em seguida.

- a - Usando medidas do sistema em tempo real, identificar se o estado do mesmo é normal (ou alerta) ou não.
- b - Se o sistema for normal, determinar se continuará sendo na eventualidade de ocorrer uma contingência. Ou seja, determinar se o estado do sistema é normal ou de alerta, (normal inseguro) e também qual estratégia de segurança deve ser aplicada caso seja estado de alerta.

- b.1 - aplicar estratégia de segurança adequada caso o sistema esteja no estado de alerta.
- c - Caso o estado não seja normal, aplicar:
 - c.1 - a estratégia de segurança adequada para tornar o sistema normal, caso ele esteja em estado de emergência.
 - c.2 - caso o sistema esteja no estado restaurativo, aplicar a estratégia de segurança correspondente.

A tarefa a faz parte da monitoração de segurança e as tarefas b1, c1 e c2 são respectivamente os controles corretivo, de emergência e restaurativo [5, 7,].

A figura 11.7 mostra a sequência de funções relativas à segurança.

3. Observabilidade e funções de segurança

Muitas das funções de segurança descritas anteriormente e mesmo outras funções de controle, quando executadas "on-line" necessitam de informações de todo o sistema interligado. Como exemplo, pode-se citar a análise de contingências, análise de curto-circuito, despacho econômico, ações de controle corretivo, de emergência e restaurativo, etc.

Entretanto, nem sempre é possível ter-se informações de todo o sistema, já que para um determinado centro de controle, muitas vezes, somente uma parte do sistema é observável, sendo outra parte não-observável [2, 3, 6].

A nível de CSC, por exemplo, este problema pode ocorrer quando houver perda eventual dos canais de comunicações com um COS, tornando a área correspondente temporariamente não-observável;

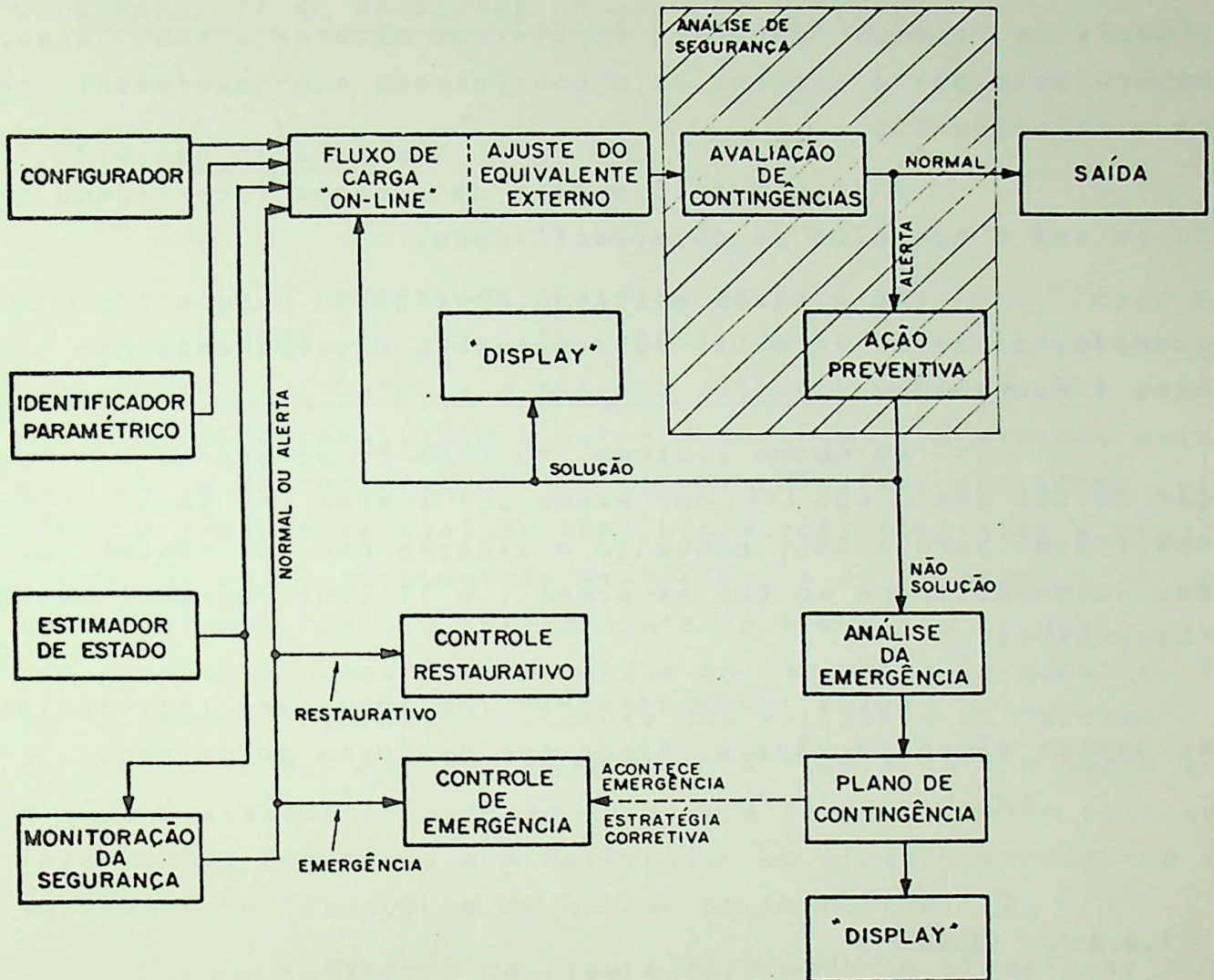


Fig. II.7 - Fluxograma de tarefas relacionadas com a segurança em sistemas elétricos de potência

Para um COS, sua área de controle é observável, a menos de subsistemas de distribuição que são em geral não-observáveis, como também são não observáveis as áreas dos ou tros COS's. Isto é, para um COS, a parte de seu sistema com tensões mais elevadas é observável, sendo não-observável a parte com tensões mais baixas (baixa tensão) e também todo o resto do sistema interligado.

Note-se que um COS recebe informações das variáveis de "status" da parte do sistema externa à sua área, embora esta parte externa seja considerada não-observável para o referido COS.

A figura II.8 mostra um sistema interligado onde se usa o conceito de observabilidade.

No sistema mostrado na figura, para o COS I, por exemplo, as áreas II e III são não-observáveis, enquanto a área I é observável.

No mesmo sistema, no caso de perder-se a ligação do CSC com o COS III, por exemplo, a área III será não-observável para o CSC, enquanto a ligação não for restabelecida, ao mesmo tempo em que as áreas I e II continuarão sendo observáveis.

Desta forma torna-se indispensável representar as partes não-observáveis, ainda que de forma aproximada.

1, 2, 3..... REGIÕES

I, II, III..... ÁREAS

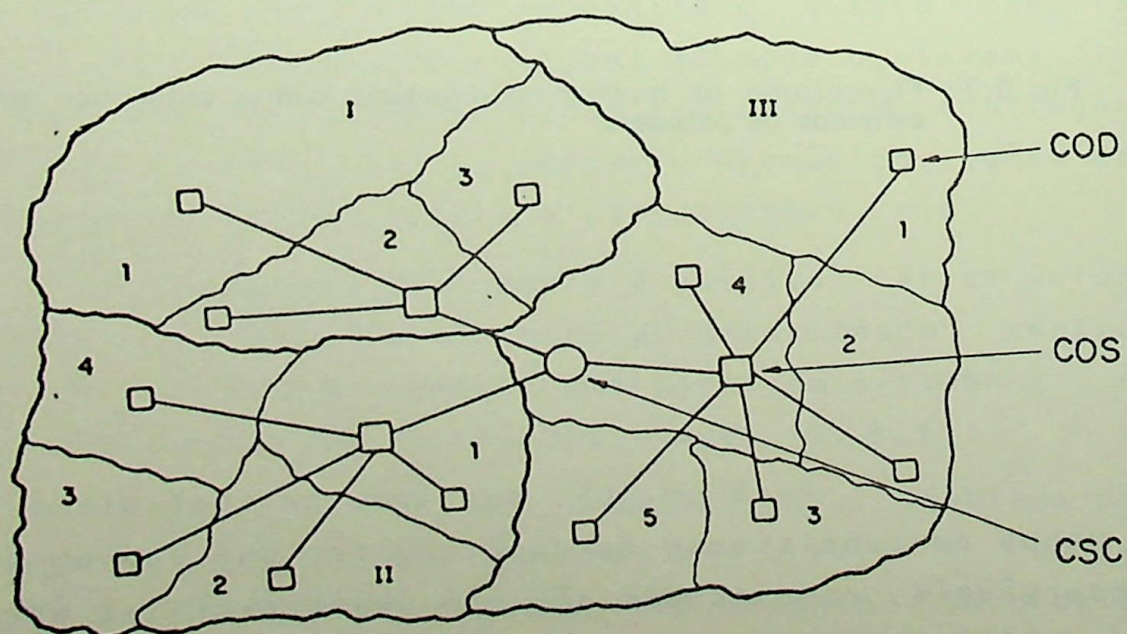


Fig. II.8 - Sistema interligado com centros de controle

D. REPRESENTAÇÃO DE PARTES DO SISTEMA ELÉTRICO

1. Divisão do sistema

Um sistema elétrico de potência interligado pode ser dividido, quanto à observabilidade, em três partes: sistema interno, fronteira e sistema externo. O sistema interno e a fronteira constituem a parte observável e o sistema externo a parte não-observável. Em outras palavras, o sistema interno é a parte da qual se têm informações completas e atualizadas, ou seja, conhecem-se as variáveis de "status" e de estado em tempo real. O sistema externo é a parte da qual se têm somente algumas informações e de forma não permanente, isto é, têm-se informações somente das variáveis de "status" e de uma forma que não em tempo real. A fronteira é a parte que divide o sistema interno do externo e da qual também se têm informações completas e atualizadas, ou ainda conhecem-se as variáveis de "status" e de estado em tempo real [2, 5, 14].

Através da figura 11.9 pode-se visualizar a divisão relatada, onde chama-se de linhas de interligação às linhas que vão da fronteira para o sistema interno.

2. Importância e requisitos da representação de sistemas

A necessidade de informações de todo o sistema interligado para determinadas funções de controle, citadas anteriormente, deve-se ao fato de que, para estas funções, mudanças ocorridas no sistema interno, por ações de controle ou contingências, provocam reações importantes no sistema externo. O objetivo é portanto reproduzir estas reações da parte não-observável, através de uma representação adequada.

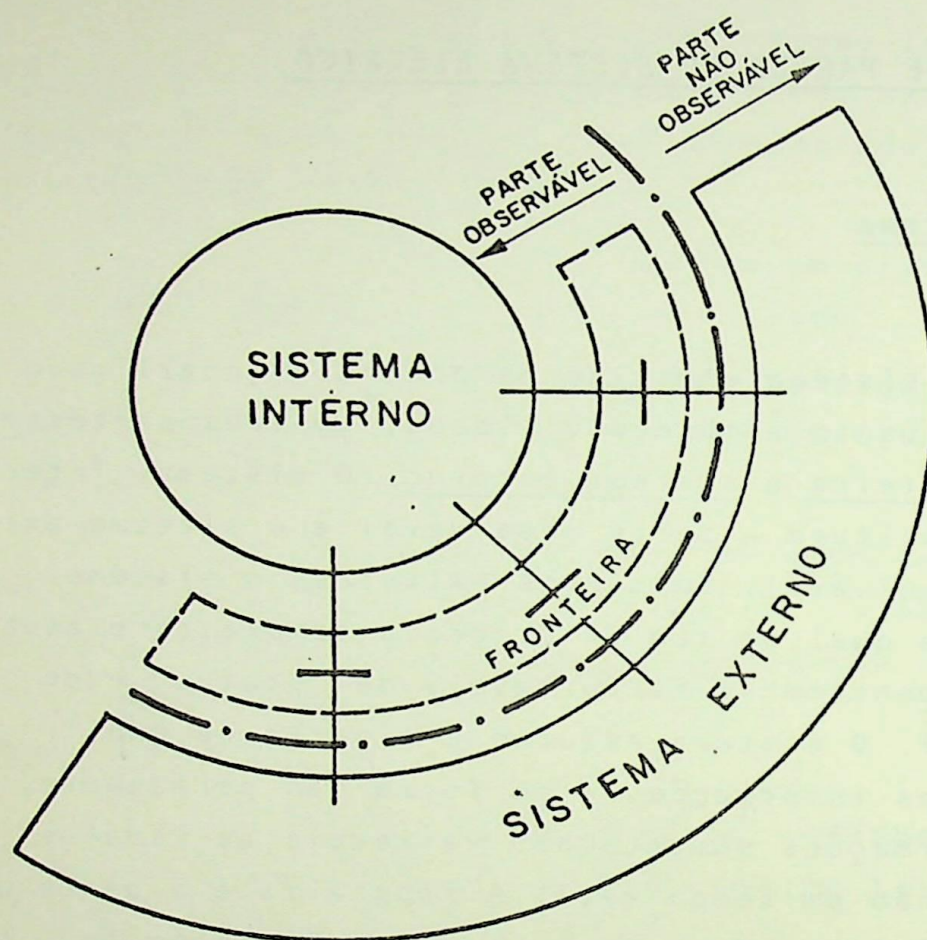


Fig.II.9 - Divisão do sistema quanto a observabilidade

Por outro lado, com o crescimento dos sistemas elétricos, torna-se difícil trabalhar com a totalidade de um sistema elétrico interligado, quer seja pelo problema de economia de memória de computador, quer seja pela necessidade de rapidez nos cálculos computacionais. A solução portanto é trabalhar com um sistema menor que represente convenientemente todo o sistema, reproduzindo suas reações.

Assim, tanto nos casos de partes não-observáveis como em casos de grandes sistemas, embora observáveis, deve-se procurar uma representação que substitua partes do sistema elétrico interligado.

Para esta representação deve-se levar em conta o que se tem, em termos de dados, e o que se quer, em termos de qual aplicação e com que precisão de resultados.

Em princípio deve-se pretender uma representação a mais exata possível, que reproduza as reações do sistema de forma confiável e precisa. Por outro lado, é importante a simplicidade do modelo de forma a permitir rapidez no uso e facilidade de manipulação.

3. Equivalentes

As representações de sistemas anteriormente descritas podem ser chamadas de equivalentes, embora alguns tipos de representações não usem especificamente este nome. Também é comum encontrar-se a designação de equivalentes externos, terminologia esta já consagrada quando os autores visam representar o sistema externo, ou seja, a parte não-observável.

Entretanto, deve-se ressaltar que mesmo os modelos comumente usados para representar sistemas externos podem, em princípio, ser aplicados para representar partes observáveis em grandes sistemas.

Neste trabalho não será feita distinção entre representações de partes não-observáveis e de observáveis, designando-se os modelos de equivalentes ou equivalentes externos. Além disso os modelos desenvolvidos serão aplicados em representações de sistemas externos conforme indicado na figura 11.10.

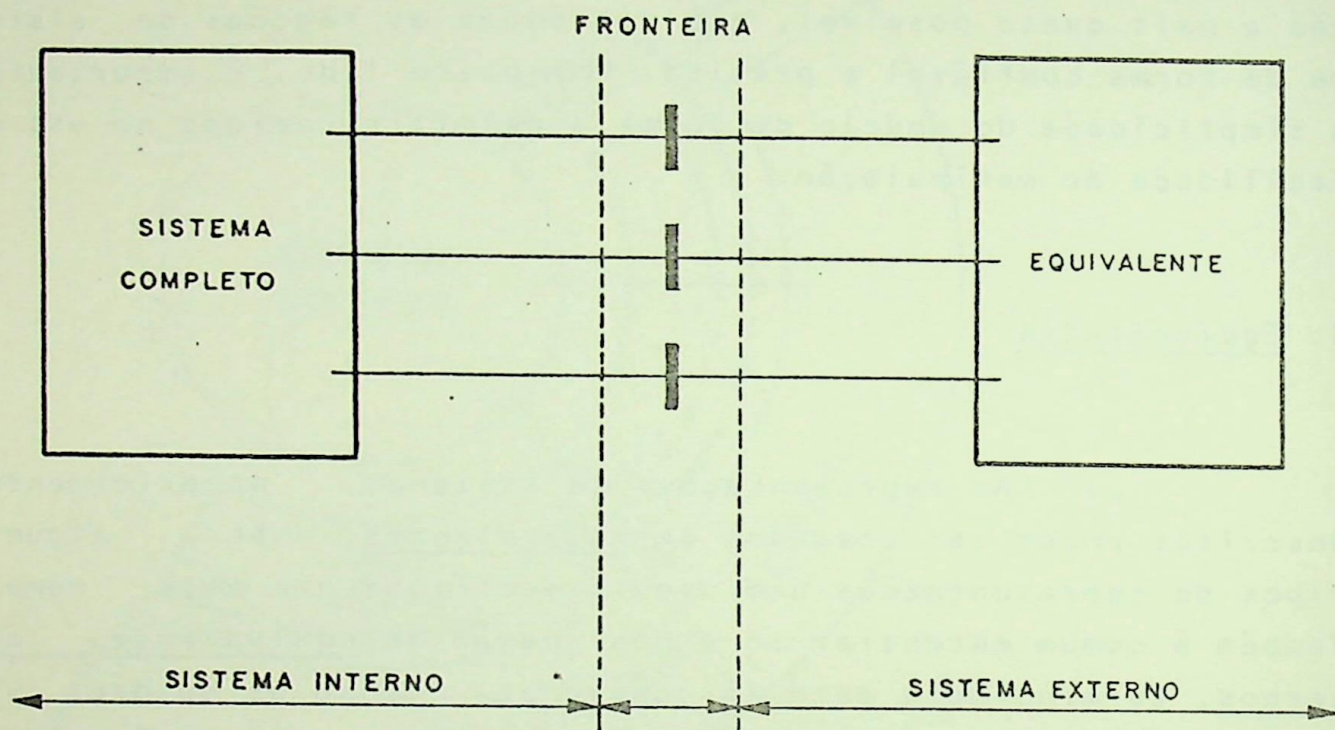


Fig.II.10 - Equivalente de parte do sistema

4. Tipos de equivalentes

Com o desenvolvimento dos sistemas interligados, tem crescido a necessidade do uso de equivalentes e com isto uma grande atenção vem sendo dada ao seu estudo e aprimoramento. Vários modelos de equivalentes têm sido sugeridos, segundo várias linhas de pesquisas.

Alguns dos principais tipos de representações são relacionados a seguir, agrupados de acordo com suas principais características, embora seja comum o aparecimento de modelos usando mais de um tipo de representação.

1. Topológico

1. Redução de circuitos (Ward)
2. Equivalentes REI

II. Matriz de sensibilidade

1. Injeções diferenciais
2. Linearização
3. Fatores de distribuição.

III. Estimador-identificador

1. Estocástico
2. Determinístico

Os equivalentes ditos topológicos são os que usam técnicas de redução de circuitos a partir de determinada configuração do sistema externo. Nesta linha tem-se o tipo Ward e o tipo REI (Radial Equivalent Independent).

Os que usam redução da matriz de sensibilidade baseiam-se na linearização de modelos. São os do método das injeções diferenciais da linearização em torno de um ponto de operação e também dos fatores de distribuição da matriz Z montada com método de descarte de barras.

Finalmente os do tipo estimador-identificador, que usam métodos de ajuste e correção do equivalente baseados em medidas no sistema interno e fronteira e podem usar métodos estocásticos ou determinísticos.

Somente os equivalentes topológicos tipo Ward serão desenvolvidos neste trabalho, levando-se em conta sua simplicidade, rapidez de execução e boa característica de resposta alcançada. Também considera-se o fato de que supõe-se sempre conhecida a configuração dos sistemas externos, facilitando portanto a aplicação dos equivalentes Ward.

A tabela 11.1 dá uma série de referências que são alguns dos principais trabalhos, ligados a equivalentes, publicados nos últimos anos. Para cada trabalho indica-se a principal ou as principais características segundo a classificação feita anteriormente e também o objetivo do trabalho no que diz respeito ao tipo de problema analisado, se saída de linhas ou perda de carga e/ou geração.

TABELA II.1

CLASSIFICAÇÃO DE TRABALHOS PUBLICADOS SOBRE EQUIVALENTES

REFERÊNCIA	TIPO						ESCOPO		
	I		II			III		SAÍDAS DE LINHA	SAÍDAS DE GERAÇÃO/CARGA
	1	2	1	2	3	1	2		
2	*						*		
6	*						*		
14	*						*		
15							*		
16						*	*		
17	*						*		
18	*						*	*	
19		*				*	*		
20					*		*		
21				*			*	*	
22			*				*	*	
23					*		*		
24					*		*		
25		*					*		
26		*					*		
27					*		*		

CAPÍTULO III

EQUIVALENTE WARD

A. INTRODUÇÃO

O equivalente Ward é um modelo de representação de sistemas, proposto originalmente por J.B. Ward em 1949, visando a simulação em analisadores de redes, sendo posteriormente usado em simulação digital e servindo de base para o desenvolvimento de outros tipos de equivalentes [3, 6, 14, 17].

1. Redução de circuitos

O modelo baseia-se em redução de circuitos por eliminação de barras. Assim dada uma configuração de rede é feito o equivalente, eliminando-se um a um os nós ou barras da rede e conseqüentemente criando-se novas ligações entre os nós remanescentes. Desta forma, para o sistema de equações nodais da rede, a redução significa eliminar uma a uma as equações, modificando as que restam de forma a que elas incorporem o significado das que são eliminadas.

O processo de eliminação das barras, ou das equações, é repetido até que restem somente as barras que desejamos guardar, ou as equações referentes a estas barras.

No exemplo da figura III.1 é dado um sistema do qual se eliminam as barras (5), (4) e (3), ficando-se com um equivalente nas barras (1) e (2). Note-se que após a eliminação da barra (5) a ligação entre (3) e (4) é modificada, o mesmo ocorrendo entre as barras (2) e (3) após a eliminação da (4) e ainda se repetindo entre (1) e (2) após a eliminação

da (3).

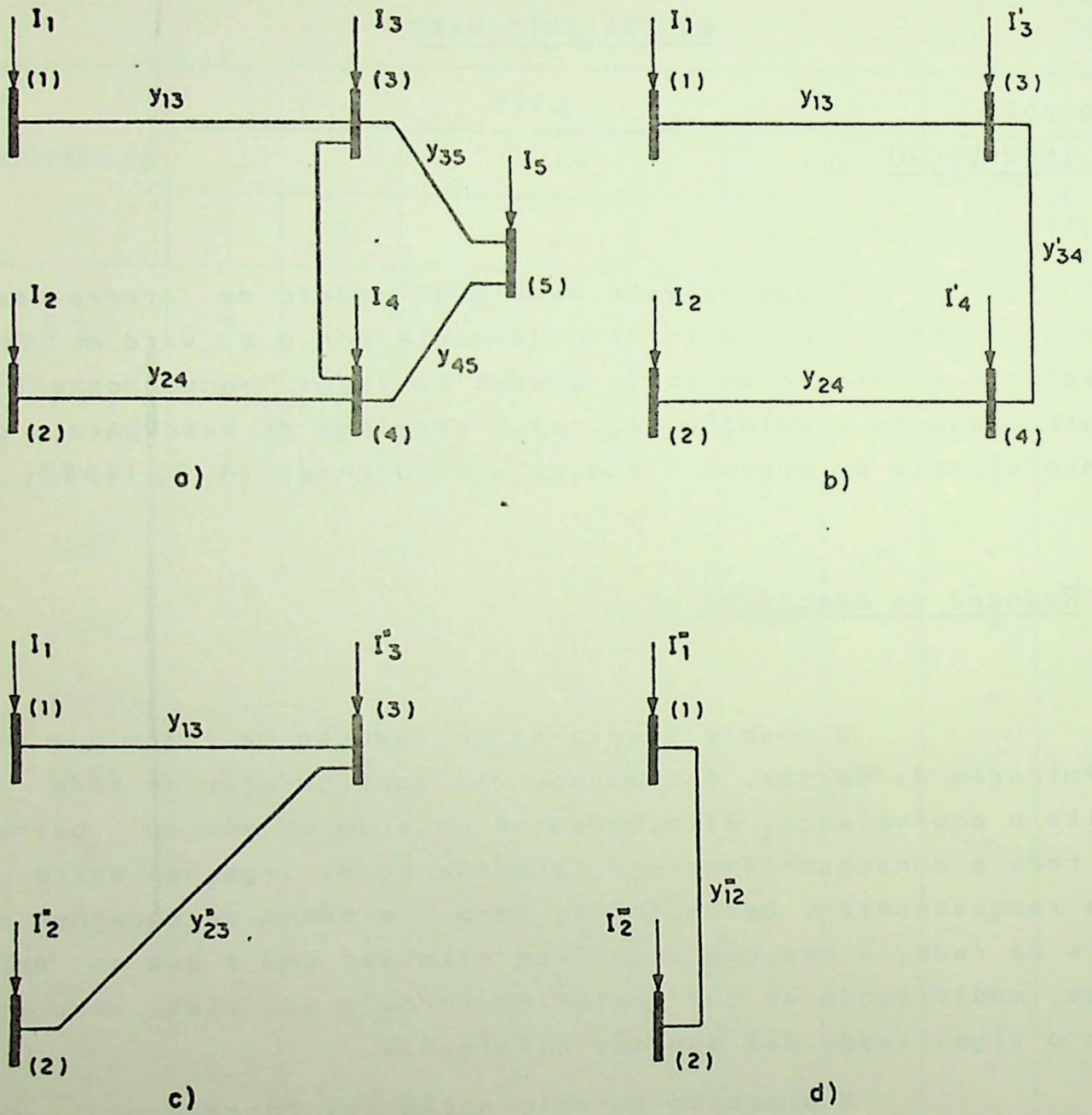


Fig. III. 1 - Sequência de obtenção do equivalente

O sistema de equações nodais acompanha a redução, sendo eliminadas as equações referentes às barras (3), (4) e (5).

O sistema completo, a que se refere a figura III.1.a, é dado em seguida, onde $Y_{ab} = Y_{ba}$:

$$1) \quad Y_{11} E_1 \quad + Y_{13} E_3 \quad = I_1$$

$$2) \quad Y_{22} E_2 \quad + Y_{24} E_4 \quad = I_2$$

$$3) \quad Y_{31} E_1 \quad + Y_{33} E_3 + Y_{34} E_4 + Y_{35} E_5 = I_3$$

$$4) \quad Y_{42} E_2 + Y_{43} E_3 + Y_{44} E_4 + Y_{45} E_5 = I_4$$

$$5) \quad Y_{53} E_3 + Y_{54} E_4 + Y_{55} E_5 = I_5$$

A eliminação do nó (5) modifica a ligação entre (3) e (4), conforme figura II.1.b. No sistema de equações nodais isto é feito retirando-se o valor de E_5 da equação 5 e substituindo-se nas equações 3 e 4, onde ele também aparece. O sistema fica:

$$1) \quad Y_{11} E_1 \quad + Y_{13} E_3 \quad = I_1$$

$$2) \quad Y_{22} E_2 \quad + Y_{24} E_4 \quad = I_2$$

$$3) \quad Y_{31} E_1 \quad + Y'_{33} E_3 + Y'_{34} E_4 \quad = I'_3$$

$$Y_{42} E_2 + Y'_{43} E_3 + Y'_{44} E_4 \quad = I'_4$$

Note-se que houveram modificações nas equações 3 e 4.

A eliminação do nó (4) é mostrada em seguida, de acordo com a figura III.1.c, onde se observa o aparecimento de uma nova ligação entre as barras (2) e (3). Tem-se portanto:

$$1) \quad Y_{11} E_1 + Y_{13} E_3 = I_1$$

$$2) \quad Y_{22}'' E_2 + Y_{23}'' E_3 = I_2''$$

$$3) \quad Y_{31} E_1 + Y_{32}'' E_2 + Y_{33}'' E_3 = I_3''$$

Finalmente, substituindo-se o valor de E_3 da equação 3 nas equações 1 e 2, tem-se o equivalente da figura III.1.d, dado por:

$$1) \quad Y_{11}''' E_1 + Y_{12}''' E_2 = I_1'''$$

$$2) \quad Y_{21}''' E_1 + Y_{22}''' E_2 = I_2'''$$

2. Variações no equivalente Ward

O equivalente Ward, usado para representar o sistema externo de um sistema elétrico de potência, pode apresentar características diferentes, conforme a modelagem das cargas e gerações externas [3, 17, 28, 29].

Um dos possíveis métodos para se modelar as cargas e gerações externas é através de linearização que permita obter as injeções de correntes I , do sistema externo, a partir dos valores da potência complexa S e da tensão complexa E .

Este método é chamado Ward com injeção de corrente ou Ward básico linear e pressupõe o conhecimento de S e E das barras de carga e geração do sistema externo ou de E das barras internas e fronteira.

Uma outra possibilidade é usar admitâncias fixas ligadas à "terra" para representar as cargas e gerações externas no modelo chamado Ward com admitância ou Ward com cargas passivas. Este modelo também implica no conhecimento da

potência complexa S e do módulo da tensão V em todas as barras de carga e geração do sistema externo, para que se possa determinar os valores das admitâncias.

O terceiro método é o que usa ajuste de injeções de potência na fronteira do sistema, no modelo Ward com ajuste na fronteira ou no aqui também designado Ward básico não linear.

Neste modelo desprezam-se as cargas e gerações do sistema externo e ajustam-se as injeções equivalentes pelos fluxos de potência nas linhas ligadas às barras fronteiras, incluindo-se as ligações do equivalente construído.

B. OBTENÇÃO DO EQUIVALENTE

A redução de circuito para obtenção do equivalente Ward pode ser simulada de uma forma sistemática, a partir da equação matricial do sistema, usando-se o processo de eliminação de Gauss [2, 14].

1. Eliminação de Gauss

O conjunto de equações nodais de um sistema elétrico de potência é representado, em forma matricial, por:

$$\underline{Y} \underline{E} = \underline{I}$$

onde: \underline{Y} - matriz de admitância nodal

\underline{E} - vetor de tensões complexas nas barras

\underline{I} - vetor de correntes complexas injetadas nas barras

Para a obtenção do circuito equivalente do sistema usa-se a matriz \underline{Y} , fazendo-se a eliminação das barras pe

1o método de Gauss.

Esta eliminação consiste em zerar todos os elementos da coluna referente à barra que se quer eliminar, exceto o elemento da diagonal principal. Após este procedimento abandona-se a linha e a coluna correspondentes à barra eliminada.

Repete-se a operação para todas as barras que se queira eliminar, restando no final a matriz de admitância, que inclui equivalente e sistema não reduzido.

2. Aplicação da eliminação

A figura III.2 mostra uma rede onde, como exemplo, se irá substituir o sistema externo por um equivalente.

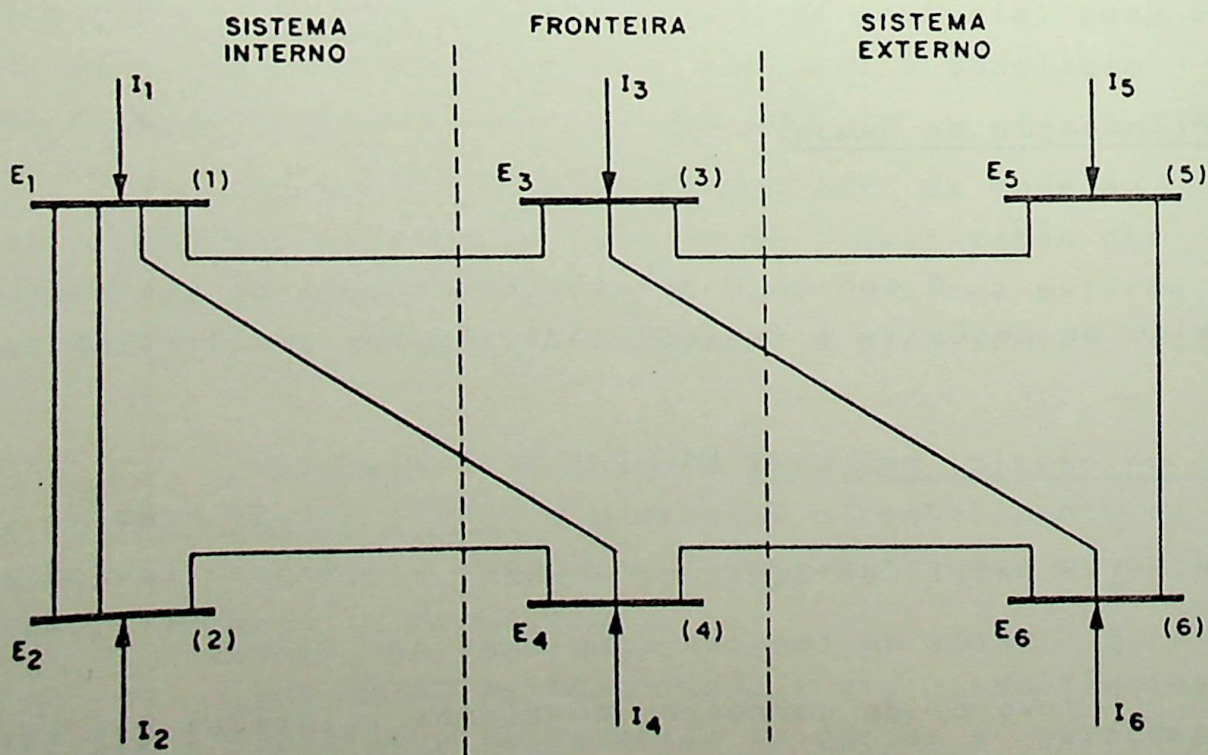


Fig. III.2 - Sistema para obtenção do equivalente

A equação nodal do sistema, dividida em sistema interno, fronteira e sistema externo, é dada por:

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
I_1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}			E_1 (1)
I_2	Y_{21}	Y_{22}		Y_{24}			E_2 (2)
I_3	Y_{31}		Y_{33}		Y_{35}	Y_{36}	E_3 (3)
I_4	Y_{41}	Y_{42}		Y_{44}		Y_{46}	E_4 (4)
I_5			Y_{53}		Y_{55}	Y_{56}	E_5 (5)
I_6			Y_{63}	Y_{64}	Y_{65}	Y_{66}	E_6 (6)

A redução é feita eliminando-se inicialmente a barra (6). Para isto deve-se zerar os elementos 36, 46 e 56.

Divide-se a 6.^a linha da equação por Y_{66} e substitue-se a 5.^a linha pela 5.^a menos a 6.^a multiplicada por Y_{56} , a 4.^a linha pela 4.^a menos a 6.^a multiplicada por Y_{46} e a 3.^a linha pela 3.^a menos a 6.^a multiplicada por Y_{36} como indicado:

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
I_1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}			E_1 (1)
I_2	Y_{21}	Y_{22}		Y_{24}			E_2 (2)
I_3'	Y_{31}		Y'_{33}	Y'_{34}	Y'_{35}		E_3 (3)
I_4'	Y_{41}	Y_{42}	Y'_{43}	Y'_{44}	Y'_{45}		E_4 (4)
I_5'			Y'_{53}	Y'_{54}	Y'_{55}		E_5 (5)
I_6'			Y'_{63}	Y'_{64}	Y'_{65}	1	E_6 (6)

onde:

$$Y'_{33} = Y_{33} - Y_{36} \frac{Y_{63}}{Y_{66}} \quad Y'_{34} = - Y_{36} \frac{Y_{64}}{Y_{66}}$$

$$Y'_{35} = Y_{35} - Y_{36} \frac{Y_{65}}{Y_{66}} \quad Y'_{43} = - Y_{46} \frac{Y_{63}}{Y_{66}}$$

$$Y'_{44} = Y_{44} - Y_{46} \frac{Y_{64}}{Y_{66}} \quad Y'_{45} = - Y_{46} \frac{Y_{65}}{Y_{66}}$$

$$Y'_{53} = Y_{53} - Y_{56} \frac{Y_{63}}{Y_{66}} \quad Y'_{54} = - Y_{56} \frac{Y_{64}}{Y_{66}}$$

$$Y'_{55} = Y_{55} - Y_{56} \frac{Y_{65}}{Y_{66}} \quad Y'_{63} = \frac{Y_{63}}{Y_{66}}$$

$$Y'_{64} = \frac{Y_{64}}{Y_{66}} \quad Y'_{65} = \frac{Y_{65}}{Y_{66}}$$

$$I'_3 = I_3 - I_6 \frac{Y_{36}}{Y_{66}} \quad I'_4 = I_4 - I_6 \frac{Y_{46}}{Y_{66}}$$

$$I'_5 = I_5 - I_6 \frac{Y_{56}}{Y_{66}} \quad I'_6 = \frac{I_6}{Y_{66}}$$

Note-se que também mudaram as injeções de corrente.

A barra (6) foi eliminada e pode-se abandonar a 6.^a linha e a 6.^a coluna da matriz \underline{Y} e conseqüentemente a 6.^a linha dos vetores \underline{E} e \underline{I} .

A segunda e última barra a ser eliminada é a (5) e portanto deve-se zerar os elementos 35 e 45.

Repete-se o mesmo procedimento anterior, dividindo-se a 5.^a linha por Y'_{55} e substituindo-se a 4.^a linha pela 4.^a menos a 5.^a multiplicada por Y'_{45} e a 3.^a pela 3.^a menos a 5.^a

multiplicada por Y'_{35} , ficando:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline \end{array} \\
 \begin{array}{|c|} \hline I_2 \\ \hline \end{array} \\
 \begin{array}{|c|} \hline I''_3 \\ \hline \end{array} \\
 \begin{array}{|c|} \hline I''_4 \\ \hline \end{array} \\
 \begin{array}{|c|} \hline I''_5 \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline (1) & (2) & (3) & (4) & (5) \\ \hline Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & \\ \hline Y_{21} & Y_{22} & & Y_{24} & \\ \hline Y_{31} & & Y''_{33} & Y''_{34} & \\ \hline Y_{41} & Y_{42} & Y''_{43} & Y''_{44} & \\ \hline & & Y''_{53} & Y''_{54} & 1 \\ \hline \end{array} \\
 \begin{array}{|c|} \hline E_1 \\ \hline \end{array} (1) \\
 \begin{array}{|c|} \hline E_2 \\ \hline \end{array} (2) \\
 \begin{array}{|c|} \hline E_3 \\ \hline \end{array} (3) \\
 \begin{array}{|c|} \hline E_4 \\ \hline \end{array} (4) \\
 \begin{array}{|c|} \hline E_5 \\ \hline \end{array} (5)
 \end{array}$$

onde:

$$Y''_{33} = Y'_{33} - Y'_{35} \frac{Y'_{53}}{Y'_{55}} \quad Y''_{34} = Y'_{34} - Y'_{35} \frac{Y'_{54}}{Y'_{55}}$$

$$Y''_{43} = Y'_{43} - Y'_{45} \frac{Y'_{53}}{Y'_{55}} \quad Y''_{44} = Y'_{44} - Y'_{45} \frac{Y'_{54}}{Y'_{55}}$$

$$Y''_{53} = \frac{Y'_{53}}{Y'_{55}} \quad Y''_{54} = \frac{Y'_{54}}{Y'_{55}}$$

$$I''_3 = I'_3 - I'_5 \frac{Y'_{35}}{Y'_{55}} \quad I''_4 = I'_4 - I'_5 \frac{Y'_{45}}{Y'_{55}}$$

$$I''_5 = \frac{I'_5}{Y'_{55}}$$

Eliminando a 6.^a linha e a 6.^a coluna de \underline{Y} e a 6.^a linha de \underline{I} e \underline{E} , vem a equação final do sistema reduzido:

$$\begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline I_2 \\ \hline I_3'' \\ \hline I_4'' \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & E_1 \\ \hline Y_{21} & Y_{22} & & Y_{24} & E_2 \\ \hline Y_{31} & & Y_{33}'' & Y_{34}'' & E_1 \\ \hline Y_{41} & Y_{42} & Y_{43}'' & Y_{44}'' & E_4 \\ \hline \end{array}$$

Note-se que a parte referente ao sistema interno não sofre alterações, permitindo que se trabalhe somente com o sistema externo mais fronteira.

A figura III.3 mostra o sistema reduzido.

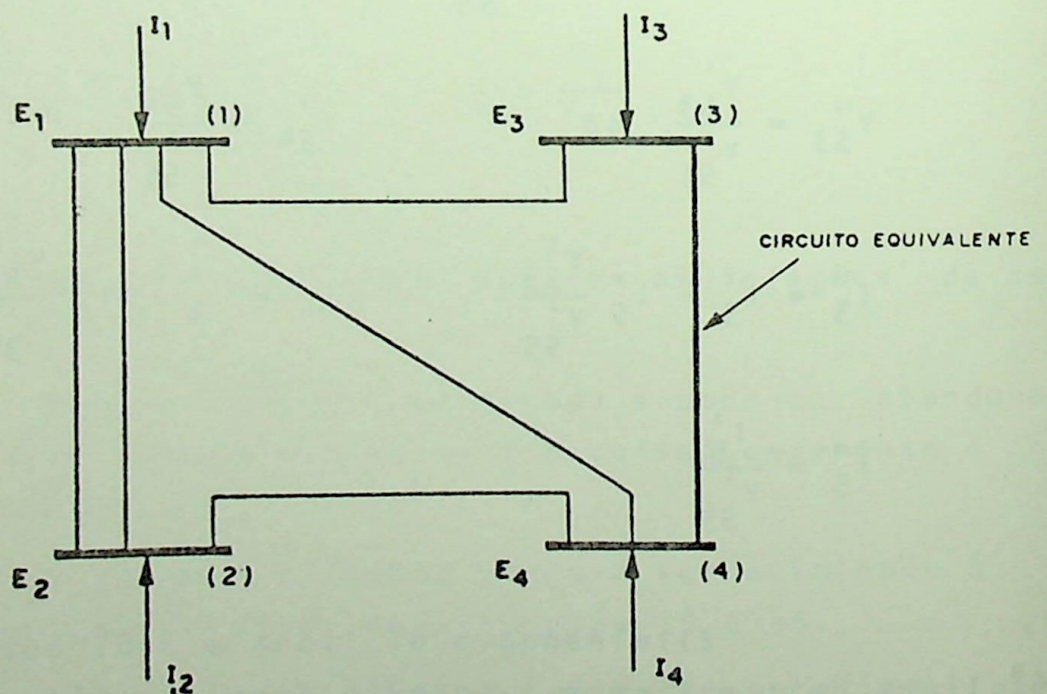


Fig. III.3 - Sistema com equivalente

5. Representação esquemática do equivalente

Em termos esquemáticos pode-se representar a eliminação, pelo método de Gauss, como:

$$\begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline I_F \\ \hline I_E \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{II} & Y_{IF} & \\ \hline Y_{FI} & Y_{FF} & Y_{FE} \\ \hline & Y_{EF} & Y_{EE} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline E_1 \\ \hline E_F \\ \hline E_E \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array} \quad (III.1)$$

com os seguintes significados para os índices:

- I - sistema interno
- F - fronteira
- E - sistema externo
- II - ligação interno-interno
- IF - ligação interno-fronteira
- FE - ligação fronteira-externo
- EE - ligação externo-externo

A eliminação significa zerar a coluna da parte externa, exceto a diagonal principal, dividindo a 3.^a linha por Y_{EE} , fazendo a 2.^a linha igual a ela mesma menos a 3.^a multiplicada por Y_{FE} e abandonando a 3.^a linha e coluna. O resultado é:

$$\begin{array}{|c|} \hline I_I \\ \hline I_F \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline Y_{II} & Y_{IF} \\ \hline Y_{FI} & Y_{FF} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline E_I \\ \hline E_F \\ \hline \end{array} \quad (111.2)$$

onde:

$$Y_{FF}' = Y_{FF} - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} Y_{EF} = Y_{FF}^{eq}$$

$$I_F' = I_F - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} I_E = I_F^{eq}$$

A matriz de admitância equivalente Y_{FF}^{eq} é a que contém as admitâncias do equivalente e o vetor de injeções equivalentes I_F^{eq} contém as injeções equivalentes nas barras da fronteira.

O vetor de injeções equivalentes também pode ser retirado da equação (111.2), ficando os valores equivalentes dados pelas equações:

$$Y_{FF}^{eq} = Y_{FF} - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} Y_{EF} \quad (111.3)$$

$$I_F^{eq} = Y_{FI} E_I + Y_{FF}^{eq} E_F \quad (111.4)$$

ou

$$I_F^{eq} = I_F - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} I_E \quad (111.5)$$

4. Redução de Kron

A redução de Kron é um método usado para eliminação de variáveis em um sistema de equações, resultante do próprio princípio da substituição |30|.

Considere-se como exemplo a equação (III.6) onde se deseja eliminar a variável X_3 :

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A_{11} & A_{12} & \\ \hline A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \hline & A_{32} & A_{33} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline X_1 \\ \hline X_2 \\ \hline X_3 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline b_1 \\ \hline b_2 \\ \hline b_3 \\ \hline \end{array} \quad (\text{III.6})$$

Separando-se as equações, vem:

$$A_{11} X_1 + A_{12} X_2 = b_1$$

$$A_{21} X_1 + A_{22} X_2 + A_{23} X_3 = b_2$$

$$A_{32} X_2 + A_{33} X_3 = b_3$$

Tirando-se o valor de X_3 da última equação e substituindo-se nas 2 primeiras vem:

$$A_{11} X_1 + A_{12} X_2 = b_1$$

$$A_{21} X_1 + \left(A_{22} - \frac{A_{23} A_{32}}{A_{33}} \right) X_2 = b_2 - \frac{b_3 A_{23}}{A_{33}}$$

Em termos matriciais fica-se com:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} & A_{22} - \frac{A_{23} A_{32}}{A_{33}} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline X_1 \\ \hline X_2 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline b_1 \\ \hline b_2 - \frac{b_3 A_{23}}{A_{33}} \\ \hline \end{array}$$

A redução de Kron é aplicada diretamente como indicado:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A_{11} & A_{12} & \\ \hline A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \hline & A_{32} & A_{33} \\ \hline \end{array} \rightarrow \begin{array}{|c|c|} \hline A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} & A_{22} - \frac{A_{23} A_{32}}{A_{33}} \\ \hline \end{array}$$

Assim para se eliminar a variável X_n , que corresponde a enésima coluna e linha, basta reescrever a matriz substituindo cada elemento A_{ij} por A'_{ij} dado por:

$$A'_{ij} = A_{ij} - \frac{A_{in} A_{nj}}{A_{nn}}$$

A redução de Kron pode ser aplicada às equações de um sistema elétrico de potência, quando da eliminação de barras para obtenção do equivalente Ward.

Considere-se agora a mesma equação (III.6) como representativa de um sistema elétrico de potência, onde a matriz \underline{A} será a matriz de admitância, e do qual se deseja eliminar a barra (3). Aplicando-se o método de eliminação de Gauss tem-se:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} & A'_{22} \\ \hline \end{array}$$

onde:

$$A'_{22} = A_{22} - \frac{A_{23} A_{32}}{A_{33}}$$

O resultado é exatamente igual ao da redução de Kron, ou seja, redução de Kron e eliminação de Gauss se e quivalem quanto ao produto final, diferindo quanto a metodologia de cálculo.

Note-se que a redução de Kron também pode ser aplicada a toda uma submatriz como:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A_{11} & A_{12} & \\ \hline A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \hline & A_{32} & A_{33} \\ \hline \end{array} \rightarrow \begin{array}{|c|c|} \hline A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} & A'_{22} \\ \hline \end{array}$$

com:
$$A'_{22} = A_{22} - A_{23} A_{33}^{-1} A_{32}$$

Os dois métodos quando otimizados apresentam praticamente o mesmo desempenho computacional.

C. ANÁLISE DOS EQUIVALENTES WARD

Cada modelo ou método de equivalente Ward apresenta características próprias no que diz respeito à sua obtenção e aplicação. Isto implica em diferenças na utilidade destes modelos [3, 14, 28, 29].

1. Método Ward com injeção

Neste método substituem-se as cargas e gerações do sistema externo por injeções de corrente, ou seja, ajustam-se as variáveis através de uma linearização em torno

do ponto de operação. Dai poder-se dizer que este é um Ward básico linear.

Para o sistema externo tem-se:

$$I_E = - \frac{S_E^*}{E_E^*} \quad \text{com} \quad S_E = S_G - S_C$$

onde:

S_E^* - conjugado da potência injetada em uma barra externa

E_E^* - conjugado da tensão de uma barra externa

S_G - potência gerada em uma barra

S_C - potência consumida em uma barra

As correntes externas assim obtidas entram no processo de redução do sistema e compõem-se com as correntes injetadas nas barras fronteiras dando as injeções equivalentes, tal como mostrado no item III.B.2.

As injeções equivalentes nas barras fronteiras são facilmente convertidas em potências com o uso das tensões complexas E_F das barras fronteiras.

As equações (III.3) e (III.4) transcritas abaixo, representam o modelo Ward com injeção conforme mostra a figura III.4.

$$Y_{FF}^{eq} = Y_{FF} - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} Y_{EF} \quad (III.7)$$

$$I_F^{eq} = Y_{FI} E_I + Y_{FF}^{eq} E_F \quad (III.8)$$

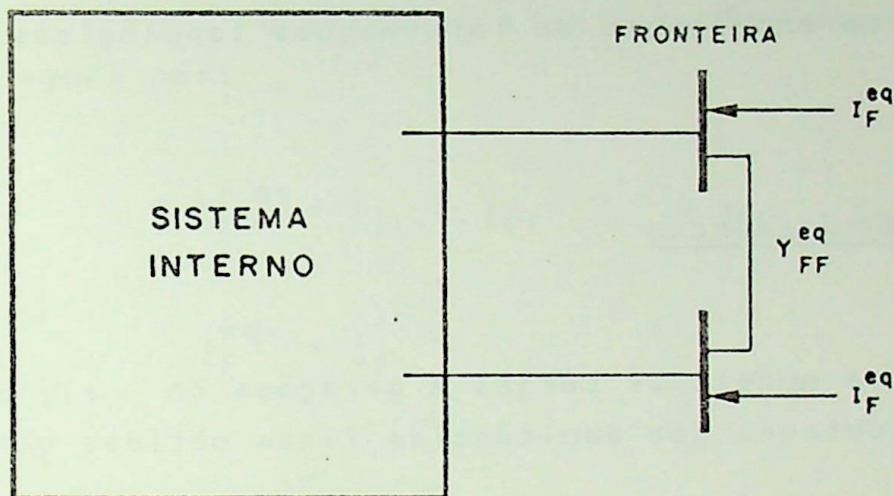


Fig. III. 4 - Ward com injeção de corrente

Note-se que as ligações resultantes da redução $(-Y_{FE} \quad Y_{EE}^{-1} \quad Y_{EF})$ compõem-se com as ligações pré-existentes na fronteira (Y_{FF}) dando o circuito equivalente. O mesmo raciocínio pode ser feito em relação às correntes onde as injeções resultantes da redução $(-Y_{FE} \quad Y_{EE}^{-1} \quad I_E)$ compõem-se com as pré-existentes (I_F) de acordo com a equação (III.5):

$$I_F^{eq} = I_F - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} I_E \quad (III.9)$$

Este modelo tem como principal característica a, já citada linearização ao se substituir as cargas e gerações por injeções de corrente, fazendo com que, não seja um método exato. É um método que pode ser usado em planejamento quando se tem acesso a todo o sistema, usando as equações (III.7) e (III.9), embora na realidade não tenha necessidade

de informações das variáveis de estado do sistema externo, bastando usar as equações (III.7) e (III.8) desde que se tenha informações das tensões complexas do sistema interno e fronteira. Necessita entretanto de informações topológicas do sistema externo.

2. Método Ward com admitância

Neste modelo as cargas e gerações do sistema externo são representadas por admitâncias fixas obtidas por:

$$Y_E = - \frac{S_E^*}{V_E}$$

onde:

V_E - módulo da tensão de uma barra externa

Y_E - admitância "shunt" que substitue a carga ou geração em uma barra externa

Note-se que no caso de um gerador ter-se-á uma "admitância negativa" e no caso de uma carga uma admitância positiva.

Assim o sistema externo deixa de ter cargas ou gerações, substituídas por admitâncias "shunt", ficando $I_E = 0$ e somando-se estas mesmas admitâncias aos elementos da diagonal de Y_{EE} , conforme indicado:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline I_I \\ \hline \\ \hline I_F \\ \hline \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline (1) & (2) & (3) \\ \hline Y_{II} & Y_{IF} & \\ \hline Y_{FI} & Y_{FF} & \\ \hline & Y_{EF} & Y_{EE} + Y_E \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline E_I \\ \hline E_F \\ \hline E_E \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}
 \end{array}$$

onde:

\underline{y}_E - matriz diagonal formada com os elementos y_E

O circuito e as injeções equivalentes são dados agora por:

$$\underline{Y}_{FF}^{A eq} = \underline{Y}_{FF} - \underline{Y}_{FE} \underline{Y}_{EE} + \underline{y}_E^{-1} \underline{Y}_{EF}$$

$$\underline{I}_F^{eq} = \underline{I}_F$$

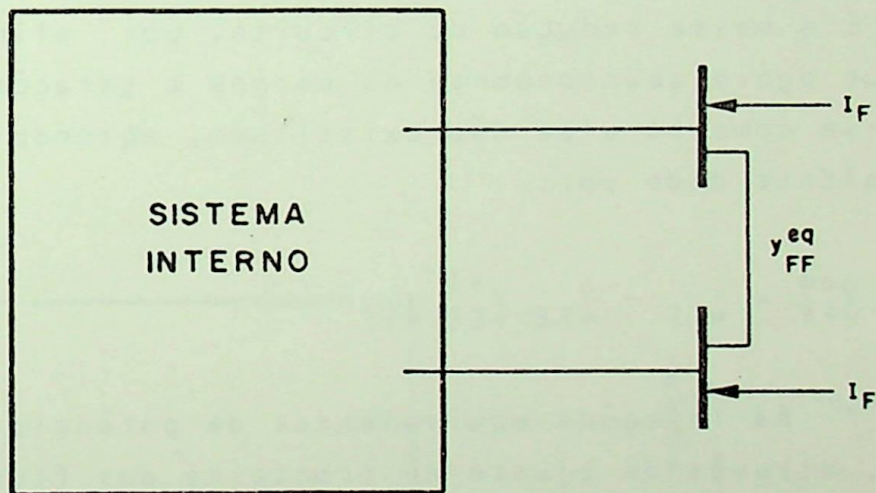


Fig. III. 5 - Ward com admitância

A figura III.5 mostra o circuito reduzido neste método.

É interessante notar que as admitâncias usadas

nas cargas e gerações externas aparecem, após a redução como admitâncias "shunt" nas barras fronteiras.

Neste método necessita-se conhecer do sistema externo, além da topologia, a potência complexa e o módulo da tensão em cada barra para se poder determinar os valores das admitâncias "shunt".

3. Método Ward com ajuste na fronteira

Este é na realidade um método com injeção com pequena variação no cálculo das injeções equivalentes, não se usando aqui nenhuma linearização, sendo portanto um Ward básico não linear.

Desta forma o procedimento para a obtenção do equivalente é a mesma redução de circuito, por eliminação de Gauss, só que agora abandonam-se as cargas e gerações externas, agindo-se como se elas não existissem, obtendo-se o circuito equivalente dado por:

$$Y_{FF}^{eq} = Y_{FF} - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} Y_{EF}$$

As injeções equivalentes de potência são obtidas à parte, através de ajuste na fronteira dos fluxos de potência ativa e reativa de todas as linhas ligadas às barras fronteiras, incluindo-se linhas de interligação, linhas pré-existentes na fronteira e circuito equivalente.

O cálculo das injeções pode ser feito pelas equações:

$$P_f^{eq} = V_f^0 \sum_{k \in f} V_k^0 (G_{fk} \cos \theta_{fk}^0 + B_{fk} \sin \theta_{fk}^0) \quad (III.10)$$

$$Q_f^{eq} = V_f^0 \sum_{k \in f} V_k^0 (G_{fk} \sin \theta_{fk}^0 - B_{fk} \cos \theta_{fk}^0) \quad (III.11)$$

onde:

- G_{fk} - parte real do elemento fk da matriz Y reduzida
- B_{fk} - parte imaginária do elemento fk da matriz Y reduzida
- V_f^0 - módulo da tensão no caso básico, da barra fronteira f
- θ_{fk}^0 - diferença entre os ângulos das tensões das barras f e k ($f - k$), no caso base
- $k \in f$ - conjuntos de barras ligadas a barra f , incluindo o caso $k = f$
- f - barra de fronteira

O equivalente completo é o mostrado na figura III.6.

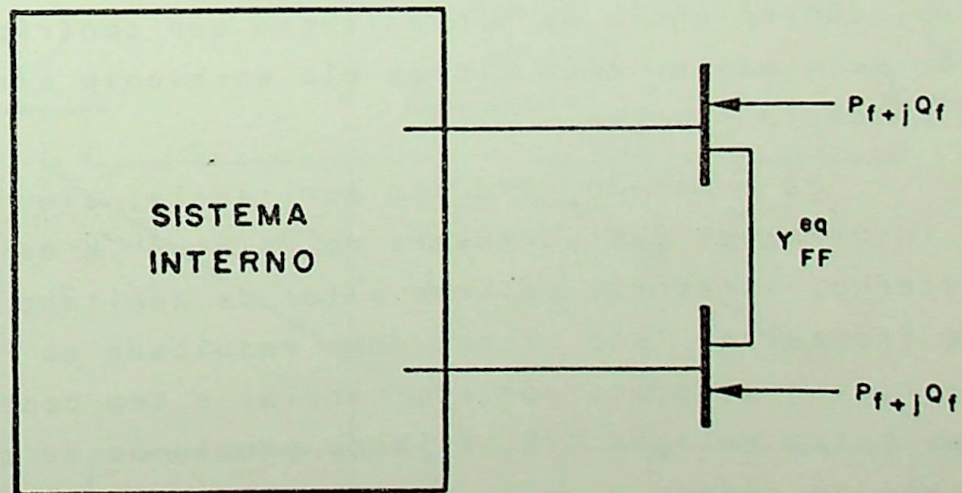


Fig. III.6 - Ward com ajuste na fronteira

Este método necessita do estado da fronteira, ou seja, os módulos e ângulos das tensões nas barras fronteiras, para se calcular as injeções equivalentes na fronteira e também da topologia do sistema externo.

Com estas condições pode-se aplicar a estudos de planejamento, quando se tem disponível um fluxo de carga do caso base de todo o sistema. Também pode-se usá-lo em aplicações "on-line", obtendo-se o estado da fronteira pelo estimador de estado, não sendo necessário obtenção de dados do sistema externo, com exceção dos dados topológicos que podem ser obtidos "off-line". Além disso, o método apresenta vantagens tais como, um equivalente ajustado às condições básicas do sistema, a compensação de erros de modelagem da rede externa para o caso básico, via injeções na fronteira, e ainda possibilidade de se atualizar injeções para um novo estado estimado | 3, 29 |.

4. Comparação entre os métodos

O primeiro método apresentado, Ward com injeção, tem a inconveniência da linearização que contribui para que ele não seja exato. Além disso, ele apresenta erros nos fluxos de potência reativa.

Já o método Ward com admitância, além da necessidade de informações das variáveis de "status" e estado do sistema externo, apresenta valores altos de admitância "shunt" nas barras fronteiras. Isto ocorre como resultado da representação de cargas e gerações por admitâncias e tem como consequência uma baixa relação X/R, criando problemas de convergência em fluxos de carga.

O Ward básico não linear é o que mostra as melhores características entre os apresentados, embora também traga erros nos fluxos de potência reativa. Por outro lado, em operações "on-line", ele só necessita de informações topológicas do sistema externo além de ter as vantagens apontadas

no item anterior. Também apresenta boa relação X/R.

D. APLICAÇÃO DO WARD COM AJUSTE NA FRONTEIRA

A simplicidade do método Ward com ajuste na fronteira, aliada às boas respostas nos fluxos de ativos, a possibilidade de aplicações "on-line" e ainda a perspectiva de melhorar seu comportamento em relação aos fluxos de reativos, justificam um estudo mais detalhado de sua aplicação com um exemplo de cálculo.

1. Dados para o equivalente

Considere-se o sistema elétrico de potência da figura III.7, cujos dados apresentam-se nas tabelas III.1 e III.2.

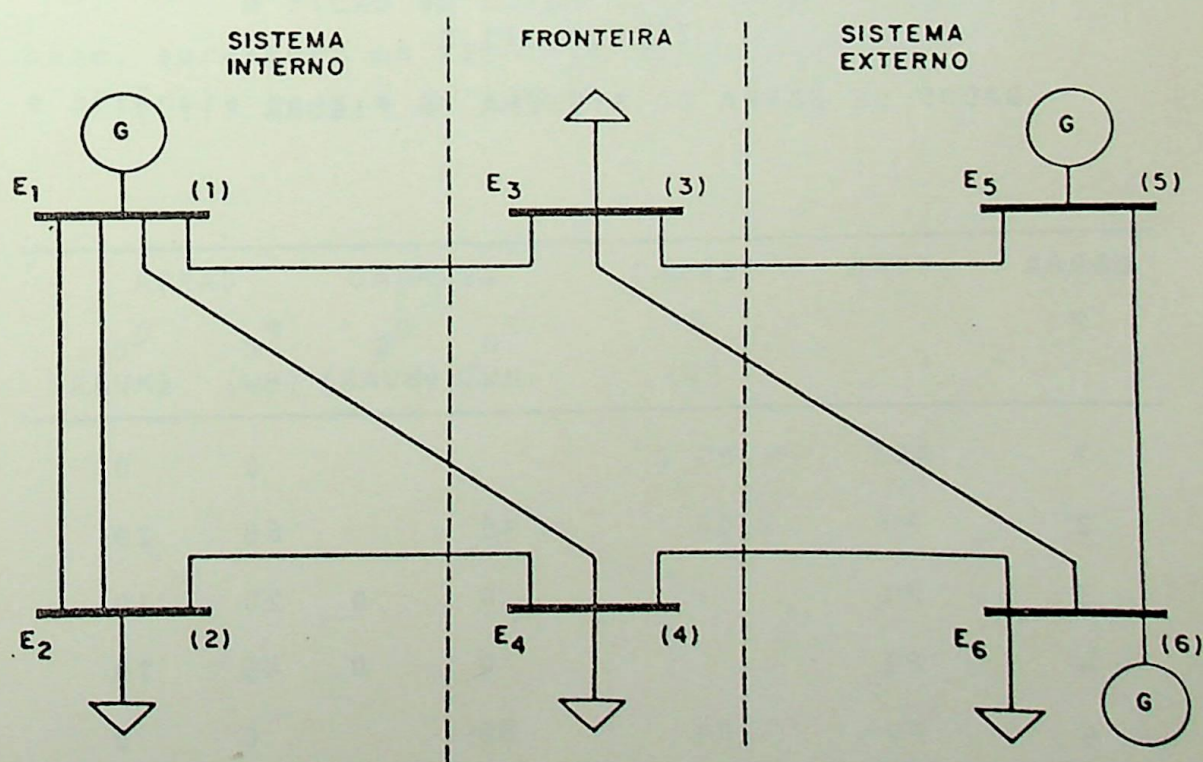


Fig. III.7 - Sistema para cálculo do equivalente

TABELA III.1
DADOS DE LINHA DO SISTEMA DA FIGURA III.7

LINHA P-q	IMPEDÂNCIA z_{pq}	SUSCEPTÂNCIA CAPACITIVA $b_{pq}/2$
1 - 2 (1)	0,020+j0,060	0,030
1 - 2 (2)	0,020+j0,060	0,030
1 - 3	0,060+j0,180	0,020
1 - 4	0,060+j0,180	0,020
2 - 4	0,030+j0,090	0,025
3 - 5	0,080+j0,240	0,030
3 - 6	0,080+j0,240	0,030
4 - 6	0,070+j0,210	0,015
5 - 6	0,050+j0,150	0,010

TABELA III.2
DADOS DE BARRA DO SISTEMA DA FIGURA III.7

BARRA P	TIPO	TENSÃO	GERAÇÃO		CARGA	
		E (V)	P_G (MW)	Q_G (MVAR)	P_C (MW)	Q_C (MVAR)
1	REF	1,06 0°			0	0
2	PV	1,00	30		60	20
3	PQ		0	0	20	10
4	PQ		0	0	45	20
5	PV	1,04	80		0	0
6	PQ		0	0	40	15

O perfil de tensões, os fluxos nas linhas e a matriz de admitância nodal \underline{Y} , quando se tem acesso a todo o sistema, como em aplicações tipo planejamento, são obtidos de forma direta, ou seja, a matriz \underline{Y} é montada diretamente e as tensões e fluxos são obtidos através de um fluxo de carga para o caso base. Com estes dados, obtêm-se facilmente as injeções equivalentes de potência nas barras fronteiras, processando-se um fluxo de carga para todo o sistema, no caso base, mas com a parte externa reduzida, considerando-se temporariamente as barras fronteiras como do tipo folga ("slack") ou então através da somatória dos fluxos de potência nas linhas ligadas à cada barra fronteira, incluindo-se as ligações do circuito equivalente, cujos fluxos podem ser calculados.

Nas aplicações "on-line" as tensões e fluxos do sistema interno e fronteira podem ser obtidos via estimador de estado, enquanto a topologia do sistema externo, que implica na matriz \underline{Y} , pode ser obtida por vias que não em tempo real, e as injeções de potência equivalentes são calculadas de forma idêntica a anterior [2, 6, 14, 29].

O fluxo de carga do sistema completo, para o caso base, apresenta os resultados das tabelas III.3 e III.4, onde a potência base é de 100 MVA.

TABELA III.3

PERFIL DE TENSÕES E GERAÇÕES DAS BARRAS PV E REFERÊNCIA

BARRA P	TENSÃO		GERAÇÃO	
	E (V)		P_G (MW)	Q_G (MVAR)
1	1,0600	0,0000°	61,6496	228,9352
2	1,0000	0,2536°	30,0000	-183,3076
3	1,0330	0,9758°		
4	1,0045	-0,7354°		
5	1,0400	4,9178°	80,0000	-5,5123
6	1,0117	0,8659°		

TABELA III.4

FLUXOS NAS LINHAS

LINHA (p-q)	FLUXO (S_{pq})	LINHA (q-p)	FLUXO (S_{qp})
1 - 2 (1)	0,2477+j0,9441	2 - 1 (1)	-0,2296-j0,9534
1 - 2 (2)	0,2477+j0,9441	2 - 1 (1)	-0,2296-j0,9534
1 - 3	-0,0451+j0,1531	3 - 1	0,0468-j0,1916
1 - 4	0,1666+j0,2497	4 - 1	-0,1612-j0,2760
2 - 4	0,1591-j0,1257	4 - 2	-0,1580+j0,0787
3 - 5	-0,2770+j0,0567	5 - 3	0,2833-j0,1019
3 - 6	0,0350+j0,0481	6 - 3	-0,0345-j0,1091
4 - 6	-0,1314-j0,0036	6 - 4	0,1326-j0,0233
5 - 6	0,5006+j0,0098	6 - 5	-0,4889+j0,0043

A matriz \underline{Y} é dada em seguida:

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
(1)	13,3333 -j39,9000	-10,0000 +j30,0000	-1,6667 +j5,0000	-1,6667 +j5,0000		
(2)	-10,0000 +j30,0000	13,3333 -j39,9150		-3,3333 +j10,0000		
(3)	-1,6667 +j5,0000		4,1667 -j12,4200		-1,2500 +j3,7500	-1,2500 +j3,7500
(4)	-1,6667 +j5,0000	-3,3333 +j10,0000		6,4286 -j19,2257		-1,4286 +j4,2857
(5)			-1,2500 +j3,7500		3,2500 -j9,7100	-2,0000 +j6,0000
(6)			-1,2500 +j3,7500	-1,4286 +j4,2857	-2,0000 +j6,0000	4,6786 -j13,9807

2. Cálculo do equivalente

O primeiro passo para o cálculo do equivalente é a aplicação da eliminação de Gauss para obtenção do circuito equivalente. A eliminação é feita exclusivamente na matriz \underline{Y} , não se aplicando ao vetor de correntes.

A primeira barra a ser eliminada é (6) e o procedimento é o mesmo do item III.B.2, dando como resultado:

$$\underline{Y}' =$$

	(3)	(4)	(5)	(6)
(3)	3,8327 -j11,4142	0,3817 +j1,1495	-1,7844 +j5,3593	
(4)	-0,3817 +j1,1495	5,9924 -j17,9119	-0,6105 +j1,8392	
(5)	-1,7844 +j5,3593	-0,6105 +j1,8392	2,3950 -j7,1350	
(6)	-0,2681 +j0,0003	-0,3064 +j0,0004	-0,4290 +j0,0005	1,0000 +j0,0000

Note-se que as linhas e colunas referentes às barras (1) e (2), sistema interno, não são afetadas, não sendo necessária sua inclusão no processo de redução. Também pode-se notar que a matriz a ser reduzida pode ser composta unicamente do sistema externo e de suas ligações com a fronteira, sendo depois da redução acrescentadas toda a parte retida, ou seja, as ligações entre barras fronteiras, o sistema interno e suas ligações com a fronteira.

A eliminação da barra (5) é feita da mesma maneira, dando:

$$\underline{Y}'' =$$

	(3)	(4)	(5)	(6)
(3)	2,5035 -j7,3886	-0,8366 +j2,5311		
(4)	-0,8366 +j2,5311	5,8367 -j17,4378		
(5)	-0,7505 +j0,0018	-0,2575 +j0,0008	1,0000 +j0,0000	
(6)	-0,2681 +j0,0003	-0,3064 +j0,0004	-0,4290 +j0,0005	1,0000 +j0,0000

O circuito equivalente será dado por:

$$\underline{Y}_{FF}^{eq} =$$

	(3)	(4)
(3)	2,5035 -j7,3886	-0,8366 +j2,5311
(4)	-0,8366 +j2,5311	5,8367 -j17,4378

A ligação equivalente entre as barras (3) e (4) é tirada da matriz \underline{Y}_{FF}^{eq} e poderá ser usada para o cálculo das injeções equivalentes de potência. Seu valor é:

$$Y_{34} = 0,8366 - j2,5311 \quad \therefore \quad G_{34} = -0,8366$$

$$B_{34} = 2,5311$$

A matriz de admitância do sistema interno mais fronteira, já incluindo a redução, é dada por:

	(1)	(2)	(3)	(4)
(1)	13,3333 -j39,9000	-10,0000 +j30,0000	-1,6667 +j5,0000	-1,6667 +j5,0000
(2)	-10,0000 +j30,0000	13,3333 -j39,9150		-3,3333 +j10,0000
(3)	-1,6667 +j5,0000		2,5035 -j7,3886	-0,8366 +j2,5311
(4)	-1,6667 +j5,0000	-3,3333 +j10,0000	-0,8366 +j2,5311	5,8367 +j17,4378

O próximo passo é o cálculo das injeções equivalentes de potência usando-se as equações (III.10) e (III.11) que aqui ficarão:

$$P_3^{eq} = V_3^0 \sum_{k=1}^4 V_k^0 (G_{3k} \cos \theta_{3k}^0 + B_{3k} \sin \theta_{3k}^0)$$

$$Q_3^{eq} = V_3^0 \sum_{k=1}^4 V_k^0 (G_{3k} \sin \theta_{3k}^0 - B_{3k} \cos \theta_{3k}^0)$$

$$P_4^{eq} = V_4^0 \sum_{k=1}^4 V_k^0 (G_{4k} \cos \theta_{4k}^0 + B_{4k} \sin \theta_{4k}^0)$$

$$Q_4^{eq} = V_4^0 \sum_{k=1}^4 V_k^0 (G_{4k} \sin \theta_{4k}^0 - B_{4k} \cos \theta_{4k}^0)$$

Com os dados das tabelas III.3 e III.4 obtêm-se os valores:

$$P_3^{eq} = 0,1507 \text{ pu} \quad Q_3^{eq} = -0,2720 \text{ pu}$$

$$P_4^{eq} = -0,4208 \text{ pu} \quad Q_4^{eq} = -0,2905 \text{ pu}$$

$$S_3 = (0,1507 - j0,2720) \text{ pu} \quad S_4 = (-0,4208 - j0,2905) \text{ pu}$$

Tem-se então o equivalente completo dado na figura III.8:

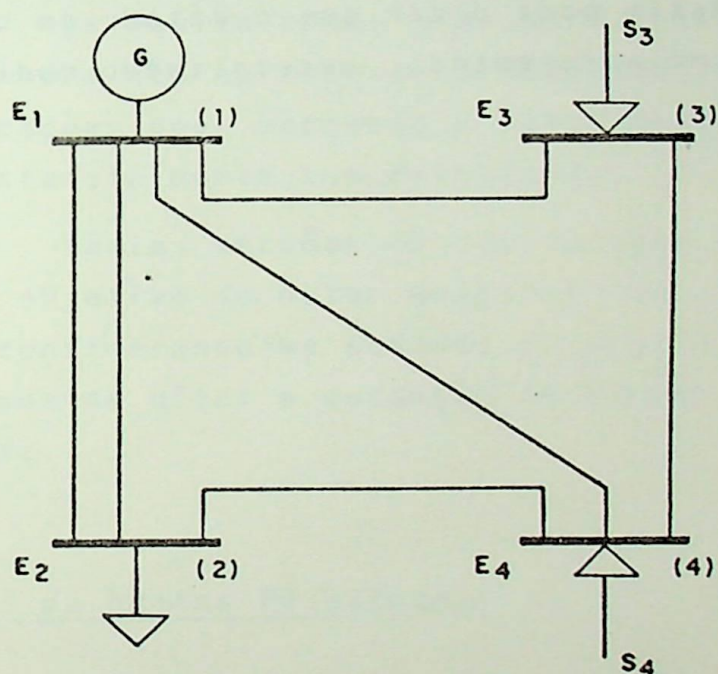


Fig. III.8 - Sistema com equivalente

3. Avaliação do desempenho

O equivalente Ward com ajuste na fronteira em bora apresenta uma série de boas características, como as citadas nos itens III.C.3 e 4, apresenta também algumas limitações.

Destas pode-se destacar as causadas pela elimi

nação das barras PV externas as quais, ao contrário da eliminação das PQ, introduzem erros consideráveis, principalmente no que se refere a reação dos reativos. Isto faz com que este método, embora aceitável no que diz respeito aos fluxos de ativos, apresente erros grosseiros nos fluxos de reativos | 2, 3 |.

Outro problema com o método é o decorrente da redução de elementos "shunt" do sistema externo, causando erros nos fluxos e tensões do equivalente | 3 |.

Assim pode dizer que o método em questão não satisfaz, tal como apresentado, necessitando modificações que possam melhorá-lo.

CAPÍTULO IV

EQUIVALENTES WARD MODIFICADOS

A. INTRODUÇÃO

Os equivalentes tipo Ward, nas versões até aqui mostradas, embora não apresentem desempenho satisfatório, permitem modificações que, mantendo a simplicidade do método, melhoram substancialmente sua eficiência.

Várias versões do equivalente Ward vêm sendo usadas com o objetivo de obter melhores resultados. Dentre as principais, considerando-se somente os equivalentes ditos topológicos, pode-se citar a retenção de barras PV externas, Ward estendido, etc.

1. Eliminação de barras PV externas

Nos processos de obtenção do equivalente, quando da eliminação das barras externas, nota-se que a eliminação das barras tipo PQ praticamente não introduz erros no comportamento do modelo, enquanto que o mesmo processo nas barras tipo PV traz como resultado erros bastante consideráveis [3, 6].

A eliminação das barras PQ, por serem barras passivas, tem o significado de uma mudança das cargas do sistema externo para a fronteira e isto não introduz alterações significativas no comportamento do modelo obtido.

Já com as barras PV, a eliminação altera sensivelmente o modelo, destruindo as reações deste tipo de barras às variações do sistema. Entre estas reações, a mais importan

te diz respeito ao fluxo de reativos.

Uma das possibilidades de se evitar este tipo de problema é não eliminar as barras PV, ou seja, eliminariam-se somente as barras tipo PQ como mostrado na figura IV.1. Isto levaria a um equivalente tipo Ward com retenção de barras PV, o qual apresentaria resultados satisfatórios quanto às reações citadas.

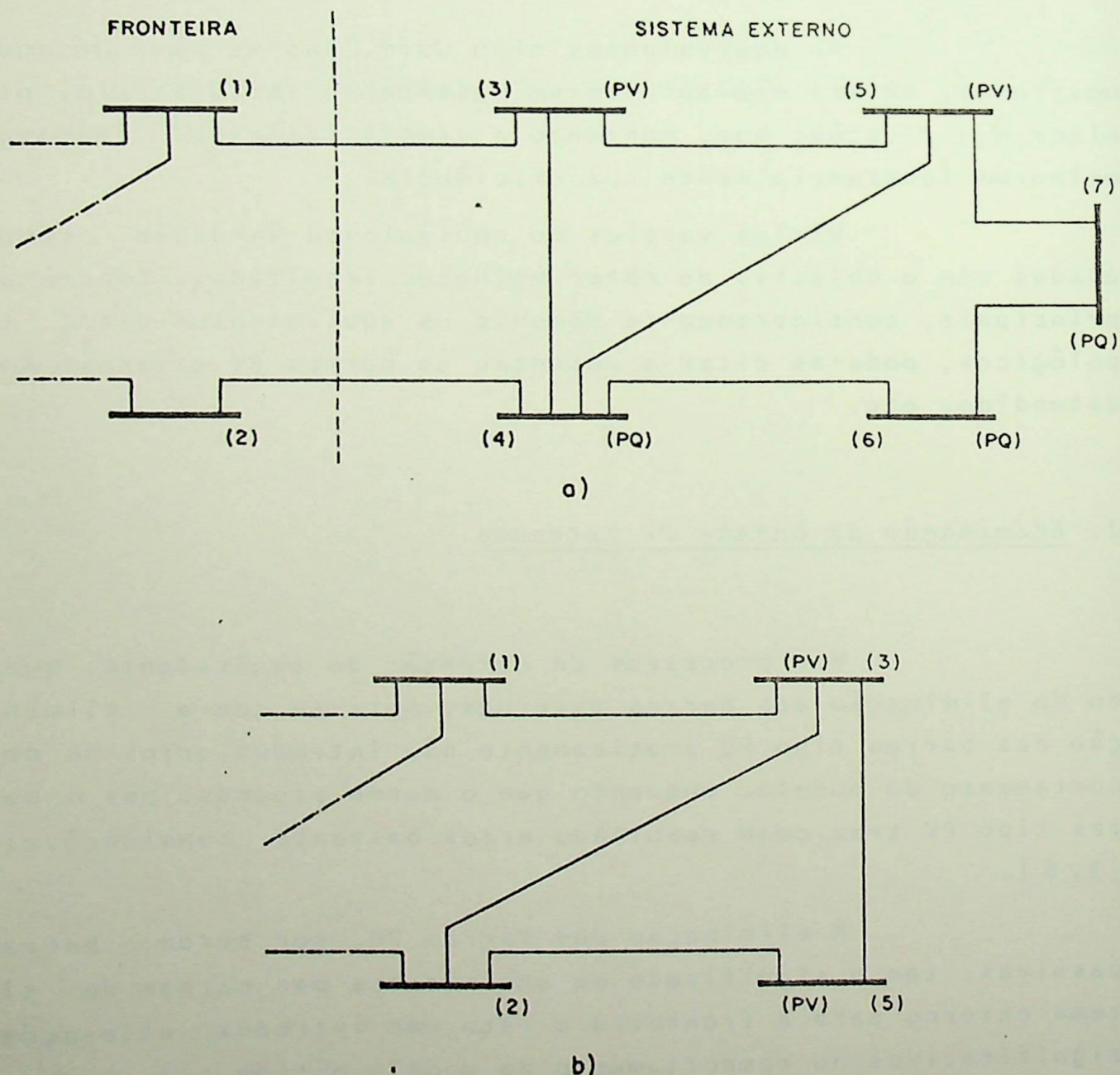


Fig. IV. 1- Redução de sistema com retenção de barra PV: a- sistema completo; b- equivalente

Ainda seguindo a mesma idéia poderia-se manter uma faixa ou zona próxima à fronteira, onde não se aplicaria o processo de eliminação, chamada zona de amortecimento, e que seria responsável pelo bom condicionamento, no que se refere às reações do sistema externo. Esta técnica baseia-se no fato de que as barras externas mais próximas à fronteira são as que mais contribuem na reação do sistema externo, quando ocorrem alterações no sistema interno, enquanto que as barras mais afastadas pouco ou nada contribuem. A figura IV.2 ilustra este modelo.

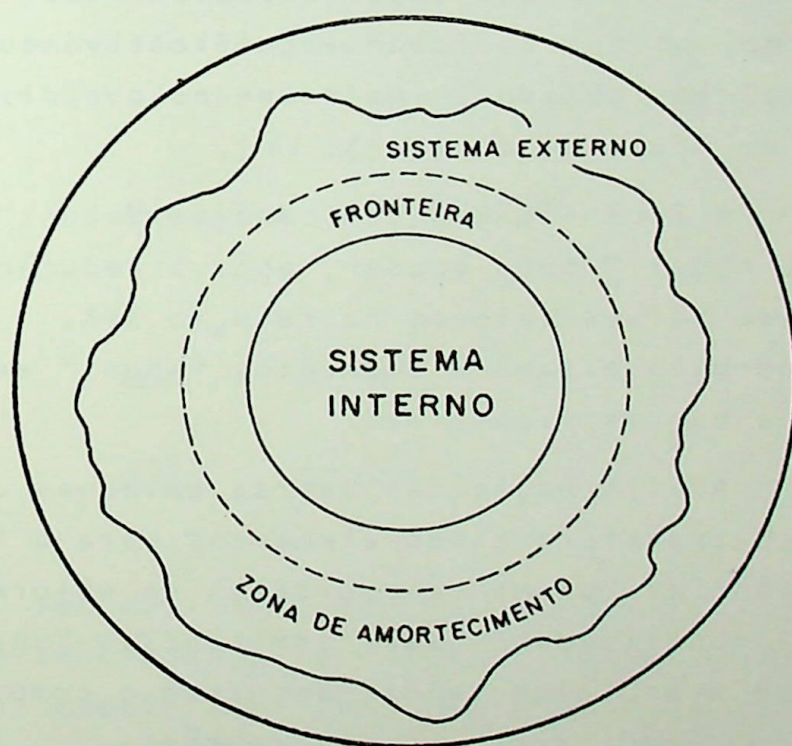


Fig. IV. 2 - Modelo com zona de amortecimento

Entretanto, ambas as alternativas implicam muitas vezes em aumentar demasiadamente as dimensões do equivalente obtido e também esbarram na dificuldade de obtenção de dados das barras externas retidas, quando em aplicações "on

line". As zonas de amortecimento ainda encontram o problema adicional de definição, ou seja, de se estipular quais barras externas devem ser retidas.

Por todos estes problemas as soluções de retenção de barras externas não parecem práticas, enquanto que outros métodos descritos adiante, apresentam soluções satisfatórias com melhores características.

2. Considerações sobre as admitâncias "shunt"

Outro problema na construção dos equivalentes tipo Ward envolve a representação dos elementos "shunt" do sistema externo, os quais afetam significativamente o comportamento dos modelos obtidos, inclusive no que diz respeito à convergência em fluxo de carga [3, 14].

A inclusão das admitâncias "shunt" na matriz de admitância nodal \underline{Y} pode causar, após a redução do sistema, o surgimento de baixos valores na relação X/R , impedâncias de valores anormais e também elementos "shunt" excepcionalmente grandes nas barras fronteiras.

A eliminação das barras externas contendo elementos "shunt" transfere esses elementos para a fronteira, criando-se admitâncias "shunt" capacitivas de valores elevados nas barras aí localizadas. Essas admitâncias "shunt" equivalentes, devido a seu alto valor, deturpam o comportamento do modelo, introduzindo erros em suas reações.

Por outro lado, o efeito desses elementos "shunt" é local e dependente das condições de carga, não fazendo muito sentido sua inclusão no processo de redução [3].

Assim pode-se concluir que a não inclusão pura e simples dos "shunts" externos é benéfica em termos de resultados, podendo-se dar um tratamento semelhante ao das cargas, ou seja, a não inclusão é compensada pelo ajuste de potência na fronteira. Este procedimento evita todos os inconvenientes

citados, fazendo com que o equivalente apresente resultados bem mais exatos.

3. Ward "desacoplado"

Em um sistema elétrico de potência a potência ativa (P) depende fortemente dos ângulos de tensão das barras (θ), e também existe uma forte interação entre a potência reativa (Q) e os módulos de tensão das barras (V). Por outro lado, as ligações da potência ativa com os módulos de tensão e da potência reativa com os ângulos de tensão são consideravelmente mais fracas. Estas interações permitem que se use, nos cálculos de equivalentes, técnicas de desacoplamento entre as relações P- θ e Q-V, tal como em aplicações de fluxo de carga [3, 14, 29].

As equações do fluxo de carga desacoplado são dadas por:

$$\frac{\Delta P/V}{V} = -\underline{\underline{B}}' \Delta \theta$$

$$\frac{\Delta Q/V}{V} = -\underline{\underline{B}}'' \frac{\Delta V}{V}$$

onde $\underline{\underline{B}}'$ e $\underline{\underline{B}}''$ são matrizes formadas pela parte imaginária da matriz de admitância nodal $\underline{\underline{Y}}$, sendo que $\underline{\underline{B}}'$ diz respeito a todas as barras, exceto a referência, não incluindo reatâncias "shunt" nem resistências das linhas do sistema e $\underline{\underline{B}}''$ engloba somente as barras tipo PQ. Os elementos das duas matrizes são dados em seguida:

$$B'_{ij} = \frac{1}{x_{ij}}$$

$$B'_{ii} = -\sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} \frac{1}{x_{ij}}$$

$$B''_{ij} = \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}$$

$$B''_{ii} = -\sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + 2b_i$$

onde:

- x_{ij} - reatância da linha i-j
- r_{ij} - resistência da linha i-j
- b_i - susceptância "shunt" da barra i

Note-se que na composição de B''_{ii} , o elemento "shunt" aparece multiplicado pelo fator 2, de acordo com a filosofia de formação da matriz B'' [3, 28].

Desta forma os cálculos do equivalente se fazem separadamente, usando-se as matrizes \underline{B}' e \underline{B}'' , sendo \underline{B}' responsável pelo modelo da parte ativa, ou dos fluxos de ativos e \underline{B}'' correspondente aos fluxos de reativos. São feitas reduções em \underline{B}' e \underline{B}'' obtendo-se um equivalente "ativo" e outro "reativo", conforme a figura IV.3 e onde os ajustes de potência na fronteira são dados pelas fórmulas citadas no capítulo III, considerando-se aqui $G = 0$ e ficando:

$$P_f^{eq} = V_f^o \sum_{k \in f} V_k^o B'_{fk} \text{sen} \theta_{fk}^o$$

$$Q_f^{eq} = V_f^o \sum_{k \in f} V_k^o B''_{fk} \text{cos} \theta_{fk}^o$$

Na figura IV.3.b indica-se propositadamente os elementos "shunt" nas barras fronteiras como resultado da redução da matriz \underline{B}'' , onde constam elementos "shunt" de barras PQ externas e também de indutâncias que ligam barras PQ a PV, já que estas últimas estão, em termos práticos, curto-circuitadas à "terra". Assim as ligações à "terra" indicadas na figura são indutivas.

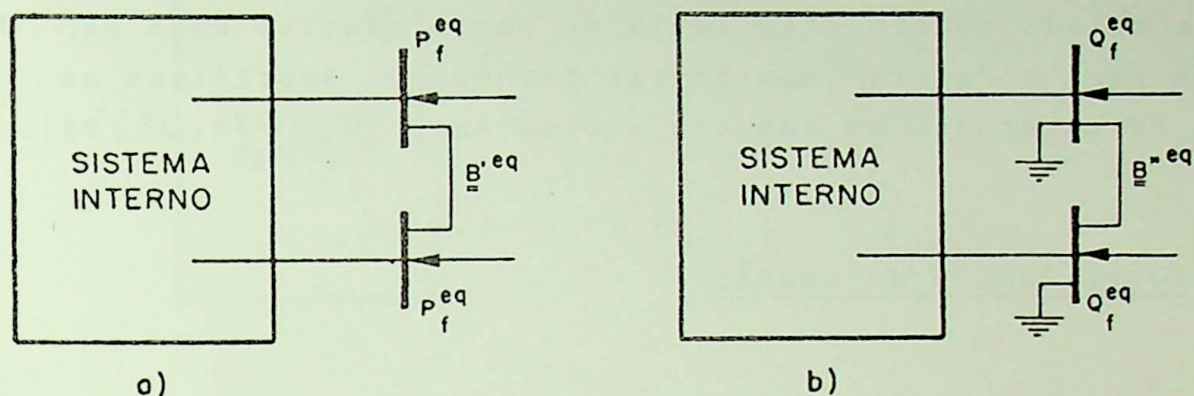


Fig. IV. 3 - Equivalente Ward "desacoplado": a- parte ativa; b- parte reativa

O modelo desacoplado, embora apresente comportamento razoável, não oferece resultados seguros nos fluxos de ativos em virtude de se desprezar as resistências das linhas, podendo apresentar erros maiores quanto menor for a relação X/R do sistema. Além disso ele implica em cálculo e armazenamento de dois equivalentes, sendo computacionalmente desvantajoso. Também deve-se levar em conta que para os casos em que usam programas onde não entram as matrizes \underline{B}' e \underline{B}'' este modelo só se adapta às custas de modificações.

B. EQUIVALENTE WARD ESTENDIDO

A preservação dos efeitos das barras PV externas é uma condição importante no aperfeiçoamento do equivalen

te tipo Ward, de forma a que o mesmo apresente melhores resultados nos fluxos de reativos. A idéia de aperfeiçoamento leva a um artifício que regule ou procure ajustar o fluxo de reativos compensando a perda de reação daquelas barras. O modelo desacoplado contém essa idéia na parte reativa onde as ligações para a "terra" nas barras fronteira substituem as barras PV externas, ou são seu equivalente [2, 3, 14, 28, 29].

1. Conceituação do modelo

O modelo proposto aproveita a idéia de se usar ramos ligados às barras fronteiras, responsáveis pela regulação das injeções de reativos, combinando-os com o Ward com a juste na fronteira. Estes ramos, conforme já citado, são puramente indutivos e ligados à "terra", não contribuindo portanto para o fluxo de ativos, o que permite que sejam acoplados ao outro modelo sem prejudicar os fluxos ativos e melhorando consideravelmente os fluxos de reativos em um equivalente único, como indicado na figura IV.4.

O fluxo de potência reativa fornecido pelo ramo que está ligado à "terra" (Q) entra no cálculo do ajuste de potência na fronteira para o caso base, tal como no modelo desacoplado, da mesma forma como se fosse uma injeção de potência reativa, dada por:

$$Q = V_f^2 B_f$$

onde:

V_f - módulo da tensão da barra fronteira

B_f , - elemento "shunt" na barra fronteira ou parte imaginária do elemento da diagonal da matriz de admitância nodal \underline{Y} correspondente a uma ligação à "terra".

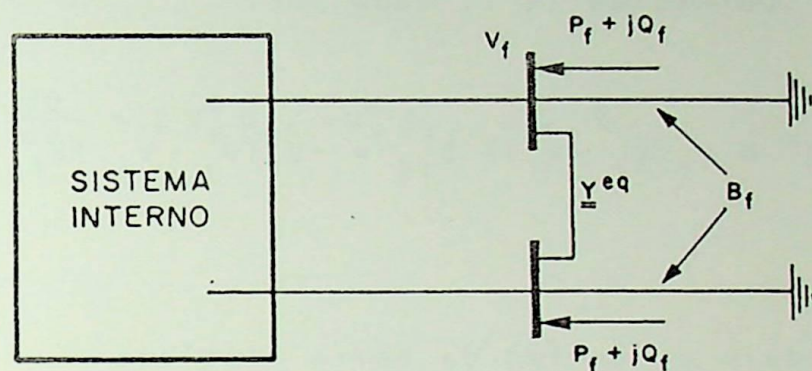


Fig. IV. 4 - Esquema do Ward estendido com ligação "shunt"

A diferença está no comportamento desse ramo quando o sistema sai do caso base, devido a alguma alteração na parte não reduzida, indo para outro ponto de operação, onde a tensão na barra da fronteira é modificada. Nesta hora a contribuição de potência reativa do ramo é também modificada, sendo a variação proporcional à mudança no módulo da tensão. Esta variação na potência reativa representa a reação das barras PV externas eliminadas e é a responsável pelo melhor desempenho deste modelo. O incremento de potência é dado então por:

$$\frac{dQ}{dV_f} = 2 V_f B_f$$

Este ramo para a "terra", responsável pela reação das barras PV eliminadas, pode ser substituído por um outro, ligado a uma barra fictícia, apresentando o mesmo efeito

do primeiro, ou seja, contribuindo com a mesma variação de potência reativa para igual modificação no módulo da tensão. O novo ramo, chamado ramo fictício, terá um valor de potência reativa a ser fornecida (Q'), dada por:

$$Q' = V_f (V_f - V_{f'}) B_{ff} = -V_f (V_f - V_{f'}) B_{ff'}$$

onde:

$V_{f'}$ - módulo de tensão da barra fictícia

B_{ff} - parte imaginária do elemento da diagonal da matriz \underline{Y} , correspondente a ligação da barra fronteira com a barra fictícia.

$B_{ff'}$ - parte imaginária do elemento da matriz \underline{Y} , correspondente a ligação da barra fronteira (f') com a barra fictícia (f'), sendo $B_{ff} = B_{ff'}$.

A variação de potência em função da tensão é dada por:

$$\frac{dQ'}{dV_f} = 2 V_f B_{ff} - V_{f'} B_{ff}$$

O ramo fictício não pode contribuir com potência reativa no caso base e nem fornecer potência ativa. Para que estas restrições não sejam violadas basta que a barra fictícia seja do tipo PV, como mostrado na figura IV.5, com:

$$V_{f'} = V_f^0$$

$$P_{f'} = 0$$

onde:

$P_{f'}$ - potência ativa injetada na barra fictícia

V_f^0 - módulo da tensão da barra fronteira no caso base

Logo, no caso base:

$$\frac{dQ'}{dV_f} = 2 V_f^0 B_{ff} - V_f^0 B_{ff} = V_f^0 B_{ff}$$

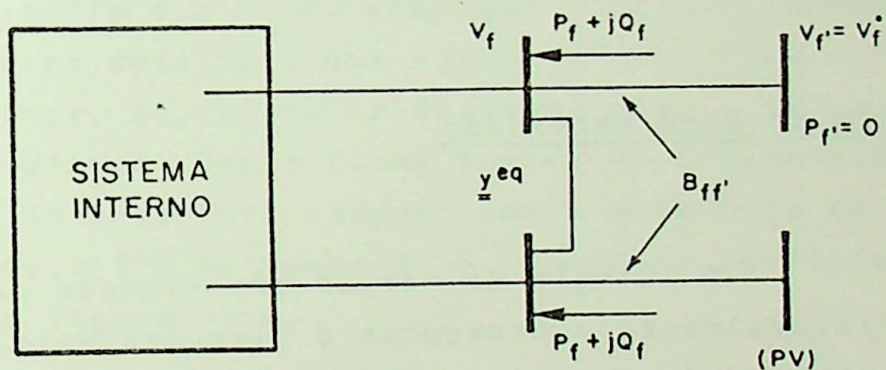


Fig. IV.5 - Esquema do Ward estendido com barra fictícia

Assim, como o ramo fictício tem que contribuir da mesma forma que a ligação para a "terra", os incrementos de potência reativa em função da tensão têm que ser iguais nas duas situações; para o caso base, dando:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = 2 V_f^0 B_f = V_f^0 B_{ff}$$

$$\therefore B_{ff} = 2 B_f$$

ou em termos de elementos da rede:

$$b_{ff'} = 2 b_f$$

com:

$b_{ff'}$ - susceptância série da linha que liga a barra fronteira à barra fictícia

b_f - susceptância "shunt" na barra fronteira

2. Cálculo do Ward estendido

O cálculo da versão com ligação para a "terra" é feito inicialmente montando-se o circuito Ward com ajuste na fronteira de forma normal. Após esta fase, calcula-se a matriz \underline{B}''^{eq} , que é a matriz \underline{B}'' reduzida, e com ela calculam-se as ligações para a "terra" dadas por:

$$B_f = \frac{1}{2} \sum_{k \in f} B_{kf}''^{eq}$$

onde:

$B_{kf}''^{eq}$ - elemento kf da matriz \underline{B}'' reduzida

Ao se fazer o ajuste de potência na fronteira, para o cálculo das injeções equivalentes, as ligações à "terra" têm que ser levadas em conta na parte referente à potência reativa.

Na versão com barra fictícia o procedimento é semelhante, só que agora o ramo fictício não entra no ajuste de potência, que é feito da mesma forma que no Ward com ajuste

te na fronteira, e o valor do ramo fictício é dado por:

$$B_{ff} = \sum_{k \in f} B_{kf}''^{eq}$$

A necessidade da matriz \underline{B}'' é uma desvantagem, principalmente quando o seu cálculo é feito somente para o equivalente. Assim um método de cálculo que use somente a matriz \underline{Y} passa a ser vantajoso e pode ser feito sem dificuldades, aproveitando a mesma filosofia do Ward estendido anterior, só que agora, usando a matriz de admitância nodal \underline{Y} ajustada no lugar da matriz \underline{B}'' para calcular o ramo fictício. O ajuste necessário é a eliminação das barras PV externas, tal como na \underline{B}'' . Outro detalhe é que esta matriz \underline{Y} deve conter os "shunts" externos, ao contrário da usada para o cálculo do circuito equivalente. Desta forma tem-se um procedimento em tudo idêntico ao anterior, somente com a diferença de se trabalhar com a matriz \underline{Y} no lugar de \underline{B}'' dando um equivalente como mostrado na figura IV.6.

A sequência para obtenção do modelo descrito é dada em seguida:

- 1 - usando-se a matriz \underline{Y} completa, com os "shunts" externos, aterram-se as barras PV externas, o que pode ser simulado colocando-se admitâncias de valores muito alto nas diagonais correspondentes a estas barras;
- 2 - eliminam-se as barras externas via método de Gauss;
- 3 - com a matriz reduzida calculam-se os elementos "shunt" das barras fronteiras, que serão os próprios elementos dos ramos fictícios;
- 4 - adotam-se as tensões das barras fronteiras, no caso base, para as barras fictícias tomadas como barras PV, e faz-se $P = 0$ nestas barras;
- 5 - voltando-se à matriz \underline{Y} original, retiram-se todos os "shunts" externos;

- 6 - calcula-se o circuito equivalente aplicando-se nova redução com eliminação das barras externas, também por Gauss;
- 7 - calculam-se as injeções equivalentes através do ajuste de potência na fronteira.

Os itens 5, 6 e 7 constituem o cálculo de um equivalente Ward com ajuste na fronteira.

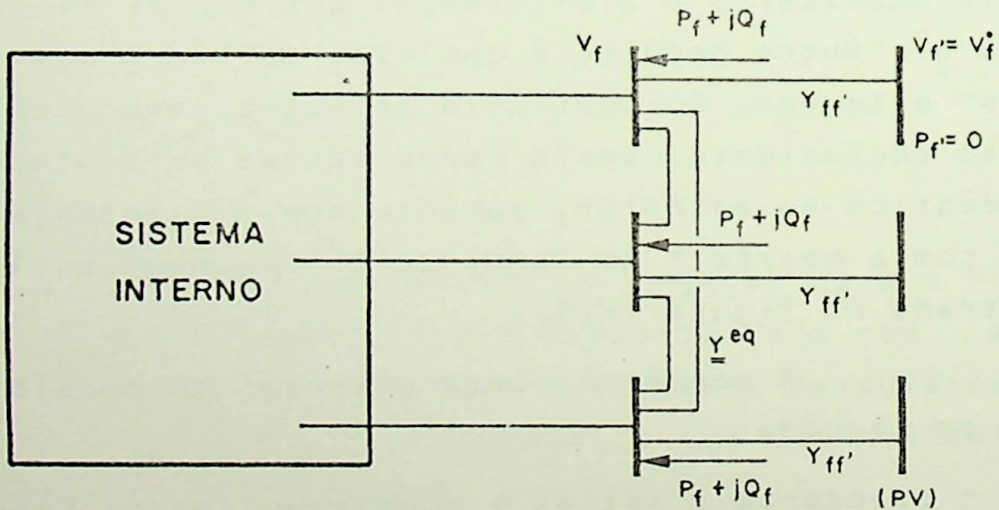


Fig. IV.6 - Equivalente Ward com barra fictícia

3. Comparações entre as diferentes versões

A versão com ligação à "terra" apresenta a vantagem de não aumentar o sistema com novas barras, porém neces

sita de dados bastante precisos no que diz respeito ao estado na fronteira, já que o incremento de potência reativa é grandemente afetado por qualquer imprecisão, sendo portanto adequada a aplicações "on-line" [3].

A versão do Ward estendido com barra fictícia já tem menor sensibilidade em relação ao estado na fronteira, aplicando-se melhor a estudos "off-line" onde não se tem dados precisos. Por outro lado, o sistema sofre o acréscimo das barras fictícias, não sendo este um problema grave já que elas são em número igual ao das barras fronteiras.

O uso da matriz \underline{Y} para o cálculo dos ramos fictícios, como já exposto, facilita os casos em que não se tem a matriz \underline{B}'' disponível, como por exemplo, ao se trabalhar com fluxos de cargas diferentes do desacoplado.

4. Exemplo de cálculo

Tomando-se como exemplo o mesmo sistema do item III.D.1, cuja figura é aqui parcialmente repetida como figura IV.7, faz-se inicialmente o cálculo dos ramos fictícios a partir da matriz de admitância nodal que inclua os "shunts" externos.

Como já explicado no item III.B.2, o sistema interno não sofre alterações na redução, podendo-se portanto trabalhar com uma matriz de admitância nodal que inclua somente o sistema externo e a fronteira, sem incluir as linhas de interligação.

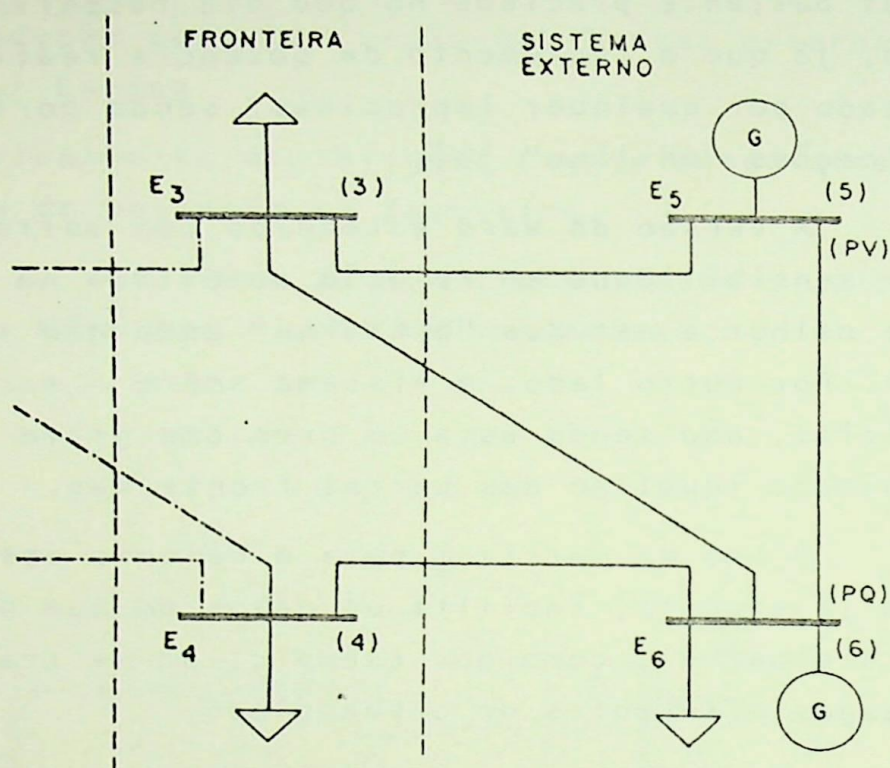


Fig.IV.7 - Representação do sistema externo e fronteira para cálculo do Ward estendido

A matriz assim definida, que se representará por \underline{Y} , será dada por:

	(3)	(4)	(5)	(6)
(3)	2,5000 -j7,4400		-1,2500 +j3,7500	-1,2500 +j3,7500
(4)		1,4286 -j4,2707		-1,4286 +j4,2857
(5)	-1,2500 +j3,7500		3,2500 -j9,7100	-2,0000 +j6,0000
(6)	-1,2500 +j3,7500	-1,4286 +j4,2857	-2,0000 +j6,0000	4,6786 -j13,9807

Aterrando as barras PV externas por meio do artifício de se somar admitâncias de alto valor às diagonais re

ferentes a estas barras vem:

	(3)	(4)	(5)	(6)
(3)	2,5000 -j7,4400		-1,2500 +j3,7500	-1,2500 +j3,7500
(4)		1,4286 -j4,2707		-1,4286 +j4,2857
→ (5)	-1,2500 +j3,7500		10^8 -j 10^8	-2,0000 +j6,0000
(6)	-1,2500 +j3,7500	-1,4286 +j4,2857	-2,0000 +j6,0000	4,6786 -j13,9807

Agora eliminam-se as barras externas, aplicando-se o método de Gauss, começando pela barra (6) e obtendo-se:

	(3)	(4)	(5)	(6)
(3)	2,1661 -j6,4341	0,3817 +j1,1495	-1,7844 +j5,3593	
(4)	-0,3817 +j1,1495	0,9924 -j2,9569	-0,6105 +j1,8392	
(5)	-1,7844 +j5,3593	-0,6105 +j1,8392	10^8 -j 10^8	
(6)	-0,2681 +j0,0003	-0,3064 +j0,0004	-0,4290 +j0,0005	1,0000 +j0,0000

Aplicando-se novamente a eliminação de Gauss para a barra (5), pode-se perceber os elementos dos eixos (3) e (4) não são afetados, sendo desnecessária a eliminação desta barra já que é do tipo PV e está aterrada, conforme mostrado em seguida:.

	(3)	(4)	(5)	(6)
(3)	2,1661 -j6,4341	-0,3817 +j1,1495		
(4)	-0,3817 +j1,1495	0,9924 -j2,9569		
(5)	0,0000 +j0,0000	0,0000 +j0,0000	1,0000 +j0,0000	
(6)	-0,2518 -j0,0048	-0,2878 -j0,0055	-0,4029 -j0,0077	1,0000 +j0,0000

Daí a matriz equivalente será dada por:

$$\hat{Y}_{eq} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{c} (3) \\ (4) \end{array} \\ \begin{array}{c} (3) \\ (4) \end{array} & \begin{array}{|cc|} \hline \begin{array}{c} 2,1661 \\ -j6,4341 \end{array} & \begin{array}{c} -0,3817 \\ +j1,1495 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} -0,3817 \\ +j1,1495 \end{array} & \begin{array}{c} 0,9924 \\ -j2,9569 \end{array} \\ \hline \end{array} \end{array}$$

Os "shunts" das barras fronteiras (3) e (4) serão os próprios elementos entre as respectivas barras fronteiras e as barras PV fictícias como indicado:

$$Y_{S3} = 1,7844 - j5,2846$$

$$Y_{S4} = 0,6107 - j1,8074$$

$$Y_{33}' = Y_{S3} = 1,7844 - j5,2846$$

$$Y_{44}' = Y_{S4} = 0,6107 - j1,8074$$

$$Y_{33}'' = -Y_{33}' = -1,7844 + j5,2846$$

$$Y_{44}'' = -Y_{44}' = 0,6107 + j1,8074$$

sendo:

Y_{Sn} - elemento "shunt" da barra n

(3') e (4') - barras fictícias ligadas às barras fronteiras (3) e (4).

As barras fictícias, tipo PV, (3') e (4') terão o mesmo módulo de tensão do caso base das barras (3) e (4) respectivamente e as potências ativas geradas serão nulas. Então, da tabela III.3 vem:

$$V_{3'} = V_3^0 = 1,0330 \text{ pu}$$

$$V_{4'} = V_4^0 = 1,0045 \text{ pu}$$

$$P_{G3'} = P_{G4'} = 0 \text{ MW}$$

Daqui em diante o cálculo é de um Ward com a juste na fronteira, como já executado no item III.D.2, só que agora usar-se-á a matriz de admitância nodal sem os "shunts" externos de acordo com o exposto no item IV.A.2. Esta matriz será designada por \underline{Y}_s sendo dada por:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
13,3333 -j39,9000	-10,0000 +j30,0000	-1,6667 +j5,0000	-1,6667 +j5,0000		
-10,0000 +j30,0000	13,3333 -j39,9150		-3,3333 +j10,0000		
-1,6667 +j5,0000		4,1667 -j12,4200		-1,2500 +j3,7500	-1,2500 +j3,7500
-1,6667 +j5,0000	-3,3333 +j10,0000		6,4286 -j19,2257		1,4286 +j4,2857
		-1,2500 +j3,7500		3,2500 -j9,7500	-2,0000 +j6,0000
		-1,2500 +j3,7500	-1,4286 +j4,2857	-2,0000 +j6,0000	4,6786 -j14,0357

Tal como já feito no item III.D.1 pode-se trabalhar somente com a parte da matriz correspondente aos eixos (3), (4), (5) e (6), sistema externo e fronteira, já que a parte referente aos eixos (1) e (2), sistema interno não é afetada. Este procedimento é diferente do imediatamente anterior, usado para o cálculo dos ramos fictícios, já que aqui se está trabalhando com uma parte da matriz de admitância no dal onde, apesar de não constarem os eixos (1) e (2), existem contribuições das linhas 3-1, 4-1 e 4-2, inclusas nos elementos 33 e 44 da matriz, enquanto que no outro procedimento a matriz \hat{Y} montada não continha essas contribuições. Obviamente os dois procedimentos levam a resultados iguais ficando a escolha de um ou outro na dependência de dados mais facilmente disponíveis.

Eliminando-se a barra (6) vem:

	(3)	(4)	(5)	(6)
(3)	3,8327 -j11,4181	-0,3817 +j1,1450	-1,7844 +j5,3531	
(4)	-0,3817 +j1,1450	5,9924 -j17,9171	-0,6107 +j1,8321	
(5)	-1,7844 +j5,3531	-0,6107 +j1,8321	2,3950 -j7,1851	
(6)	-0,2672 +j0,0000	-0,3053 +j0,0000	-0,4275 +j0,0000	1,0000 -j0,0000

A eliminação da barra (5) dará:

	(3)	(4)	(5)	(6)
(3)	2,5034 -j7,4300	-0,8367 +j2,5100		
(4)	-0,8367 +j2,5100	5,8367 -j17,4500		
(5)	-0,7450 +j0,0000	-0,2550 +j0,0000	1,0000 -j0,0000	
(6)	-0,2672 +j0,0000	-0,3053 +j0,0000	-0,4275 +j0,0000	1,0000 +j0,0000

O circuito equivalente será dado por:

$$Y_{=S}^{eq} = \begin{array}{c} (3) \\ (4) \end{array} \begin{array}{|c|c|} \hline 2,5034 & -0,8367 \\ \hline -j7,4300 & +j2,5100 \\ \hline -0,8367 & 5,8367 \\ \hline +j2,5100 & -j17,4500 \\ \hline \end{array}$$

O sistema reduzido, incluindo equivalente, fronteira e sistema interno será dado pela matriz $Y_{=S}^{eq}$ agregada aos eixos (1) e (2) como indicado:

$$Y_{=S}^{red} = \begin{array}{c} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 13,3333 & -10,0000 & -1,6667 & -1,6667 \\ \hline -j39,9000 & +j30,0000 & +j5,0000 & +j5,0000 \\ \hline -10,0000 & 13,3333 & & -3,3333 \\ \hline +j30,0000 & -j39,9150 & & +j10,0000 \\ \hline -1,6667 & & 2,5034 & -0,8367 \\ \hline +j5,0000 & & -j7,4300 & +j2,5100 \\ \hline -1,6667 & -3,3333 & -0,8367 & 5,8367 \\ \hline +j5,0000 & +j10,0000 & +j2,5100 & -j17,4500 \\ \hline \end{array}$$

As injeções equivalentes são calculadas com as fórmulas já indicadas, não entrando no ajuste os ramos fictícios, e sendo:

$$P_3 = V_3^0 \sum_{k \in 3} V_k^0 (G_{3k} \cos \theta_{3k}^0 + B_{3k} \sin \theta_{3k}^0)$$

$$P_4 = V_4^0 \sum_{k \in 4} V_k^0 (G_{4k} \cos \theta_{4k}^0 + B_{4k} \sin \theta_{4k}^0)$$

$$Q_3 = V_3^0 \sum_{k \in 3} V_k^0 (G_{3k} \sin \theta_{3k}^0 - B_{3k} \cos \theta_{3k}^0)$$

$$Q_4 = V_4^0 \sum_{k \in 4} V_k^0 (G_{4k} \sin \theta_{4k}^0 - B_{4k} \cos \theta_{4k}^0)$$

Fazendo-se os cálculos o resultado é:

$$P_3^{eq} = 14,99 \text{ MW} \qquad Q_3^{eq} = -20,57 \text{ MVAR}$$

$$P_4^{eq} = -42,02 \text{ MW} \qquad Q_4^{eq} = -25,61 \text{ MVAR}$$

$$S_3 = (0,1499 - j0,2057) \text{ pu}$$

$$S_4 = (-0,4202 - j0,2561) \text{ pu}$$

O cálculo do equivalente Ward estendido está concluído, sendo o resultado mostrado na figura IV.8.

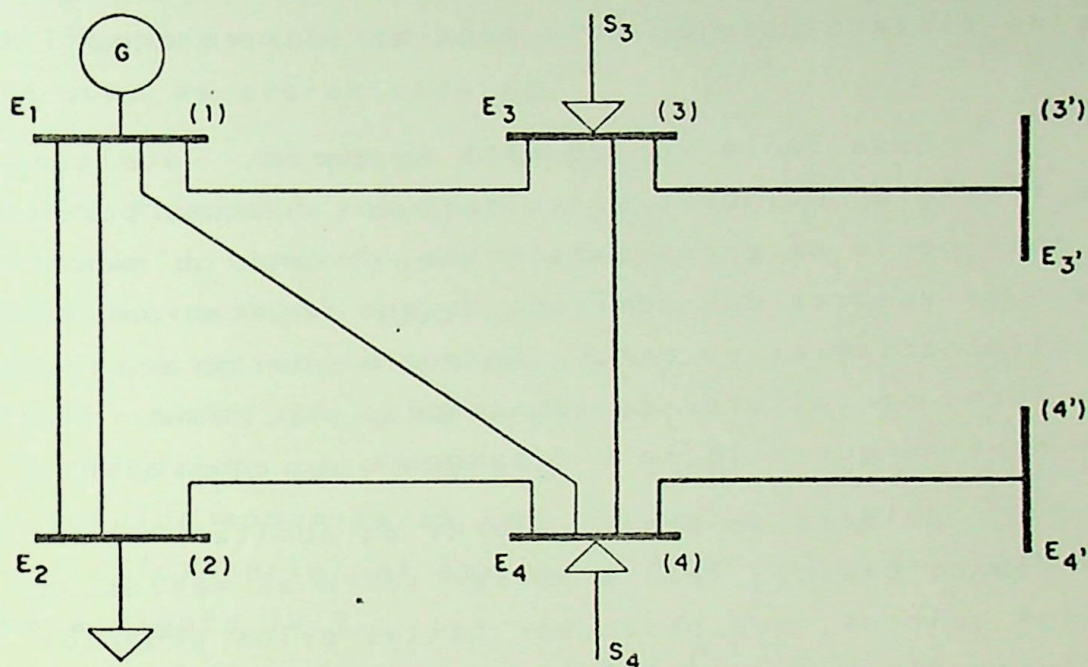


Fig.IV.8 - Sistema com equivalente Ward estendido

C. EQUIVALENTE WARD ESTENDIDO COM CALIBRAÇÃO

O equivalente Ward estendido apresenta um desempenho bastante satisfatório, principalmente levando-se em conta os outros métodos topológicos tipo Ward. Ele apresenta praticamente o mesmo comportamento do Ward com ajuste na fronteira quanto aos fluxos de ativos e melhora bastante os fluxos de reativos. Entretanto, ele ainda apresenta imperfeições, as quais pode-se tentar eliminar.

1. Princípios da calibração

A idéia básica do modelo é manter-se a filosofo

fia do Ward estendido, através das barras fictícias, modificando-se somente os valores das admitâncias dos ramos fictícios, com o objetivo de se conseguir que os incrementos de potência injetados ou absorvidos por esses ramos façam com que os fluxos no sistema estejam mais próximos dos valores exatos.

Essa idéia vem do fato de que as admitâncias dos ramos fictícios melhoram os valores dos fluxos, porém sem eliminar totalmente os erros existentes, levando a pensar-se sobre quais os valores das admitâncias que injetariam fluxos tais que eliminariam esses erros. Em outras palavras, procura-se uma forma de calibrar as admitâncias dos ramos fictícios de tal maneira que melhore o desempenho do equivalente.

A idéia de achar valores de admitâncias que tornem os fluxos exatos, leva a pensar sobre as medidas do a certo destes valores, que podem ser feitas pelos próprios erros nos fluxos. Também a medição destes erros pode ser feita tanto nos fluxos de reativos somente, como nos fluxos de ativos e reativos, isto é, pode-se calibrar os ramos fictícios baseando-se somente nos erros dos reativos ou dos ativos e reativos.

A calibração é feita fora do caso base, ou seja, é baseada no desempenho do equivalente Ward estendido em uma contingência, ou em uma situação tal que os ramos fictícios sejam solicitados. Nesta situação, ou contingência, determinam-se os erros nos fluxos, isto é, a diferença entre os valores exatos e os fornecidos pelo Ward estendido.

Logo, para a calibração, é necessário ter-se acesso aos valores exatos dos fluxos de potência, bem como aos valores de fluxos fornecidos pelo equivalente Ward estendido. Isto implica em obter os fluxos exatos através de um fluxo de carga do sistema completo ou por telemedição, enquanto os outros, do Ward estendido, são obtidos sem dificuldades já que tem-se todos os dados necessários.

Já que os ramos fictícios estão ligados às barras fronteiras, a calibração irá afetar diretamente os fluxos

Injetados nestas barras e portanto a correção dos fluxos, ou a medição dos erros, deverá ser feita nas outras linhas também ligadas a estas barras, que são as linhas de interligação e as ligações entre as barras fronteiras, tanto as do equivalente como as pré-existentes.

De posse do erro, em termos de fluxo, para cada barra fronteira, calcula-se qual deverá ser a variação da admitância do ramo fictício correspondente, capaz de fornecer ao sistema um fluxo igual ao erro medido, sendo esta variação incorporada ao ramo fictício. Em outras palavras, calcula-se um novo ramo fictício em cada barra fronteira, em paralelo com o original, que injete no sistema um fluxo igual ao erro e em seguida somam-se as admitâncias, ficando-se somente com o ramo fictício original mas com a admitância modificada, conforme a figura IV.9.

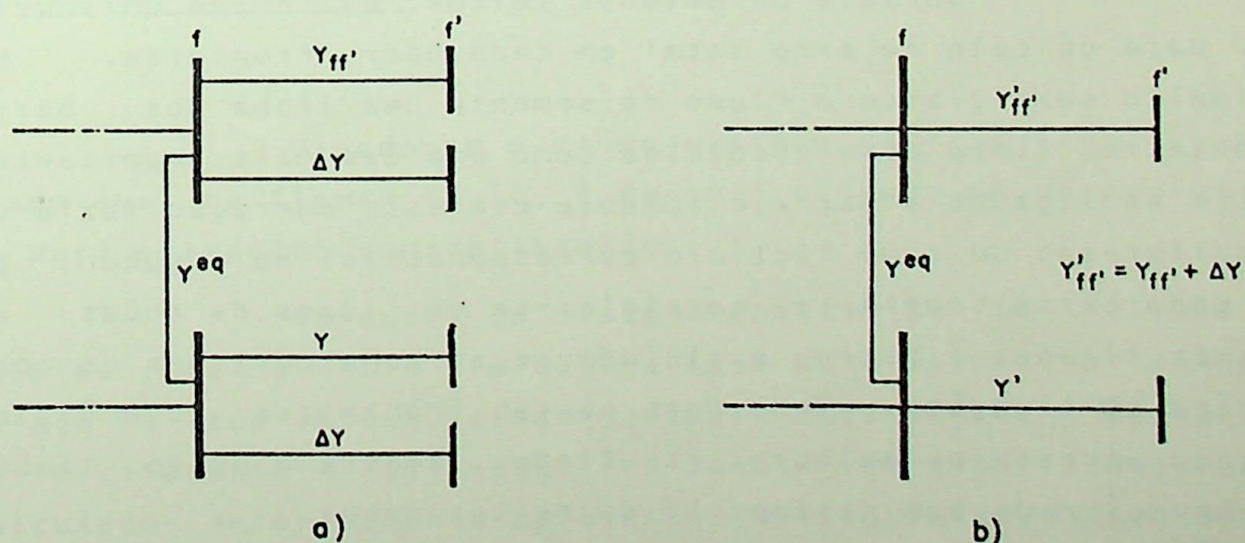


Fig. IV.9 - Equivalente Ward com calibração: a - com o ramo fictício e o incremento; b - com o ramo fictício já modificado.

2. Cálculo do Ward estendido com calibração

Pode-se dividir o cálculo em duas partes, sendo a primeira o próprio cálculo do Ward estendido, já explicado, e a segunda o da calibração. É claro que o Ward estendido calculado previamente terá que ser o modelo com barras PV fictícias.

O cálculo da calibração começa com a escolha de uma contingência, no sistema não reduzido, que sirva de base para a correção. Esta contingência terá que ser bastante significativa em termos de reação do sistema externo, ou seja, deverá solicitar bastante o equivalente, o que leva à escolha de uma saída de linha de interligação. Dentre as linhas de interligação a escolha deverá recair entre as mais importantes.

Em seguida, necessita-se dos fluxos exatos para esta contingência, bem como os do Ward estendido, obtidos de forma já explicada, e com os quais calculam-se os erros dos fluxos nas linhas ligadas às barras fronteiras.

Durante os estudos feitos, usaram-se dois métodos para cálculo do erro total em cada barra fronteira. No primeiro corrigia-se o fluxo de somente uma linha por barra fronteira, linha essa escolhida como uma das mais importantes entre as ligadas à barra, e somente com esta correção fazia-se a calibração do ramo fictício correspondente. No segundo, para cada barra fronteira, corrigiam-se os fluxos de todas as linhas ligadas à barra, excluindo-se as superposições de correções em ligações unindo duas barras fronteiras. Este último método apresentou melhores resultados, embora o outro também tenha mostrado bom desempenho em muitos casos.

Após o cálculo do erro, quando já se sabe qual o incremento de fluxo que deveria ser injetado em cada barra fronteira, faz-se o cálculo da calibração. Aqui também usaram-se vários modelos, a começar com as duas opções de correção dos fluxos, isto é, corrigir somente a parte ativa em um

modelo e as partes ativa e reativa em outro. Também no cálculo da admitância incremental usaram-se duas versões, sendo uma delas com as fórmulas do fluxo de carga desacoplado e a outra com as fórmulas tradicionais, ambas relacionando o fluxo no ramo fictício criado em paralelo com sua admitância.

O comportamento das várias versões será analisado no item IV.D.

As etapas para obtenção deste modelo podem ser resumidas em:

- 1 - obtenção do modelo Ward estendido;
- 2 - escolha da contingência que servirá de base para a calibração;
- 3 - obtenção dos fluxos de potência exatos e os originários do Ward estendido;
- 4 - cálculo dos erros nos fluxos de potência;
- 5 - cálculo das calibrações dos ramos fictícios.

3. Exemplo de cálculo

Usando-se o mesmo sistema do item III.D.1, mostrado aqui na figura IV.10, é feito o cálculo de um equivalente Ward estendido com calibração.

Os dados do sistema constam do item III.D.1 nas tabelas III.1 a III.4 e o equivalente Ward estendido foi calculado no item IV.B.4, sendo portanto necessária somente a parte referente a calibração dos ramos fictícios. Estes ramos calculados anteriormente apresentam os seguintes valores:

$$Y_{33}' = -Y_{33}' = -1,7844 + j5,2846$$

$$Y_{44}' = -Y_{44}' = -0,6107 + j1,8074$$

sendo:

Y_{33}' - admitância do ramo fictício ligado à barra (3)

Y_{44}' - admitância do ramo fictício ligado à barra (4)

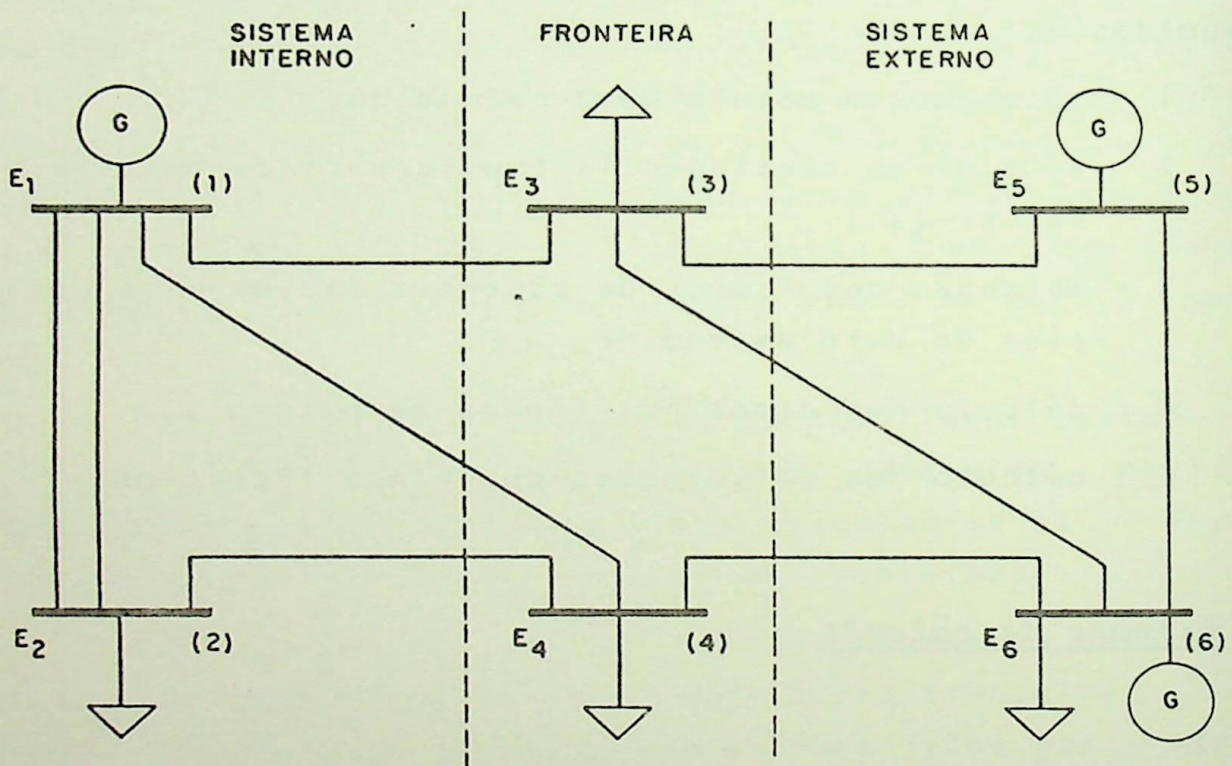


Fig. IV. 10 - Sistema para cálculo do equivalente Ward estendido com calibração

A contingência escolhida é a saída da linha 1-4, o que implica que toda a calibração será feita baseada nesta contingência. Será usada a versão onde são corrigidos os fluxos de todas as linhas ligadas a cada barra fronteira, ou seja, para a barra (3) serão corrigidos os fluxos 3-1, 3-4 e 3-0, sendo que para a barra (4) os fluxos serão 4-2 e 4-0. A ligação 3-4 resulta do equivalente, não tendo significado físico, porém o fluxo exato pode ser calculado com as tensões das barras e a admitância da ligação. O fluxo nesta ligação é

corrigido somente uma vez, junto à barra (3). Os fluxos 3-0 e 4-0 correspondem aos "shunts" das duas barras, resultado das capacitâncias das linhas. Note-se que, apesar de não se considerar os "shunts" externos, as partes das susceptâncias capacitivas das linhas 3-5 e 3-6, referentes à barra (3) são consideradas, assim como o da linha 4-6 referente à barra (4).

Os fluxos são aqui obtidos processando-se um fluxo de carga com o sistema completo, sem equivalente, e outro com o Ward estendido, cujos resultados estão na tabela IV.1.

TABELA IV.1

FLUXOS OBTIDOS COM A SAÍDA DA LINHA 1-4

LINHA	EXATO (pu)	WARD ESTENDIDO (pu)
3 - 1	0,0171 - j0,1944	0,0174 - j0,2058
3 - 4	*0,1335 + j0,1008	0,1331 + j0,0901
3 - 0	0,0000 - j0,0637	0,0000 - j0,0635
4 - 2	0,2905 - j0,1341	-0,2905 - j0,1165
4 - 0	0,0000 - j0,0144	0,0000 - j0,0145

* calculado

Neste exemplo a correção será feita somente nos fluxos de reativos, portanto só será necessário o cálculo de erro nestes fluxos. Também será usado um método de cálculo da calibração baseado no fluxo de carga desacoplado.

Assim têm-se os seguintes erros para a barra (3):

$$\text{- fluxo } 3 - 1 \rightarrow \Delta Q_{31} = -0,0114 \text{ pu}$$

$$\text{- fluxo } 3 - 4 \rightarrow \Delta Q_{34} = -0,0107 \text{ pu}$$

$$\text{- fluxo } 3 - 0 \rightarrow \Delta Q_{30} = 0,0002 \text{ pu}$$

$$\Delta Q_3 = \Delta Q_{31} + \Delta Q_{34} + \Delta Q_{30} = -0,0219 \text{ pu}$$

Para a barra (4):

$$\text{- fluxo } 4 - 2 \rightarrow \Delta Q_{42} = 0,0176 \text{ pu}$$

$$\text{- fluxo } 4 - 0 \rightarrow \Delta Q_{40} = -0,0001 \text{ pu}$$

$$\Delta Q_4 = \Delta Q_{42} + \Delta Q_{40} = 0,0175 \text{ pu}$$

O cálculo da calibração é feito com a equação:

$$B_{nn'} = \frac{\Delta Q_{nn'}}{V_n} \cdot \frac{1}{(V_n - V_{n'})} \text{ sendo } \Delta y_{nn'} = -jB_{nn'}$$

onde:

(n) - barra fronteira

(n') - barra fictícia ligada à barra fronteira (n)

$\Delta y_{nn'}$ - valor da admitância do ramo fictício em paralelo com o original

V_n e $V_{n'}$ - tensões do Ward estendido

Efetuada-se os cálculos resulta:

$$\Delta y_{33'} = -j4,8169$$

$$\Delta y_{44'} = j0,8053$$

Os valores anteriores eram:

$$y_{33}' = 1,7844 - j5,2846$$

$$y_{44}' = 0,6107 - j1,8074$$

Então os ramos fictícios calibrados serão da
dos pelas somas das admitâncias anteriores mais os incremen
tos calculados e o equivalente resultante é mostrado na figu
ra IV.11.

$$Y'_{33}' = y_{33}' + Y_{33}' = (1,7844 - j10,1015) \text{ pu}$$

$$Y'_{44}' = y_{44}' + Y_{44}' = (0,6107 - j1,0021) \text{ pu}$$

$$Y'_{33}' = -y'_{33}' = -1,7844 + j10,1015$$

$$Y'_{44}' = -y'_{44}' = -0,6107 + j1,0021$$

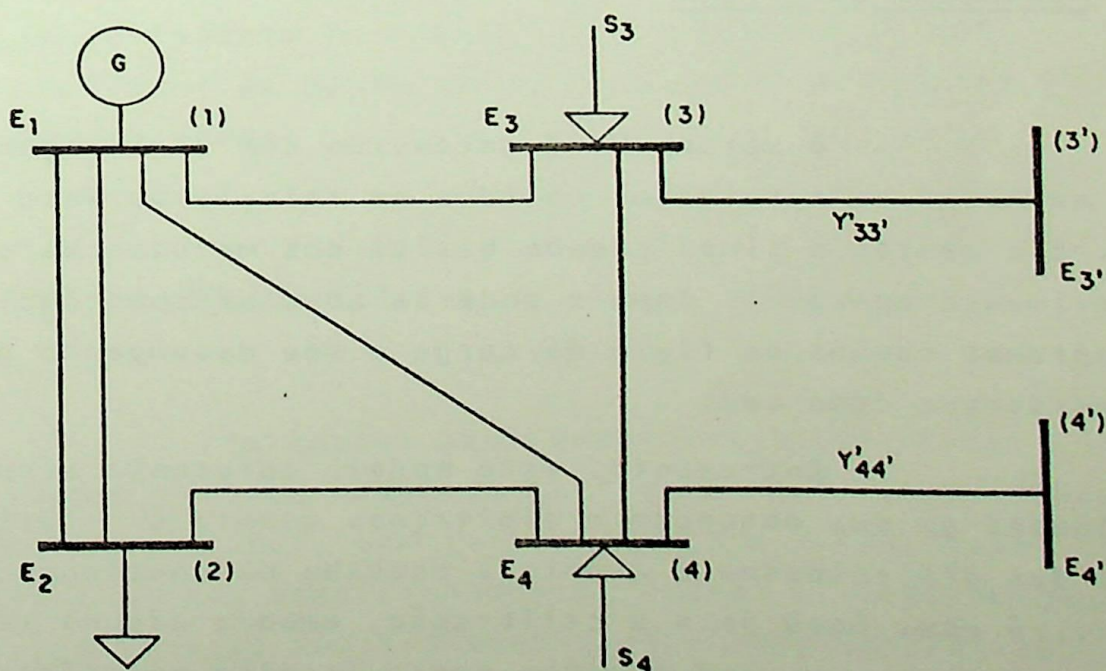


Fig.IV.11- Sistema com equivalente Ward estendido com calibração

O restante do equivalente é idêntico ao Ward estendido obtido anteriormente, assim as injeções equivalentes e o circuito equivalente são dados por:

$$S_3 = (0,1499 - j0,2057) \text{ pu}$$

$$S_4 = (-0,4202 - j0,2561) \text{ pu}$$

	(3)	(4)	(3')	(4')
(3)	4,2878 -j17,5315	-0,8367 +j2,5100	-1,7844 +j10,1015	
(4)	-0,8367 +j2,5100	6,4474 -j18,4521		-0,6107 +j1,0021
(3')	-1,7844 +j10,1015		1,7844 -j10,1015	
(4')		-0,6107 +j1,0021		0,6107 -j1,0021

$Y_{=S}^{eq} =$

4. Avaliação do modelo

O método Ward estendido com calibração pretende melhorar os resultados obtidos em relação ao Ward estendido. Ele mantém a simplicidade básica dos métodos Ward sendo facilmente operável. Também pode-se adaptar com facilidade a programas comuns de fluxo de carga e seu desempenho pode ser considerado como bom.

Entretanto, este modelo apresenta ainda dificuldades em sua obtenção e limitações quanto à utilização. Uma das dificuldades é quanto à escolha da contingência que servirá como base para a calibração, embora alguns testes pareçam indicar que uma mudança nesta escolha não afeta grandemente a calibração, desde que a mudança ocorra entre contingências significativas.

Outro problema é a limitação, em princípio, a um uso em aplicações "off-line", tipo planejamento e estudos, em virtude da dificuldade de se obter os fluxos exatos que permitam efetuar as medições de erros.

Por outro lado, os resultados obtidos chegaram a reduzir à metade os erros nos fluxos de potência do modelo Ward estendido, conforme será visto na próxima seção. Acredita-se ainda que muitos ajustes e sistematizações poderão ser feitas de forma a melhorar o condicionamento do método.

D. TESTES E COMPARAÇÕES

Vários testes foram realizados medindo o desempenho do modelo Ward estendido com calibração, fazendo comparações com outros métodos tipo Ward e calculando os erros em relação aos resultados exatos obtidos em fluxos de carga do sistema completo.

Foram usados vários métodos de solução para a calibração dos ramos fictícios com o objetivo de melhorar estudar o comportamento do modelo. Os parâmetros de medida usados foram os fluxos de potência ativa e reativa, baseado nos quais se mediam os erros.

1. Condições dos testes

Os testes aqui descritos foram feitos usando-se o mesmo sistema indicado na figura IV.9, cujos dados estão no item III.D.1, nas tabelas III.1 a III.4. Este sistema apresenta um mau condicionamento, quanto à constituição e operação, em relação aos sistemas encontrados na prática, o que implica em condições mais adversas para os testes e uma expectativa de resultados ainda melhores na maioria dos casos mais próximos da realidade.

O motivo desta escolha é baseado no fato de que muitas vezes tem-se que construir um equivalente em um sistema que já está reduzido. Assim tem-se originalmente um sistema bem condicionado, perdendo esta característica ao ser reduzido pela primeira vez, tendo-se então um sistema mau condicionado para uma segunda redução.

O modelo Ward estendido utilizado, inclusive para as comparações, é o da versão com barras PV fictícias e ramos fictícios com condutâncias e susceptâncias.

Foram simuladas várias contingências, envolvendo todas as linhas de interligação, não se simulando saídas das linhas de dentro do sistema interno, devido à fraca interação destas linhas com o sistema externo. Como o modelo com calibração pressupõe uma contingência, através da qual são feitas as correções dos ramos fictícios, quando da aplicação do mesmo, diz-se que ele é baseado na referida contingência.

Os cálculos de erros foram feitos separadamente para os fluxos de ativos e reativos conforme serão mostrados. Foram observados os fluxos em todas as ligações do sistema teste, inclusive nas ligações equivalentes fronteira-fronteira e nas linhas internas, embora estas últimas tenham apresentado fluxos com muito pouca variação.

2. Testes realizados

Para cada contingência foram processados fluxos de carga, usando vários modelos de equivalentes e também um fluxo exato com o sistema completo. Os equivalentes usados foram o Ward com ajuste na fronteira, o Ward estendido com barras fictícias e várias versões do Ward estendido com calibração.

Para cada forma de calibração dos ramos fictícios aqui aplicada, usaram-se duas versões, sendo a primeira com somente uma correção de fluxo para cada barra fronteira e a segunda com correções de fluxos em todas as ligações termi

nadas em cada barra fronteira, identificando-se a primeira versão com o número 1 e a segunda com o número 2.

Nos testes realizados usou-se um primeiro modelo onde corrigem-se os fluxos de ativos e reativos, modificando-se as resistências e reatâncias dos ramos fictícios. O cálculo da admitância incremental que modifica o ramo fictício é feito a partir dos erros nos fluxos usando-se fórmulas completas e este modelo é indicado com a sigla WEC-A.

Em outro modelo corrige-se somente os fluxos de reativos mas modificam-se as resistências e reatâncias dos ramos fictícios, ou seja, a partir de erros detetados nos reativos calculam-se admitâncias incrementais que modificarão os ramos fictícios. Este cálculo também é feito com fórmulas tradicionais e indica-se o modelo como sendo WEC-B.

Um terceiro teste foi feito corrigindo-se os fluxos de ativos e reativos, porém abandonando-se a parte ativa da admitância incremental encontrada. Usaram-se também as fórmulas completas e a sigla para identificação é WEC-C.

Finalmente no último modelo corrigem-se somente os fluxos de reativos e modificam-se apenas as partes imaginárias dos ramos fictícios. Neste caso usa-se fórmula do fluxo de carga desacoplado, tal como no exemplo feito em IV.C.3, e a designação é feita por WEC-D.

Para facilitar as explicações numeram-se as contingências conforme indicado:

- contingência 1 : saída da linha 4 - 1
- contingência 2 : saída da linha 4 - 2
- contingência 3 : saída da linha 3 - 1

Conforme já explicado, a calibração do Ward entendido é feita tomando-se como base uma contingência. Designa-se qual contingência serve de base pela sigla CT-n, onde n é o número da referida contingência.

Nem todos os modelos foram repetidos em todas as contingências, empregando-se mais vezes as versões que melhores resultados apresentaram.

Seguem-se as tabelas com resultados de testes realizados, chamando-se mais uma vez a atenção para o fato dos erros estarem indicados separadamente para os fluxos ativos e reativos. As colunas indicadas por Ward mostram os resultados com o método Ward com ajuste na fronteira e as indicadas por WE mostram o Ward estendido.

A linha 4-3 não existe fisicamente no sistema testado, se constituindo em uma ligação resultante exclusivamente dos equivalentes. Entretanto os fluxos desta ligação constam das tabelas sendo que os valores dos fluxos exatos foram estimados usando-se os valores das tensões exatas das barras (3) e (4) e a admitância 3 - 4 do equivalente Ward estendido.

TABELA IV.2

RESULTADOS APRESENTADOS PARA A
CONTINGÊNCIA 1

LINHA	EXATO		WARD		WE		WEC-A1 CT-1		WEC-A2 CT-1		WEC-B1 CT-1	
	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)
3 - 1	0,0171 -j0,1944	0	0,0175 -j0,2329	2,3 19,8	0,0174 -j0,2058	1,8 5,9	0,0170 j0,2030	-0,6 4,4	0,0161 -j0,1999	-5,9 2,8	0,0170 -j0,2029	-0,6 4,4
4 - 2	-0,2905 -j0,1341	0	-0,2907 -j0,1638	0,1 22,2	-0,2902 -j0,1165	-0,1 -13,1	-0,2903 -j0,1285	-0,1 -4,2	-0,2906 -j0,1273	0,0 -5,1	-0,2903 -j0,1275	-0,1 -4,9
4 - 3	-0,1303 * -j0,0914	0	-0,1302 -j0,0805	-0,1 -11,9	-0,1301 -j0,0814	-0,2 -10,9	-0,1300 -j0,0857	-0,2 -6,2	-0,1298 -j0,0870	-0,4 -4,8	-0,1300 -j0,0855	-0,2 -6,5
1 - 2	0,3150 +j0,9213	0	0,3145 +j0,9215	-0,2 0,0	0,3143 +j0,9215	-0,2 0,0	0,3144 +j0,9215	-0,2 0,0	0,3147 +j0,9214	-0,1 0,0	0,3144 +j0,9215	-0,2 0,0

* Valor estimado

TABELA IV.2 (Cont.)
 RESULTADOS APRESENTADOS PARA A
 CONTINGENCIA 1

LINHA	WEC-B2 CT-1		WEC-C1 CT-1		WEC-C2 CT-1		WEC-D1 CT-1		WEC-D2 CT-1	
	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)
3 - 1	0,0162 -j0,1999	-5,3 2,8	0,0171 -j0,2032	0,0 4,5	0,0171 -j0,2008	0,0 3,3	0,0170 -j0,2030	-0,6 4,4	0,0170 -j0,2003	-0,6 3,0
4 - 2	-0,2906 -j0,1265	0,0 -5,7	-0,2904 -j0,1243	0,0 -7,3	-0,2903 -j0,1235	-0,1 -7,9	-0,2904 -j0,1256	0,0 -6,3	-0,2904 -j0,1246	0,0 -7,1
4 - 3	-0,1298 -j0,0868	-0,4 -5,0	-0,1301 -j0,0846	-0,2 -7,4	-0,1301 -j0,0856	-0,2 -6,4	-0,1301 -j0,0850	-0,2 -7,0	-0,1301 -j0,0861	-0,2 -5,8
1 - 2	0,3146 +j0,9214	-0,1 0,0	0,3145 +j0,9214	-0,2 0,0	0,3144 +j0,9215	-0,2 0,0	0,3146 +j0,9214	-0,1 0,0	0,3145 +j0,9215	-0,2 0,0

TABELA IV.3

RESULTADOS APRESENTADOS PARA A

CONTINGÊNCIA 2

LINHA	EXATO		WARD		WE		WEC-A1 CT-1		WEC-A2 CT-1	
	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)
3 - 1	0,0074 -j0,1765	0	0,0068 -j0,1731	-8,1 -1,9	0,0074 -j0,1761	0,0 -0,2	0,0071 -j0,1762	-4,1 -0,2	0,0062 -j0,1761	-16,2 -0,2
4 - 1	-0,2800 -j0,2193	0	-0,2796 -j0,2167	-0,1 -1,2	-0,2796 -j0,2207	-0,1 0,6	-0,2797 -j0,2196	-0,1 0,1	-0,2800 -j0,2196	0,0 0,1
4 - 3	* -0,1407 -j0,0239	0	-0,1413 -j0,0248	0,4 3,8	-0,1405 -j0,0248	-0,1 3,8	-0,1404 -j0,0243	-0,2 1,7	-0,1401 -j0,0243	-0,4 1,7
1 - 2	0,1685 +j0,9709	0	0,1685 +j0,9709	0,0 0,0	0,1685 +j0,9709	0,0 0,0	0,1685 +j0,9709	0,0 0,0	0,1685 +j0,9709	0,0 0,0

* Valor estimado

TABELA IV.4

RESULTADOS APRESENTADOS PARA A

CONTINGÊNCIA 3

LINHA	EXATO		WARD		WE		WEC-A1 CT-1		WEC-A2 CT-1		WEC-B1 CT-1	
	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)
4 - 1	0,1420 -j0,2913	0	-0,1423 -j0,3503	0,2 20,3	-0,1425 -j0,2974	0,4 2,1	0,1425 -j0,2943	0,4 1,0	0,1426 -j0,2921	0,4 0,3	0,1425 -j0,2942	0,4 1,0
4 - 2	-0,1310 +j0,0506	0	-0,1345 -j0,0746	2,7 247,4	-0,1320 +j0,0377	0,8 -25,5	-0,1319 +j0,0442	0,7 -12,7	-0,1319 +j0,0488	0,7 -3,6	-0,1319 +j0,0443	0,7 -12,5
4 - 3	-0,1450 * +j0,0361	0	-0,1441 +j0,1819	-0,6 403,9	-0,1458 +j0,0246	0,6 -31,9	-0,1458 +j0,0119	0,6 -67,0	-0,1456 +j0,0045	0,4 -87,3	-0,1458 +j0,0118	0,6 -67,3
1 - 2	0,2341 +j0,9485	0	0,2355 +j0,9480	0,6 -0,1	0,2345 +j0,9484	0,2 0,0	0,2345 +j0,9484	0,2 0,0	0,2345 +j0,9484	0,2 0,0	0,2345 +j0,9484	0,2 0,0

* Valor estimado

TABELA IV.4 (Cont.)
 RESULTADOS APRESENTADOS PARA A
 CONTINGÊNCIA 3

LINHA	WEC-C2 CT-1		WEC-C2 CT-3		WEC-D1 CT-3		WEC-D2 CT-3		WEC-D2 CT-1	
	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)
4 - 1	-0,1425	0,4	-0,1426	0,4	-0,1425	0,4	-0,1427	0,5	-0,1425	0,4
	-j0,2926	0,5	-j0,2947	1,2	-j0,2968	1,9	-j0,2944	1,1	-j0,2923	0,3
4 - 2	0,1317	0,5	-0,1320	0,8	-0,1320	0,8	-0,1321	0,8	-0,1317	0,5
	+j0,0477	-5,7	+j0,0433	-14,4	+j0,0388	-23,3	+j0,0440	-13,0	+j0,0484	-4,4
4 - 3	-0,1460	0,7	-0,1457	0,5	-0,1457	0,5	-0,1456	0,4	-0,1460	0,7
	+j0,0069	-80,9	+j0,0285	-21,0	+j0,0283	-21,6	+j0,0290	-19,7	+j0,0055	-84,8
1 - 2	0,2344	0,1	0,2346	0,2	0,2346	0,2	0,2346	0,2	0,2344	0,1
	+j0,9484	0,0	+j0,9484	0,0	+j0,9484	0,0	+j0,9483	0,0	+j0,9484	0,0

3. Análise dos desempenhos

As várias versões do Ward estendido com calibração apresentam em geral redução dos erros em relação ao método Ward e mesmo ao Ward estendido, embora algumas destas versões apresentem em pontos específicos um desempenho insatisfatório.

É o caso por exemplo do método WEC-A2 que na contingência 2 com CT-1 apresenta um aumento do erro de ativos na linha 3-1, repetindo-se o efeito na contingência 1 também com CT-1, na mesma linha. Também o método WEC-B2 apresenta o mesmo problema na contingência 1 com CT-1, linha 3-1.

Já os métodos WEC-C2 e WEC-D2 apresentam desempenhos bem melhores, principalmente na contingência 3. Pode-se observar também que os modelos com calibração apresentam resultados bem mais favoráveis nas ocasiões onde a contingência testada é a mesma que serviu de base para a correção, o que era de se esperar.

Os modelos com correção em um fluxo por barra fronteira apresentam o inconveniente da definição de qual fluxo deva ser escolhido para correção. Entretanto pode-se destacar os desempenhos dos modelos WEC-A1 e WEC-B1 como bastante satisfatórios.

Os testes são obviamente insuficientes para assegurar uma avaliação confiável e definitiva sobre o método Ward estendido com calibração e suas diversas versões, servindo entretanto para mostrar uma viabilidade de aplicação que merece ser aprofundada.

Ver apêndice.

CAPÍTULO V

TÉCNICAS DE ESPARSIDADE

A eficiência na utilização de computadores é um dos fatores críticos no controle dos sistemas elétricos interligados, sendo as técnicas de esparsidade empregadas um dos aspectos fundamentais desta eficiência.

Convém frizar que as técnicas de esparsidade e os programas aqui apresentados não foram usados nos capítulos anteriores, para obtenção dos diversos equivalentes, já que foram desenvolvidos separadamente e em paralelo. Este é um estudo de equipe e o objetivo de sua inclusão nesta dissertação é o de facilitar a atividade daqueles que desejarem continuar este trabalho, ou mesmo utilizá-lo, possibilitando o emprego das técnicas na obtenção dos equivalentes |31,32,33,34|.

A. ESTRUTURAS DE DADOS

As informações relativas a um sistema elétrico de potência possuem características de estrutura e dinâmica próprias que as individualizam |35, 36|.

A estrutura é o conjunto de relações que ligam cada peça de informação a outras, constituindo-se estas relações na própria estrutura física do sistema. A dinâmica é a mudança contínua a que estão sujeitos o valor das peças e suas relações. Estas características requerem um tipo de apresentação computacional, tanto das peças, como da estrutura, de maneira que a dinâmica do sistema possa ser adequadamente simulada.

1. Conceitos introdutórios

Uma estrutura poderá ser explicitada, usando-se para cada peça informativa um retângulo, contendo o valor da peça, e para cada relação uma seta ligando dois retângulos.

A figura V.1 explica esta representação, mostrando as barras 5 e 3 interligadas por linhas de impedâncias 0,10 pu e 0,15 pu. O conjunto das linhas que saem da barra 5 é identificado pelo próprio número 5, enquanto que o conjunto, mais reduzido, das linhas de 5 a 3 identifica-se por (5,3). Para se especificar as várias linhas, usa-se um número de circuito para cada uma, ficando portanto a linha de impedância 0,15 pu da figura V.1 identificado como circuito 1 e a de 0,10 pu como circuito 2.

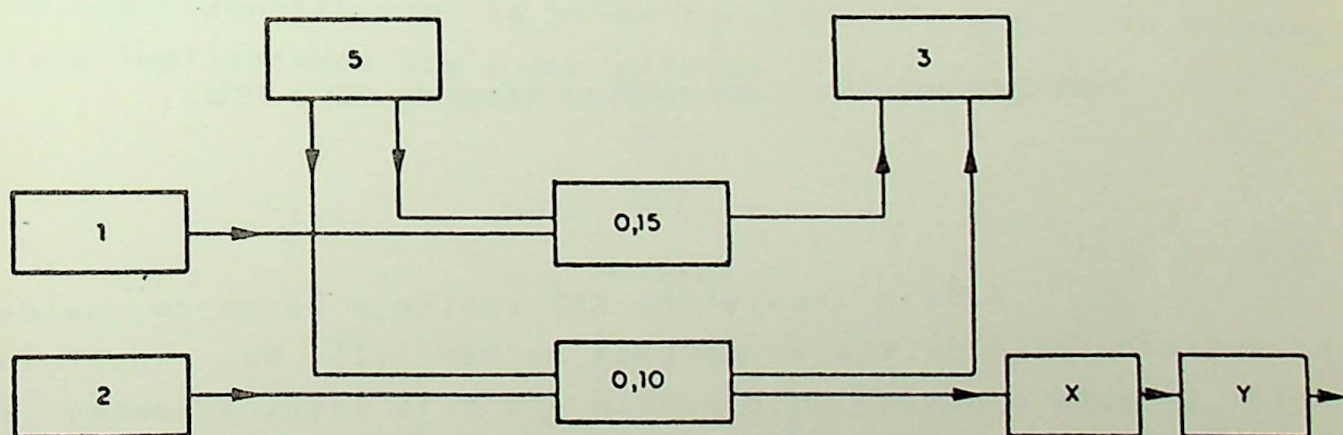


Fig.V.1- Representação de uma estrutura em sistemas elétricos de potência

O conjunto ordenado de identificadores (5,3,1), chamado de chave, assinala inequivocamente a peça de informação 0,15. Para procurar a impedância de uma linha basta procurar o correspondente valor de chave no catálogo de linhas, tarefa designada por busca por chave. Outras informações sobre

uma linha, tais como X, Y, etc., podem ser incluídas ligando-se mais retângulos como na figura IV.1. A determinação de uma chave de linha possuindo determinados itens, ou informações é um outro tipo de procura chamada de busca associativa ou por conteúdo.

O tipo de representação envolvido nas situações anteriores pode ser implementado em Fortran empregando-se variáveis indexadas. A variável indexada KEY contém a chave e a TEM o valor, ou valores, da linha, isto é, um item de informação, como indicado na figura V.2.

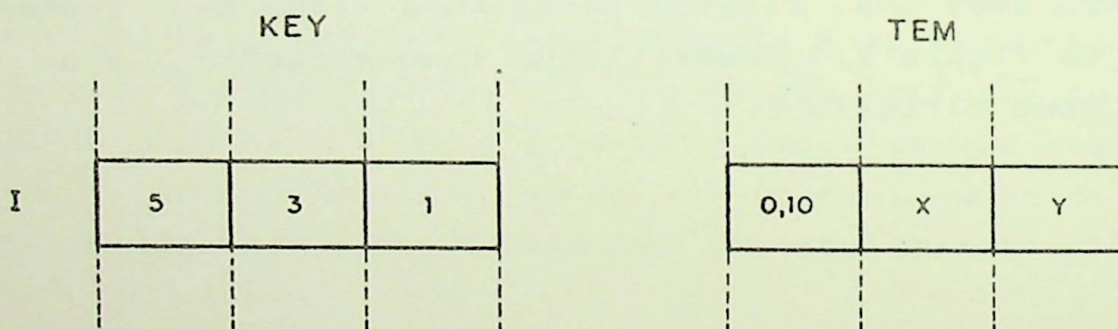


Fig. V. 2 - Representação das variáveis indexadas KEY e TEM

A fila l -ésima de KEY contém a barra de saída na posição KEY(1,1) e a de chegada na KEY(1,2). Na posição KEY(1,3) está o número do circuito e a fila inteira contém a chave da linha.

A busca por chave na lista, ou a busca de um item é feita como se mostra a seguir, onde a subrotina BUSC coloca em LUG a posição da linha procurada, sendo que LUG = 0 indica que a linha não está na lista.

```

SUBROTINE BUSC (K1,K2,K3,KEY)
LUG = 0
BOOLEAN (B1,B2,B3)
DO 1 I = 1,NKEY
B1 = K1.EQ.KEY(I,1)
B2 = K2.EQ.KEY(I,2)
B3 = K3.EQ.KEY(I,3)
IF (B1.AND.B2.AN.B3) GO TO 2
1 CONTINUE
2 LUG = I
RETURN
END

```

A subrotina BUSC apresentada é ineficiente, podendo ser feita uma busca rápida. Em outras palavras a busca de uma linha pode efetuar-se com muito maior rapidez, agregando-se a estrutura que revele a associação dos itens como, por exemplo, linhas que saem da mesma barra possuem o mesmo número como identificador na primeira coluna de KEY. Esta estrutura é implementada com o ponteiro da figura V.3.

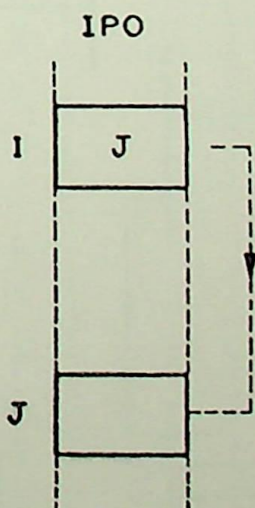


Fig.V. 3 - Variável indexada IPO com ponteiro J

A implementação adicional da estrutura em Fortran é introduzida com a noção de ponteiro, e para tanto uti

liza-se a variável indexada IPO, do mesmo número de filas que KEY e TEM. A idéia consiste em colocar na posição IPO(1) o número J da posição em KEY de uma outra linha, saindo da mesma barra que a linha I-ésima, ou seja, IPO(1) indica a posição J de outra linha que também sai da mesma barra que a linha da posição I. Diz-se assim que apontamos a linha J desde a linha I, conforme a figura V.3, podendo-se ver que o ponteiro J materializa as setas empregadas na figura V.1 para indicar o relacionamento dos itens

Para concretizar a mecânica da criação dos ponteiros admite-se que a linha apontada seja a seguinte na ordem dos índices de KEY e TEM. Começa-se então pela linha que sai da barra e tem o menor índice, continuando-se, até a última linha que também sai da referida barra. Para revelar que uma linha é a última saindo da barra, coloca-se o valor zero na correspondente posição do IPO. A figura V.4 dá um exemplo de aplicação, com resultados na figura V.5.

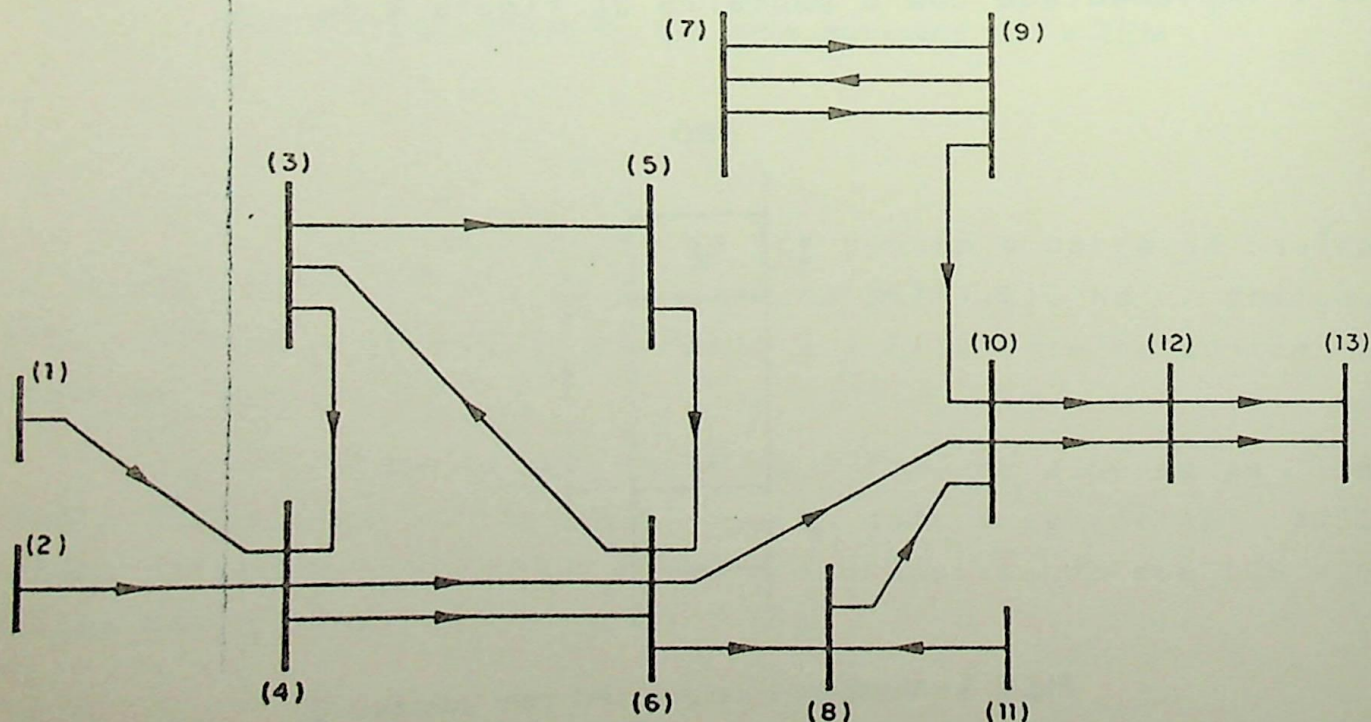


Fig.V.4 - Exemplo de sistema para implantação das variáveis indexadas IPO e KOM

Precisa-se ainda de um meio para se saber onde começa a lista de linhas saindo da barra. Para isto introduz-se uma nova variável indexada, unidimensional KOM, de dimensão igual ao número de barras, colocando-se em KOM(K) o endereço da primeira linha entre as que saem da barra K, sendo este endereço o número da posição em KEY e TEM.

Um exemplo de aplicação com o sistema da figura V.4 resulta nas variáveis indexadas mostradas na figura V.5. Imagine-se que a lista KEY está formada na ordem indicada na figura sendo esta uma ordem ao acaso, já que a informação de cada linha está armazenada em um cartão e estes estão colocados aleatoriamente.

nº de linha	KEY			IPO	nº de barra	KOM
1	3	4	0	6	1	5
2	9	7	0	16	2	9
3	5	6	0	0	3	1
4	10	12	1	8	4	12
5	1	4	0	0	5	3
6	3	5	0	0	6	13
7	8	10	0	0	7	10
8	10	12	2	0	8	7
9	2	4	0	0	9	2
10	7	9	1	19	10	4
11	11	8	0	0	11	11
12	4	6	1	17	12	14
13	6	10	0	18	13	0
14	12	13	1	15		
15	12	13	2	0		
16	9	10	0	0		
17	4	6	2	0		
18	6	3	0	20		
19	7	9	2	0		
20	6	8	0	0		

barra de saída barra de chegada número de circuito

Fig. V.5 - Conjunto de variáveis indexadas do sistema da figura V.4

Como exemplo pode-se acompanhar a lista de linhas saindo da barra 6. A posição da primeira linha saindo de 6 está em $KOM(6) = 13$ e a inspeção da primeira coluna de KEY, que contém as barras de saída, permite constatar que, efetivamente, a primeira linha que sai da barra 6 em KEY ocupa a posição 13, sendo a linha que chega a barra 10, como indica a posição $KEY(13,2) = 10$. Em seguida, observando-se em IPO o valor associado a esta linha tem-se o endereço da próxima linha que sai da barra 6, isto é, $IPO(13) = 18$. Na posição 18 de KEY encontra-se a linha saindo de 6 e chegando a 3, tendo-se associado a esta linha o endereço da próxima, dado por $IPO(18) = 20$. Em KEY, na posição 20, está a linha de 6 à 8 e o IPO correspondente é zero, ou seja, $IPO(20) = 0$, indicando ser esta a última linha em KEY saindo de 6.

Para o caso da barra 13, a inspeção em KOM mostra que $KOM(13) = 0$, revelando que não existem linhas saindo de 13 como pode ser constatado em KEY e na figura V.4.

2. Implementação computacional

Dispondo de IPO e KOM a subrotina de busca de uma linha pode ser reduzida à inspeção apenas das linhas que têm mesma barra de saída que a linha procurada. Pode-se fazer a investigação destas linhas percorrendo a lista mediante a instrução fundamental:

$$I = IPO(I)$$

Se I é a posição de uma das linhas da lista, esta instrução coloca em I a posição da linha seguinte que sai da mesma barra, como no exemplo:

$$I = IPO(13) = 18$$

que equivale a pular de 13 para 18, isto é, da linha 6-10 pa

ra a linha 6-3.

O valor inicial de I deve ser naturalmente KOM(K1), onde K1 é a barra de saída da linha procurada. No caso de KOM(K1) = 0, a subrotina retorna imediatamente com LUG = 0, revelando a ausência da linha procurada. Quando a instrução fundamental atribui a I o valor zero, significa o fim da lista de linhas que saem de K1. Para cada I testam-se KEY(2) e KEY(3) contra K2 e K3, onde K2 é a barra para onde a linha vai, ou barra de entrada, e K3 é o número de circuito da linha. Enquanto o teste deu negativo continua-se pulando as linhas.

A nova rotina, de busca rápida, é dada em seguida com o fluxograma correspondente na figura V.6.

```

SUBROUTINE BUSC (K1,K2,K3,KEY,IPO,KOM)
  LUG = 0
  BOOLEAN (B2,B3)
  I = KOM(K1)
1 IF (I.EQ.0) GO TO 3
  B2 = K2.EQ.KEY(I2)
  B3 = K3.EQ.KEY(I3)
  IF (B2.AND B3) GO TO 2
  I = IPO(I)
  GO TO 1
2 LUG = I
3 RETURN
  END

```

A rotina apresentada é básica e quase todas as rotinas de pesquisa rápida têm a mesma estrutura de controle, mudando apenas o tipo de teste e a instrução LUG = 1, que pode ser substituída por qualquer outro tipo de ação.

No exemplo das figuras V.4 e V.5 imaginaram-se as variáveis indexadas IPO e KOM já preenchidas com os valores certos. Entretanto, antes de se aplicar a rotina BUSC rápida é necessário montar as duas variáveis, o que pode ser feito com apenas uma "passada" pela variável indexada KEY, is

to é, o preenchimento de IPO e KOM pode ser efetuado com um DO I = 1, NKEY.

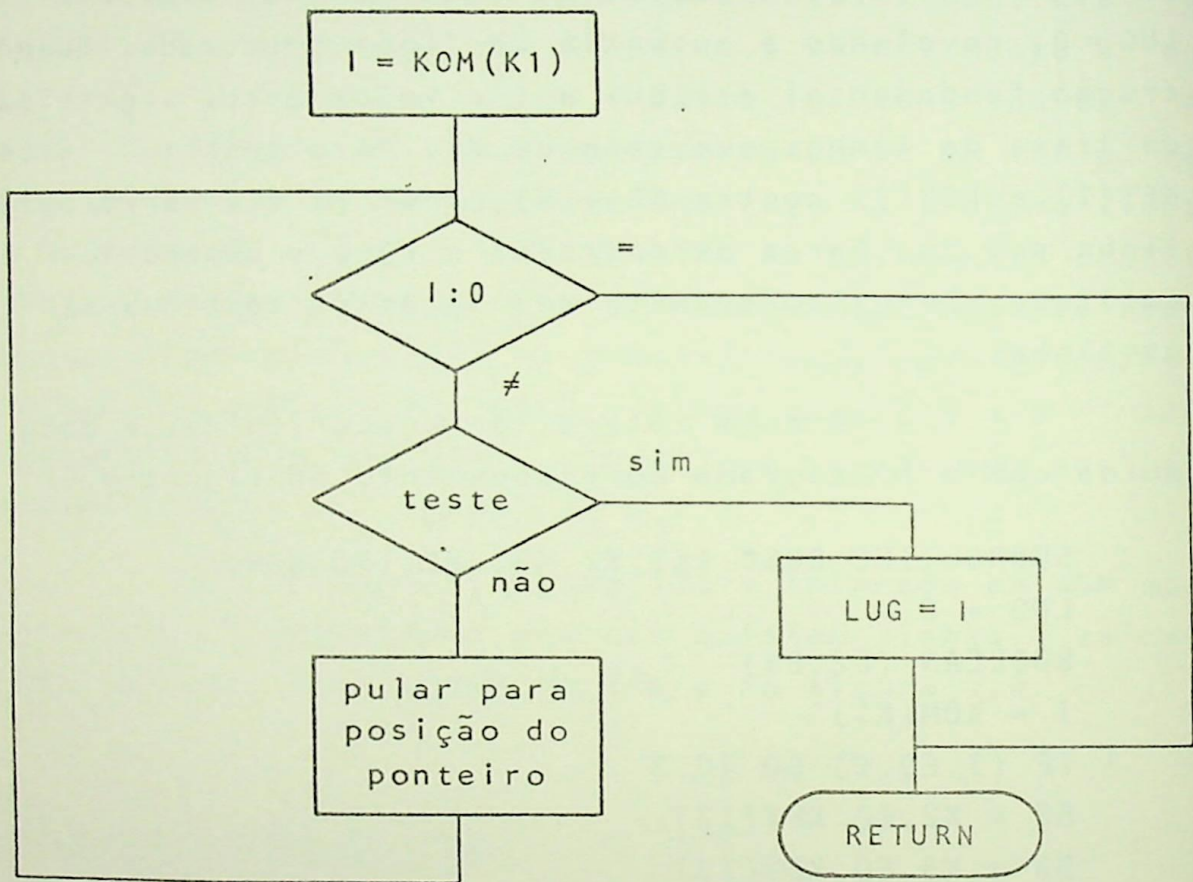


Fig.V.6 - Fluxograma da rotina de busca rápida

A tarefa básica para se construir o IPO é percorrendo a lista de linhas, ao se chegar na I-ésima linha, consultar o valor de KEY(I,1), que fornece a barra de saída da linha I, e então colocar no IPO da última linha investigada, que saia da mesma barra, o valor I. Em outras palavras, a tarefa se constitui em: 1º - em qualquer linha que se chegue, por exemplo, linha I, verifica-se o número da barra de saída desta linha, ou seja, KEY(I,1); 2º - procura-se nas linhas anteriores, já investigadas, a última que tenha a mesma barra de saída da linha I, que será por exemplo a linha J; 3º - co

loca-se em IPO desta última linha o valor 1, ou seja, $IPO(J) = 1$. Com isto cria-se o ponteiro desde a linha J até a linha I.

Percebe-se que é necessário guardar a posição da última linha saindo de cada barra K do sistema. Para isto cria-se uma variável indexada LAST de dimensão igual ao número de barras, ficando as instruções para executar a tarefa básica como descrito:

```

K = KEY(1,1)
J = LAST(K)
IPO(J) = 1
LAST(K) = I

```

Note-se que a quarta instrução atualiza a informação em LAST e portanto daí para frente a última linha saindo de K será a I.

Uma exceção aparece no emprego da tarefa básica quando a linha I é a primeira linha que sai de $K=KEY(1,1)$, não existindo linha anterior desta barra, o que pode ser revelado pelo valor $LAST(K) = 0$. Neste caso o que se deve fazer é colocar em KOM(K) o valor 1, indicando que a lista de barras saindo de K começa com a linha I-ésima. Além disso a variável indexada LAST(K) deve iniciar com zero para todas as barras K, o que pode ser feito com

```

DO 10 K = 1, NBUS
10 LAST(K) = 0

```

Tem-se agora os subsídios para a subrotina completa:

```

SUBROUTINE PONT(KEY,IPO,KOM,LAST)
DIMENSION LAST(NBUS)
DO 2 I = 1,NKEY
K = KEY(I,1)
IF(LAST(K).EQ.0) GO TO 1
J = LAST(K)
IPO(J) = I
GO TO 2
1 KOM(K) = I
2 LAST(K) = I
RETURN
END

```

O comando $LAST(K) = I$ deve ser executado sempre e os conteúdos de KOM e LAST na K-ésima posição são iguais até que se ache uma segunda linha saindo de K.

Possuindo-se as variáveis indexadas IPO e KOM que "costuram" as linhas partindo de uma barra dada, pode-se dispensar a informação contida na primeira coluna de KEY. Desta forma, para se determinar qual é a barra de saída da linha I-ésima é suficiente colocar na variável indexada IPO, em vez do zero que indica última linha, o valor $-K$, onde K é a própria barra de saída ou o $KEY(I,1)$ dispensado. Assim, para uma linha I, consultaria-se o IPO e, caso fosse positivo, pularia-se para a linha indicada, consultando-se novamente o IPO, até que o mesmo fosse negativo. Este valor, com sinal trocado, seria o número da barra de saída da linha I.

A figura V.7 mostra o conjunto de variáveis com esta nova montagem, onde a primeira coluna de KEY que constava na figura V.5 foi eliminada. Para se saber, por exemplo, que valor existia na primeira coluna da fila 10, segue-se a "costura" 10, 19, -7 e como o último número é negativo, o valor procurado é $-(-7) = 7$. O que se fez foi passar da linha 10 em KEY para a mesma linha em IPO, que tem o valor 19, daí para a linha 19 em KEY e para a mesma linha em IPO, dando o valor -7.

	KEY		IPO	KOM	
1	4	0	6	1	5
2	7	0	16	2	9
3	6	0	-5	3	1
4	12	1	8	4	12
5	4	0	-1	5	3
6	5	0	-3	6	13
7	10	0	-8	7	10
8	12	2	-10	8	7
9	4	0	-2	9	2
10	9	1	19	10	4
11	8	0	-11	11	11
12	6	1	17	12	4
13	10	0	18	13	0
14	13	1	15		
15	13	2	-13		
16	10	0	-9		
17	6	2	-4		
18	3	0	20		
19	9	2	-7		
20	8	0	-6		

Fig. V. 7-Variáveis indexadas com nova montagem

Para se montar a variável indexada IPO com a estrutura descrita anteriormente, basta usar-se a própria primeira coluna de KEY, colocando-se sinal negativo em toda a coluna. Em cima desta coluna monta-se a IPO e assim os algarismos são substituídos, com exceção daqueles referentes as últimas linhas onde permanecem então os elementos da primeira coluna KEY, com sinal negativo, indicando a barra de saída da linha.

Pode-se ainda melhorar a rotina de montagem eliminando-se a lista LAST. Esta lista contém, terminada a execução da rotina, os endereços das últimas linhas em KEY

que saem de cada barra do sistema. Se esta informação for necessária, LAST deverá ser declarada no programa principal.

Entretanto, quando LAST não for útil, ela pode ser poupada, explorando-se a idéia de fazer a pesquisa em KEY no sentido inverso, ou seja, do final para o princípio. Neste caso a variável KOM pode fazer o trabalho sozinha pois a informação contida ao final será justamente a posição das primeiras linhas, ou das últimas na pesquisa inversa, que saem de cada barra do sistema.

```
SUBROUTINE PONT(KEY,IPO,KOM)
DO 1 II = 1,NKEY
I = NKEY+1-II
K = KEY(I,1)
IF(KOM(K).EQ.0) GO TO 1
J = KOM(K)
IPO(I) = J
1 KOM(K) = I
RETURN
```

A nova rotina PONT aplicada ao sistema da figura V.4 dá os resultados indicados na figura V.8.

II	I	K	J	IPO(I)	KOM(K)
1	20	6	-	0	20
2	19	7	-	0	19
3	18	6	20	20	18
4	17	4	-	0	17
5	16	9	-	0	16
6	15	12	-	0	15
7	14	12	15	15	14
8	13	6	18	18	13
9	12	4	17	17	12
10	11	11	-	0	11
11	10	7	19	19	10
12	9	2	-	0	9
13	8	10	-	0	8
14	7	8	-	0	7
15	6	3	-	0	6
16	5	1	-	0	5
17	4	10	8	8	4
18	3	5	-	0	3
19	2	9	16	16	2
20	1	3	6	6	1

Fig.V.8 - Valores assumidos na execução da rotina PONT

O conteúdo final da variável KOM é o indicado na figura V.9.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
KOM	5	9	1	12	3	13	10	7	2	4	11	14	0

Fig.V.9 - Valores de KOM(k) ao fim da execução da rotina PONT

Tanto como a rotina BUSC, a PONT é também básica na montagem de estrutura adicional através de ponteiros. A estrutura de controle é praticamente a mesma em quase todas as rotinas desta espécie, mudando apenas as tarefas efetuadas.

Outras formas de busca podem ser usadas, tal como achar todas as linhas "penduradas" a uma barra, ou seja, as linhas que saem ou entram na barra. Para isto pode-se montar uma variável IPO dupla e, além disso, explorando a observação sobre dispensa de informação em KEY, pode-se eliminar as suas duas primeiras colunas.

A primeira coluna de IPO conterá a "costura" das barras que têm K por barra de saída e a segunda das que têm a mesma K por barra de chegada. A última linha de saída poderá conter, na primeira coluna de IPO o valor negativo da posição da primeira linha de chegada, amarrando assim as "costuras" de saída e chegada.

A figura V.10 mostra as variáveis IPO e KOM montadas desta forma. Na figura pode-se obter o conjunto de linhas penduradas na barra 6 percorrendo primeiro a "costura" de saída, primeira coluna de IPO, a partir de $KOM(6) = 13$. Obtém-se assim primeiramente a linha 13, em seguida, a 18, obtida na IPO, e daí a 20. Segue-se para a posição 20 de IPO e o valor de $IPO(20,1)$ não é, como antes, igual a zero, mas sim -3, indicando que a "costura" continua na posição 3, com a primeira das linhas de chegada. Seguindo-se agora os ponteiros na segunda coluna do novo IPO tem-se $IPO(3,2) = 12$, $IPO(12,2) = 17$ e finalmente $IPO(17,2) = 0$, que indica a última das barras de chegada. O novo IPO substitui desta forma o antigo KEY.

É claro que este método serve também para obter apenas as barras de chegada, bastando para isto esperar até chegar ao valor negativo e começar a considerar apenas na segunda coluna. A detecção do fim das barras de saída será feita com a instrução:

```
IF(IPO(1,1).LT.0)
```


	IPO			KOM
1	6	5	1	5
2	16	0	2	9
3	-6	12	3	1
4	8	8	4	12
5	0	0	5	3
6	-18	0	6	13
7	-11	13	7	10
8	-7	0	8	7
9	0	0	9	2
10	19	19	10	4
11	0	20	11	11
12	17	17	12	14
13	18	16	13	0
14	15	15		
15	-4	0		
16	-10	0		
17	-1	0		
18	20	0		
19	-2	0		
20	-3	0		

Fig. V. 10 - Busca de linhas "penduradas" em uma barra

Caso se precisasse identificar as barras de saída e chegada adotaria-se a alternativa de colocar -K na segunda coluna das posições das últimas linhas de cada barra e duplicar a variável indexada KOM para agregar as posições das primeiras linhas de chegada. As procuras das barras de saída e chegada seriam efetuadas seguindo-se as correspondentes "costuras" na primeira e segunda coluna de IPO, como pode ser verificado na figura V.11, referente ao mesmo sistema dos exemplos anteriores.

IPO		KOM	
1	6	5	0
2	16	-7	0
3	-5	12	18
4	8	-8	1
5	-1	9	6
6	-3	-5	13
7	-8	13	2
8	-10	-12	7
9	-2	-4	11
10	19	19	2
11	-11	20	10
12	17	17	4
13	18	-16	7
14	15	15	11
15	-12	-13	2
16	-9	-10	10
17	-4	-6	4
18	20	-3	7
19	-7	-9	0
20	-6	-8	14

Fig. V. 11- Busca de linhas de saída e chegada

Na figura V.11 a "costura" da barra 6 é feita começando-se em $KOM(6,1) = 13$, passando-se para $IPO(13,1) = 18$, $IPO(18,1) = 20$ e $IPO(20,1) = -6$. Este último valor negativo, que é o da própria barra pesquisada, indica que terminaram as linhas de saída e que se deve passar para as linhas de chegada. Então passa-se para $KOM(6,2) = 3$ e daí para $IPO(3,2) = 12$, $IPO(12,2) = 17$ e como $IPO(17,2) = -6$, sabe-se que 17 é a última linha de chegada em 6.

Um problema que assume especial importância tanto na montagem de ZBUS, estudos de falta, como na solução de

equações lineares, fluxo de carga, é a procura de barras parceiras.

Ao longo da busca das linhas "penduradas" em uma barra K, deseja-se obter as barras parceiras, isto é, a chada uma linha ligada a K, determinar o número da outra bar ra desta linha. O esquema da figura V.11 é mais conveniente para este propósito, sendo que a busca das linhas "penduradas" na barra K é feita como segue:

```

SUBROUTINE ACHE(K,IPO,KOM)
M = 1
1 I = KOM(K,M)
2 IF (I.LT.0) GO TO 3
. . . . .
I = IPO(I,M)
GO TO 2
3 M = M+1
IF (M.GT.2) GO TO 4
GO TO 1
4 RETURN
END

```

A linha pontilhada representa alguma ação ou conjunto de ações efetuadas em relação à linha encontrada. Se para estas ações for necessário a barra parceira de K, chama-se a rotina PARC, descrita adiante.

Por exemplo, a busca de linhas "penduradas" na barra 6 determina o seguinte funcionamento da rotina ACHE, de acordo com a figura V.11. Começa com $M = 1$, faz $I = KOM(6,1) = 13$ e, após as ações das linhas pontilhadas, faz $I = IPO(13,1) = 18$. Repete as ações e faz $I = IPO(18,1) = 20$, repete as ações novamente e faz $I = IPO(20,1) = -6$. Neste ponto é detetado $I.LT.0$ e vai para instrução 3 com $M = 1+1 = 2$. Volta então para 1 e faz $I = KOM(6,2) = 3$, repete as ações e faz $I = IPO(3,2) = 12$, repete as ações e faz $I = IPO(12,2) = 17$, repete mais uma vez as ações e faz $I = IPO(17,2) = -6$. Aqui é detetado pela segunda vez $I.LT.0$ e vai novamente para a instrução 3 com $M = 2+1 = 3$.

Agora é detetado M.GT.2, indo para 4, concluindo a execução.

Contabilizando as ações das linhas pontilhadas, nota-se que elas são feitas para $l = 13, 18, 20, 3, 12$ e 17 , o que pode ser confirmado nas figuras V.4 e V.5.

A busca da barra parceira é feita mediante a rotina seguinte onde o número da barra parceira fica armazenado na variável KP.

```

SUBROUTINE PARC (I,M,IPO,KP)
MP = 3 - M
L = IPO(I,MP)
1 IF (L.LT.0) GO TO 2
L = IPO(L,MP)
GO TO 1
2 KP = -L

```

A rotina, em primeiro lugar, muda para a coluna MP, contrária daquela pesquisada. Em seguida avança por esta coluna até achar o final, onde está armazenado o número da barra originária da "costura" seguida.

Por exemplo, seja a linha 12 achada durante a aplicação de ACHE (6,IPO,KOM), a qual tem como barra parceira a de número 4, conforme a figura V.4. O valor de M no momento de se achar a linha 12 era $M = 2$, o que leva a $MP = 3 - 2 = 1$ e $L = IPO(12,1) = 17$, conforme o IPO da figura V.11. Avança-se para $L = IPO(17,1) = -4$ e, como $-4.LT.0$, vai-se para a instrução 2, fazendo-se $KP = -(-4) = 4$.

Note-se que PARC pode ser empregada independentemente de ACHE para procurar barra de saída com $M = 2$, e de entrada, com $M = 1$.

B. SOLUÇÃO DE SISTEMAS LINEARES

1. Introdução

A maior parte dos algoritmos de análise dos sistemas elétricos de potência envolve a solução, às vezes reiteradamente, de sistemas de equações lineares da forma:

$$\underline{A} \underline{X} = \underline{Y} \quad (\text{V.1})$$

onde a matriz \underline{A} é geralmente quadrada, com uma importante exceção nos métodos de estimação, e também é positiva definida, o que implica em bom condicionamento para soluções por métodos não iterativos.

Os métodos mais efetivos para a obtenção do vetor incôgnita \underline{X} a partir de \underline{A} e \underline{Y} , exploram o conceito de decomposição fatorial, ou fatoração. Em princípio, a idéia é determinar uma certa matriz \underline{F} regular, sendo claro que, qualquer que seja \underline{F} :

$$(\underline{F}^{-1}) (\underline{F} \underline{A}) \underline{X} = \underline{Y}$$

Seja agora:

$$\underline{Z} = \underline{F} \underline{A} \underline{X}$$

Então a solução da equação V.1 equivale a solução sucessiva dos sistemas:

$$(\underline{F})^{-1} \underline{Z} = \underline{Y} \quad (\text{V.2})$$

$$(\underline{F} \ \underline{A}) \underline{X} = \underline{Z} \quad (\text{V.3})$$

Da equação V.2 obtém-se \underline{Z} e daí, com a equação V.3, \underline{X} é obtido. A vantagem de se substituir a equação V.1 pelas equações V.2 e V.3, está na possibilidade de se conseguir uma matriz \underline{F} tal que os sistemas V.2 e V.3, com matrizes $(\underline{F})^{-1}$ e $(\underline{F} \ \underline{A})$ respectivamente, sejam, em conjunto, mais fáceis de serem resolvidos do que o sistema V.1, como a matriz \underline{A} , sozinho.

2. Métodos de substituição

Sabe-se que um sistema linear, cuja matriz seja triangular, pode ser facilmente resolvido por um algoritmo chamado de substituição.

Seja:

$$\underline{L} \underline{X} = \underline{Y} \quad (\text{V.4})$$

onde \underline{L} é triangular inferior, isto é, para $i < j$ tem-se $L_{ij} = 0$.

Então, com $i = 1$ resulta que $L_{1j} = 0$, para $j > 1$, e a primeira equação do sistema fica:

$$L_{11} X_1 = Y_1$$

e daí vem

$$X_1 = (L_{11})^{-1} Y_1 \quad (\text{V.5})$$

A segunda equação do sistema indicado em V.4

é:

$$-21 X_1 + L_{22} X_2 = Y_2$$

que modificada fica

$$X_2 = (L_{22})^{-1} (Y_2 - L_{21} X_1)$$

e onde X_1 já foi determinado pela equação V.5.

Generalizando, tem-se, para um i qualquer:

$$X_i = (L_{ii})^{-1} (Y_i - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij} X_j)$$

A implementação em Fortran para este algoritmo, chamado de substituição direta, é dada em seguida.

```

COMPLEX L(M,M), X(M), Y(M)
X(1) = Y(1)/L(1,1)
DO 2 I = 2,M
  II = I - 1
  X(I) = Y(I)
  DO 1 J = 1,II
    1 X(I) = X(I) - L(I,J)*X(J)
  2 X(I) = X(I)/L(I,I)

```

Seja agora o sistema:

$$\underline{H} \underline{X} = \underline{Y}$$

onde \underline{H} é triangular superior, isto é, para $i > j$ tem-se $H_{ij} = 0$. Desenvolvendo-se de forma semelhante tem-se, com i decrescente:

$$X_i = (H_{ii})^{-1} (Y_i - \sum_{j=i+1}^m H_{ij} X_j)$$

e

$$X_m = (H_{mm})^{-1} Y_m$$

Este algoritmo é dito de substituição inversa e logicamente m é a ordem da matriz. A implementação em Fortran é dada em seguida.

```

COMPLEX H(M,M), X(M), Y(M)
X(M) = Y(M)/H(M,M)
DO 2 II = 2,M
I = M - II + 1
X(I) = Y(I)
IL = I + 1
DO 1 J = IL,M
1 X(I) = X(I) - H(I,J)*X(J)
2 X(I) = X(I)/H(I,I)

```

Pode-se também usar um método alternativo de substituição direta, como o que se mostra a seguir.

```

MM = M - 1
DO 1 J = 1,MM
X(J) = Y(J)/L(J,J)
JJ = J + 1
DO 1 I = JJ,M
1 Y(I) = Y(I) - L(I,J)*X(J)
X(M) = Y(M)/L(M,M)

```

Um exemplo de aplicação deste método alternativo é feito com o sistema indicado, onde $M = 3$ e $MM = 2$.

$$3X_1 = 2$$

$$2X_1 + 5X_2 = -3$$

$$-X_1 + 2X_2 + X_3 = 5$$

Para $J = 1$ $X(1) = 2/3$

$JJ = 2$ I vai de 2 até 3

$$Y(2) = Y(2) - L(2,1) \cdot X(1) = -3 - 5(2/3) = -13/3$$

$$Y(3) = Y(3) - L(3,1) \cdot X(1) = 5 - 1(2/3) = 17/3$$

o que significa

$$5X_2 = -13/3$$

$$2X_2 + X_3 = 17/3$$

$$\text{Para } J = 2 \quad X(2) = -13/15$$

$$JJ = 3 \quad \text{I vale 3}$$

$$Y(3) = Y(3) - L(3,2) \cdot X(2) = 17/3 - 2(-13/15) = 111/15$$

Finalmente:

$$X(3) = Y(3)/L(3,3) = (111/15)/1 = 111/15$$

3. Decomposição triangular

Levando-se em conta que a solução de sistemas triangulares é simples e rápida, surge a idéia de se montar uma matriz \underline{F} tal que \underline{F} e $\underline{F} \underline{A}$ fiquem triangulares. Para isto \underline{F} deve zerar os elementos de \underline{A} que fiquem de um lado da diagonal principal. Em vez de se procurar uma forma de zerar de uma só vez, convém estudar um processo gradativo na forma:

$$(\underline{F}_1)^{-1} \quad \text{e} \quad \underline{F}_1 \underline{A}$$

$$(\underline{F}_2 \underline{F}_1)^{-1} \quad \text{e} \quad \underline{F}_2 \underline{F}_1 \underline{A}$$

.....

$$(\underline{F}_{m-1} \cdots \underline{F}_1)^{-1} \text{ e } \underline{F}_{m-1} \cdots \underline{F}_1 \underline{A}$$

A idéia é que, a cada produto \underline{F}_k por $\underline{F}_{k-1} \cdots \underline{F}_1 \underline{A}$, novas posições sejam convenientemente zeradas sem que outras já zeradas voltem a se modificar.

Existem dois métodos que conduzem ao resultado desejado. Antes de apresentar estes métodos porém, deve-se ver como é possível zerar uma posição qualquer (i, j) de \underline{A} conforme indicado na figura V.12, partindo-se do fato que os elementos diagonais de \underline{A} são sempre diferentes de zero e muitas vezes até dominantes. Seja então a matriz $\underline{F}(i, j)$ definida como:

$$(\underline{F}(i, j))_{pp} = 1$$

$$(\underline{F}(i, j))_{ij} = -A_{ij}/A_{jj}$$

$$(\underline{F}(i, j))_{kp} = 0 \quad \text{para } k \neq p \quad \text{e } kp \neq ij$$

Então:

$$(\underline{F}(i, j) \underline{A})_{ij} = \sum_{p=1}^m (\underline{F}(i, j))_{ip} A_{pj} = A_{ij} - (A_{ij}/A_{jj}) A_{jj} = 0$$

$$(\underline{F}(i, j) \underline{A})_{ik} = \sum_{p=1}^m (\underline{F}(i, j))_{ip} A_{pk} = A_{ik} - (A_{ij}/A_{jj}) A_{jk}$$

Logo a posição ij é realmente zerada e, ainda mais, o resto da fila da posição zerada, ou seja, fila i , é modificada em proporção ao elemento da matriz \underline{A} situado na posição dada pela coluna k considerada e pela linha j , chamada linha eliminadora, que é a linha cuja ordem coincide com a ordem da coluna do elemento A_{ij} zerado. A figura V.12 ilustra as modificações efetuadas.

$$E(i, j) =$$

	j	k
j	1	0
i	-A_{ij}/A_{jj} = -A'_{ij}	1

$$E(i, j)A =$$

	j	k
j	A_{jj}	A_{jk}
i	A_{ij} \rightarrow 0	A_{ik} \rightarrow A_{ik} - A'_{ij}A_{jk}

Fig.V.12- Matrizes $E(i, j)$ e $E(i, j)A$ para zerar o elemento A_{ij}

Portanto, se o elemento A_{jk} for nulo, o elemento k da linha i não será modificado. Em outras palavras, se o elemento, proporcional ao qual é feita a modificação, for igual

a zero, logicamente não ocorre esta modificação. Desta forma o princípio básico para não se alterar um elemento já zerado, é colocar um zero na mesma coluna deste elemento, na posição correspondente à linha eliminadora, referente ao elemento que se está zerando. Por exemplo, ao se zerar o elemento A_{pq} , caso não se deseje alterar o elemento A_{pr} por já estar zerado, basta colocar um zero no lugar do elemento A_{qr} .

No chamado método de Gauss, cada linha, numa certa ordem, é empregada para zerar todos os elementos da correspondente sub-coluna inferior, isto é, a fila i -ésima zera todos os A_{pi} com $p > i$. Desta forma é impossível alterar um elemento que já é nulo, pois todos os elementos da coluna, em linhas ainda não empregadas como zeradoras, já são nulos.

A figura V.13 exemplifica o método de Gauss. Ao se zerar a primeira sub-coluna não existe o problema de modificar elementos já zerados. Ao se zerar os elementos 32 e 42 da segunda sub-coluna existiria o risco de se alterar os elementos da sub-coluna já zerada, figura V.13.b. Entretanto a linha eliminadora é a de número 2 e a coluna em questão é a 1, concluindo-se que o elemento ao qual é proporcional a modificação, 21 da figura V.13.b, já é zero, não havendo portanto alteração nos elementos já zerados. Também ao se zerar a posição 43, percebe-se que a linha eliminadora é a de número 3, onde se encontram os elementos 31 e 32 já nulos, o que acarreta a não modificação dos elementos já zerados 41 e 42.

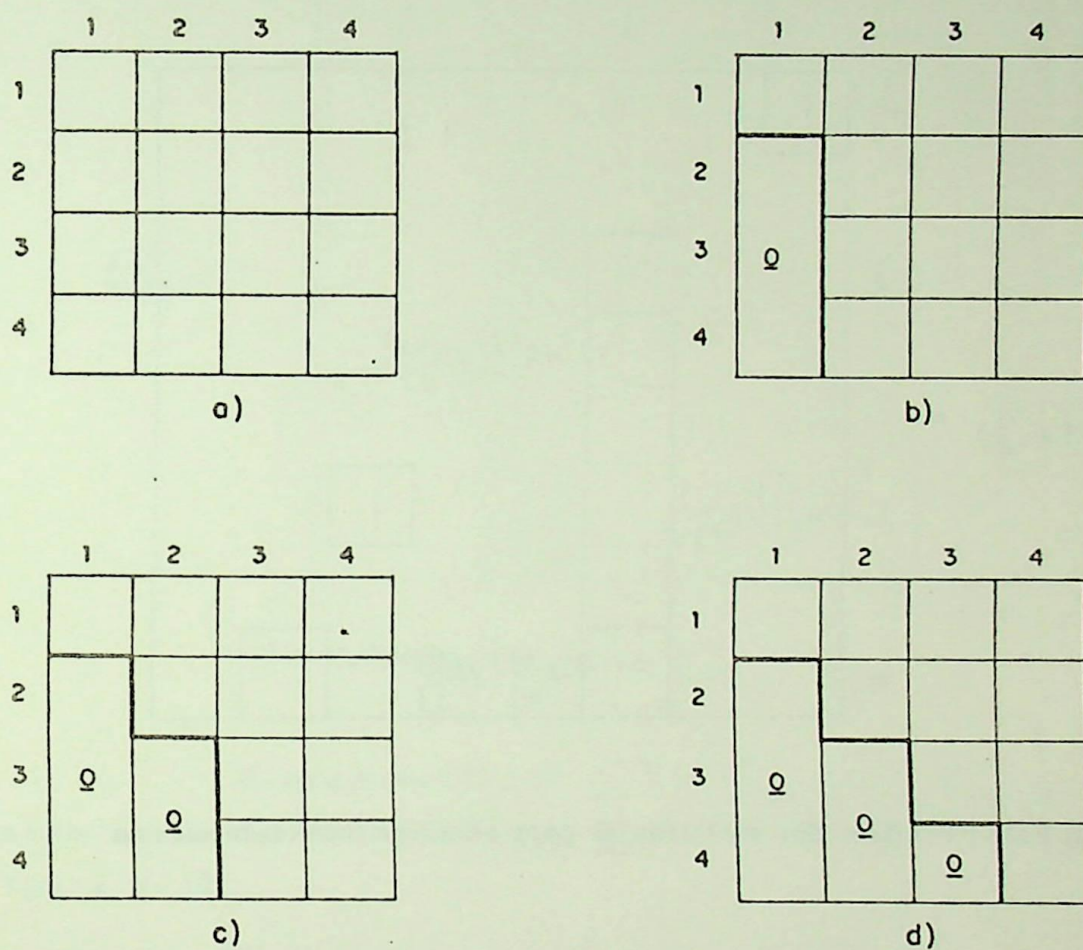


Fig. V. 13 - Aplicação do método de Gauss no processo de triangularização

Note-se ainda que a eliminação ou o tornar nula, a j -ésima sub-coluna inferior é conseguida multiplicando-se a matriz $\underline{A}^{(j)}$ com as colunas 1, ... $j-1$ já zeradas, da seguinte forma:

$$\underline{A}^{(j+1)} = \underline{E}_{(m,j)} \underline{E}_{(m-1,j)} \cdots \underline{E}_{(j+1,j)} \underline{A}^{(j)}$$

onde \underline{m} é a ordem da matriz \underline{A} .

Este produto é abreviado por $\underline{F}_{(*,j)}$ e seu valor é dado na figura V.14.

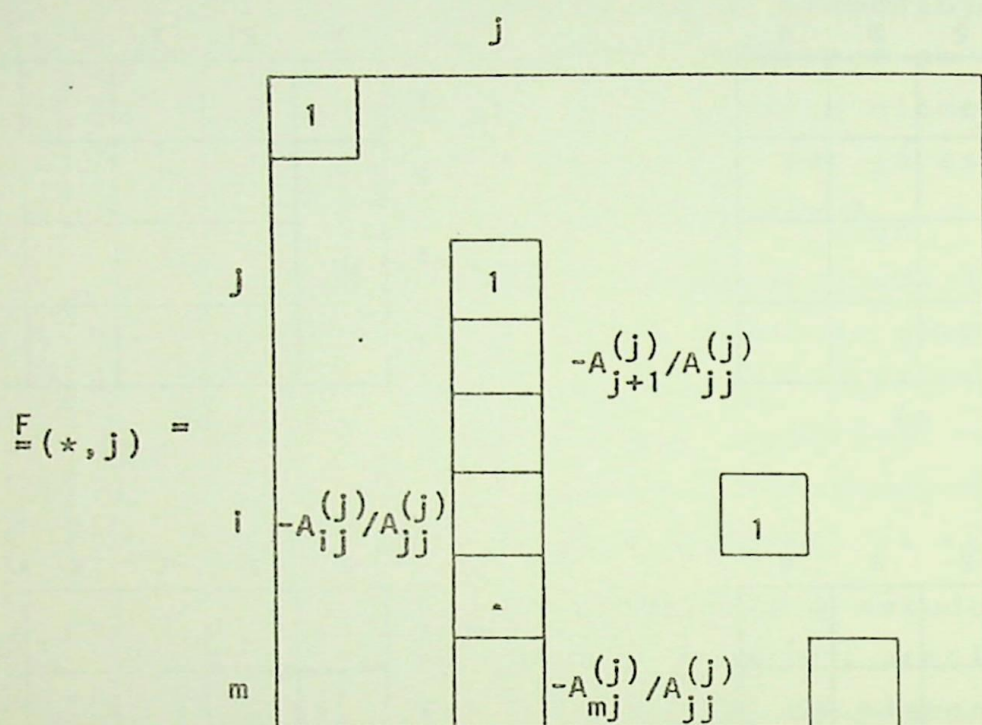


Fig.V.14-Produto das matrizes \underline{F} para eliminar uma sub-coluna

É claro que $\underline{A}^{(1)} = \underline{A}$, $\underline{A}^{(2)} = \underline{F}_{(*,1)} \underline{A}^{(1)}$, até

$$\underline{A}^{(m)} = \underline{F}_{(*,m-1)} \underline{A}^{(m-1)} = \underline{F} \underline{A}$$

Resulta fácil provar que $\underline{F}_{(*,j)}^{-1}$ assume o valor ilustrado na figura V.15.

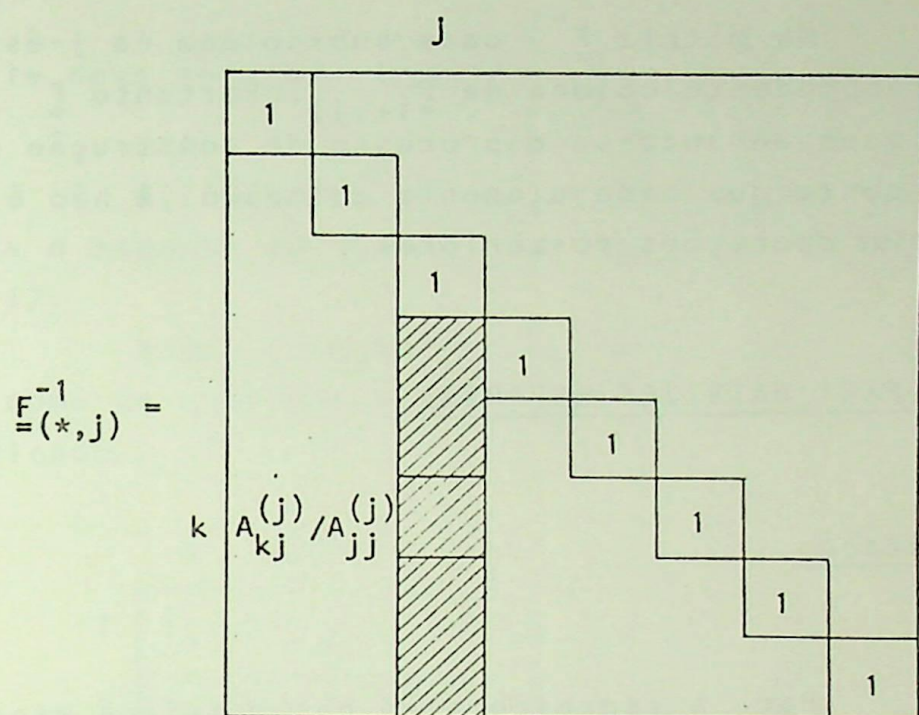


Fig. V.15- Valor da matriz $\underline{E}_{(*,j)}^{-1}$

O produto final $\underline{E}^{-1} = \underline{E}_{(*,1)}^{-1} \cdots \underline{E}_{(*,m-1)}^{-1}$ resulta então em uma matriz triangular inferior da forma indicada na figura V.16.

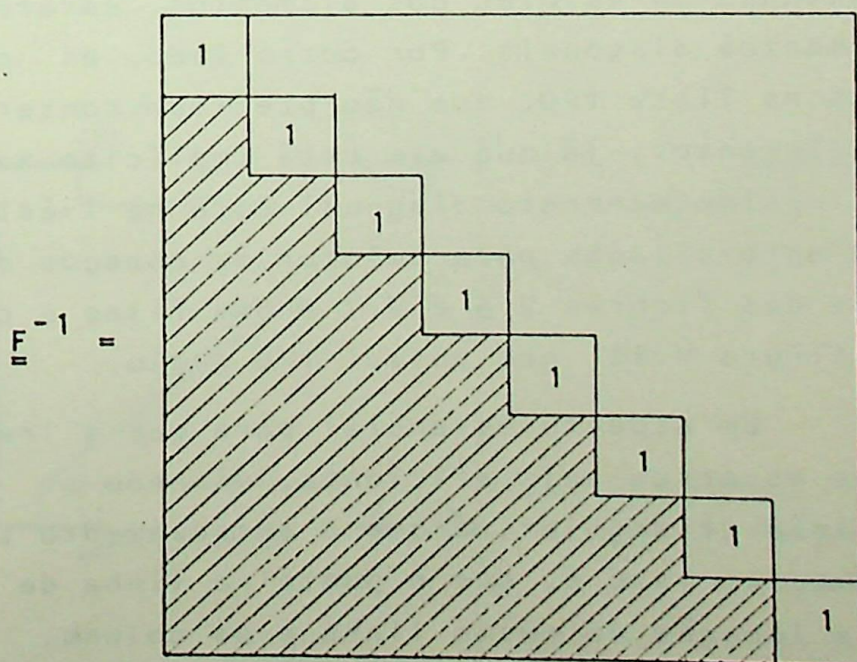


Fig. V.16- Matriz final \underline{E}^{-1}

Na matriz \underline{F}^{-1} cada sub-coluna na j -ésima é cópia da correspondente coluna de $\underline{F}^{-1}_{(*,j)}$. Portanto \underline{F}^{-1} pode ser construída acompanhando-se o processo de construção de $\underline{F} \underline{A}$, levando em conta que cada elemento colocado já não é mais modificado pelas operações posteriores.

C. MÉTODOS PARA MATRIZES ESPARSAS

1. Representação

Para a representação das matrizes esparsas dos sistemas elétricos de potência pode-se adotar os esquemas das figuras V.5, V.7 ou V.11. Entretanto será explorado o fato de que os elementos diagonais das matrizes são geralmente não nulos, sendo que casos incomuns em que algum deles é nulo, é de interesse conservar ainda uma posição de memória contendo zero.

Em consequência, as NB primeiras posições da lista Y, contendo os valores dos elementos, estarão destinadas aos elementos diagonais. Por outro lado, as correspondentes posições na lista IPO, que não precisam conter o encadeamento de tais elementos, já que ele está implícito no fato de que o valor do l -ésimo elemento diagonal está na l -ésima posição de Y, serão aproveitadas para colocar os começos das filas nos esquemas das figuras V.5 e V.7 e das filas e colunas no esquema da figura V.11, que possui IPO duplo.

Um aspecto essencial para que a representação das matrizes esparsas seja eficiente, visando os algoritmos de decomposição triangular, é que o encadeamento seja efetuado ordenadamente, isto é, que o ponteiro linha de uma locação aponte até a locação da mesma linha e da coluna, imediatamente posterior, isto é, aponte ao primeiro elemento não nulo da linha, avançando em sentido crescente aos números das colunas. Igual condição é imposta ao encadeamento de cada coluna,

isto é, ele deve ser feito na ordem crescente dos números das linhas.

A figura V.18 ilustra um exemplo desta organização para o esquema da figura V.11 com o sistema indicado na figura V.17.

Pode-se seguir os ponteiros nas listas IP0, notando-se como os encadeamentos estão ordenados como anteriormente indicado.

	1	2	3	4	5	6
1	Y_{11}	Y_{12}		Y_{14}		
2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}		
3		Y_{32}	Y_{33}		Y_{35}	Y_{36}
4	Y_{41}	Y_{42}		Y_{44}	Y_{45}	
5			Y_{53}	Y_{54}	Y_{55}	Y_{56}
6			Y_{63}		Y_{65}	Y_{66}

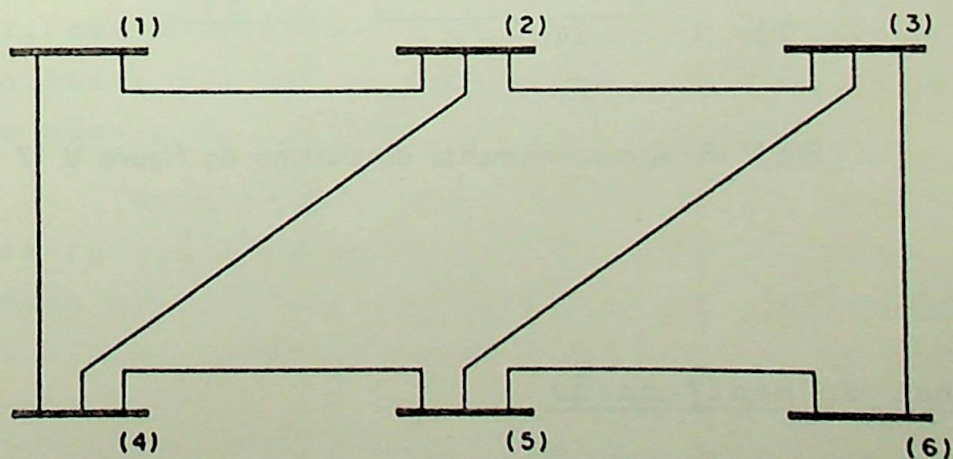


Fig. V.17 - Sistema para armazenamento conforme figura V.18

	IPO		Y	LAVS
1	12	17	Y ₁₁	23
2	17	12	Y ₂₂	
3	21	13	Y ₃₃	
4	15	19	Y ₄₄	
5	22	7	Y ₅₅	
6	14	10	Y ₆₆	
7	10	20	Y ₃₅	
8	-2	11	Y ₂₄	
9	20	-2	Y ₄₂	
10	-3	16	Y ₃₆	
11	16	-4	Y ₅₄	
12	19	21	Y ₁₂	
13	8	22	Y ₂₃	
14	18	-3	Y ₆₃	
15	9	-1	Y ₄₁	
16	-5	-6	Y ₅₆	
17	13	15	Y ₂₁	
18	-6	-5	Y ₆₅	
19	-1	8	Y ₁₄	
20	-4	18	Y ₄₅	
21	7	9	Y ₃₂	
22	11	14	Y ₅₃	
23	24			

Fig.V.18 - Armazenamento do sistema da figura V.17

2. Rotinas de modificação

A manipulação de matrizes esparsas, representadas mediante técnica indicada, resulta grandemente facilitada, implementando-se uma rotina que permita inserir ou reti

rar um elemento, numa posição dada pela linha N1 e coluna N2 da matriz. A rotina deve atuar de maneira que, se a posição N1,N2 não for nula, o valor na posição, após a execução da rotina, será a soma do valor prévio e o valor inserido. Se a posição é nula, isto é, não tem locação atribuída na representação, é criada uma posição a partir de uma lista de LAVS de locações livres e o valor é inserido neste local. Finalmente, no caso de posição não nula em que o valor da soma antes mencionada, seja zero, isto é, o valor a inserir é igual a de sinal contrário ao do valor prévio, a locação deixa de ser necessária sendo devolvida à LAVS.

A rotina será implementada, buscando ao longo da linha N1, exceto no caso $N1 = N2$, posição diagonal. Os valores M2 das colunas dos elementos achados são comparados com N2, caso M2 seja menor do que N2 significa que ainda não se chegou a posição procurada e quando $M2 = N2$ encontrou-se esta posição. No caso de M2 ser maior que N2, conclui-se que a posição N1,N2 tem valor zero, isto é, não há locação atribuída, e a locação encontrada N1,M2 é a primeira posição não nula posterior a N1,N2.

Cada vez que se chega a uma nova locação da linha N1 é necessário calcular o valor M2 da coluna correspondente, o que é conseguido empregando-se a subrotina PARC, do item V.A.2, com M valendo 1. Logo $MP = 3 - M = 3 - 1 = 2$, desencadeando uma busca por coluna até chegar ao final, onde está guardado o número da coluna, com sinal negativo.

Note-se que LAVS é um simples registro, contendo um ponteiro até a primeira posição da lista de locações livres. Antes que a lista IPO comece a ser utilizada para aljar outras listas, toda ela constitui a lista de locações livres.

No entanto, deve-se considerar que as NB primeiras locações de Y são reservadas para colocar os valores das admitâncias próprias do sistema, em ordem invariável. Pode-se então empregar as NB primeiras linhas de IPO para armar os começos das linhas e colunas, substituindo KOM, e co

meçar o encadeado de IPO na linha $NB+1$, colocando em LAVS o valor $NB+1$, e para I igual ou maior que este valor colocar em $IPO(I,1)$ o ponteiro $I+1$, apontando à locação seguinte. Deve-se declarar o maior valor possível para $NIPO$, dimensão de IPO , de forma que a estrutura montada fique sempre disponível, ou seja, que sempre se tenham posições livres em IPO com esta estrutura.

Antes da montagem as NB primeiras posições da primeira coluna de IPO serão preenchidas com zeros conforme figura V.19.

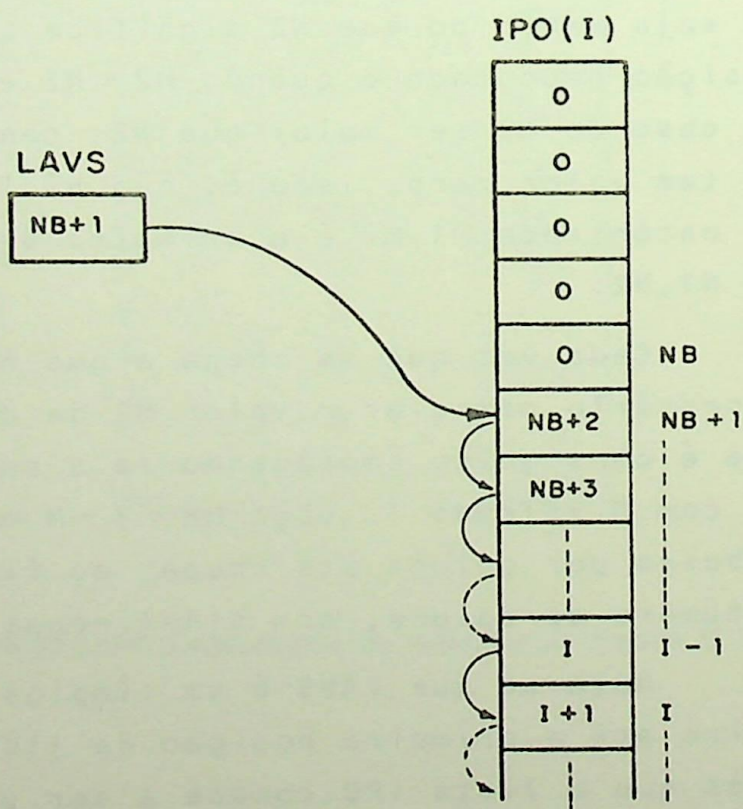


Fig. V.19 - Registro LAVS e lista IPO antes de serem utilizados

A implementação dos princípios expostos anteriormente é indicada a seguir, para o esquema da figura V.7., com o nome de subrotina POE onde P é o valor prévio na posição em questão.

```

SUBROUTINE POE (N1,N2,P,IPO,Y)
  IF (N1.NE.N2) GO TO 11
  Y(N1) = Y(N1) + P
  GO TO 70
11 LAST = 0
  NEXT = IPO (N1,1)
10 IF (NEXT.LE.0) GO TO 40
  CALL PARC (NEXT, 1,IPO,M2)
  IF (M2-N2) 20,30,40
20 LAST = NEXT
  NEXT = IPO (NEXT,1)
  GO TO 10
30 Y (NEXT) = Y (NEXT) + P
  IF (Y(NEXT).NE.0) GO TO 70
  IF (LAST.LE.0) GO TO 31
  IPO (LAST,1) = IPO (NEXT,1)
  GO TO 32
31 IPO (N1,1) = IPO (NEXT,1)
32 IPO (NEXT,1) = LAVS
  LAVS = NEXT
  GO TO 70
40 I = LAVS
  LAVS = IPO (I,1)
  IPO (I,1) = NEXT
  IF (LAST.LE.0) GO TO 50
  IPO (LAST,1) = I
  GO TO 60
50 IPO (N1,1) = I
60 Y(I) = P
  IPO(I,2) = N2
70 RETURN
  END

```

Um aspecto bastante interessante da organização computacional que se está implementando, é o fato de se poder montar as estruturas de ponteiros empregando-se reiteradamente a rotina POE.

A reserva das primeiras NB locações, para alocar os elementos diagonais, é conseguida simplesmente fazendo-se $LAVS = NB+1$.

Logo a estrutura de montagem de IPO e Y a partir dos dados, supostamente armazenados em KEY e YP, onde YP é a lista de admitâncias primitivas, será implementada como segue:

```

DO 1 J = 1,NKEY
N1 = KEY(J,1)
N2 = KEY(J,2)
P = -YP(J)
Y(N1) = Y(N1) - P
Y(N2) = Y(N1) - P
CALL POE (N1,N2,P,IPO,Y)
CALL POE (N2,N1,P,IPO,Y)
1 CONTINUE

```

Em seguida apresenta-se a subrotina para o esquema da figura V.11. Esta subrotina, chamada POEM, é aplicável ao exemplo ilustrado na figura V.18.

```

SUBROUTINE POEM (N1,N2,P,IPO,Y)
IF (N1.NE.N2) GO TO 01
Y (N1) = Y (N1) + P
GO TO 70
01 LAST = 0
NEXT = IPO (N1,1)
10 IF, (NEXT.LE.0) GO TO 40
CALL PARC (NEXT,1,IPO,M2)
IF (M2-N2) 20,30,40
20 LAST = NEXT
NEXT = IPO (NEXT,1)

```

```

GO TO 10
30 Y (NEXT) = Y (NEXT) + P
   IF (Y(NEXT).NE.0) GO TO 70
   IF (LAST.LE.0) GO TO 31
   IPO (LAST,1) = IPO (NEXT,1)
   GO TO 32
31 IPO (N1,1) = IPO (NEXT,1)
32 IPO (NEXT,1) = LAVS
   LAVS = NEXT
   GO TO 700
40 I = LAVS
   LAVS = IPO (I,1)
   IF (NEXT.LE.0) GO TO 41
   IPO (I,1) = NEXT
   GO TO 42
41 IPO (I,1) = -N1
42 IF (LAST.EQ.0) GO TO 50
   IPO (LAST,1) = I
   GO TO 60
50 IPO (N1,1) = I
60 Y(I) = P
70 LAST = 0
   NEXT = IPO (N2,2)
110 IF (NEXT.LE.0) GO TO 140
   CALL PARC (NEXT,2,IPO,M2)
   IF (M2-N1) = 120,120,140
120 LAST = NEXT
   NEXT = IPO (NEXT,2)
   GO TO 110
140 IF (NEXT.LE.0) GO TO 141
   IPO(I,2) = NEXT
   GO TO 142
,141 IPO (I,2) = -N2
142 IF (LAST.EQ.0) GO TO 700
   IPO (LAST,2) = I
700 RETURN
END

```

Formação da
2.^a coluna
de IPO

A rotina POEM é testada a seguir, onde a tabela mostra as mudanças acontecidas nas variáveis indexadas e registros envolvidos. A figura V.20 apresenta o estado final após a inserção.

POEM (3,4,P,IPO,Y) N1 = 3, N2 = 4

Y(1)	LAST	NEXT	M2	I	LAVS
-	0	21	2	-	23
-	21	7	5	23	24
P	0	19	1	-	-
-	19	8	2	-	-
-	8	11	5	-	-

IPO(I,1)	IPO(I,2)	IPO(LAST,1)	IPO(LAST,2)
-	-	-	-
7	-	-	-
-	-	23	-
-	-	-	-
-	11	-	23

	IPO		Y	LAVS
1	12	17	Y_{11}	24
2	17	12	Y_{22}	
3	21	13	Y_{33}	
4	15	19	Y_{44}	
5	22	7	Y_{55}	
6	14	10	Y_{66}	
7	10	20	Y_{35}	
8	-2	23	Y_{24}	
9	20	-2	Y_{42}	
10	-3	16	Y_{36}	
11	16	-4	Y_{54}	
12	19	21	Y_{12}	
13	8	22	Y_{23}	
14	18	-3	Y_{63}	
15	9	-1	Y_{41}	
16	-5	-6	Y_{56}	
17	13	15	Y_{21}	
18	-6	-5	Y_{65}	
19	-1	8	Y_{14}	
20	-4	18	Y_{45}	
21	23	9	Y_{32}	
22	11	14	Y_{53}	
23	7	11	Y_{34} = P	

	1	2	3	4	5	6
1	Y_{11}	Y_{12}		Y_{14}		
2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	P	
3		Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}	Y_{36}
4	Y_{41}	Y_{42}		Y_{44}	Y_{45}	
5			Y_{53}	Y_{54}	Y_{55}	Y_{56}
6			Y_{63}		Y_{65}	Y_{66}

Fig. V. 20- Inclusão de elemento com a rotina POEM

Para a implementação do Gauss, empregamos a variável indexada NUM(NB), que contém na posição l-ésima o n^umero de elementos não nulos da fila l da matriz.

Para se determinar a fila eliminadora em cada instância, pesquisa-se NUM até se obter um ISCO tal que NUM(ISCO) = min NUM(K), para todo K.

A partir de uma linha eliminadora J, escolhida por uma rotina ESCO, que será explicada adiante, a subrotina ELIC elimina a sub-coluna da coluna J, formada pelas linhas que ainda não atuaram como eliminadoras.

```

SUBROUTINE ELIC (J,IPO,Y)
  I = IPO(J,2)
10 IF (I.LE.0) GO TO 2
  CALL PARC (I,2,IPO,MP)
  IF (NUM(MP).EQ.NB) GO TO 11
  F = -Y(I)/Y(J)
  CALL ELIM (J,MP,F,IPO,Y)
11 I = IPO(I,2)
  GO TO 1
  2 RETURN
  END

```

Note-se que em Y(I) está armazenado o valor do elemento (MP,J) pois l "costura" a coluna N2; e em Y(J) o valor do (J,J), diagonal J.

A implementação da ELIM é feita da forma indicada, sendo esta a rotina que especificamente elimina o elemento em questão, dado por (MP,J).

```

ELIM (J,MP,F,IPO,Y)
L = IPO (J,1)
1 IF (L.LE.0) GO TO 2
P = F*Y (L)
CALL PARC (L,1,IPO,MPP)
IF (MPP.NE.J) GO TO 11
P = -F
IND = 1
11 CALL POEX (MP,MPP,P,IPO,Y,IND)
L = IPO (L,1)
IND = 0
GO TO 1
2 RETURN
END

```

A subrotina POEX é idêntica a POEM modificada. Com $IND = 0$ atua exatamente como a POEM e com $IND = 1$ o efeito é o indicado na figura V.21

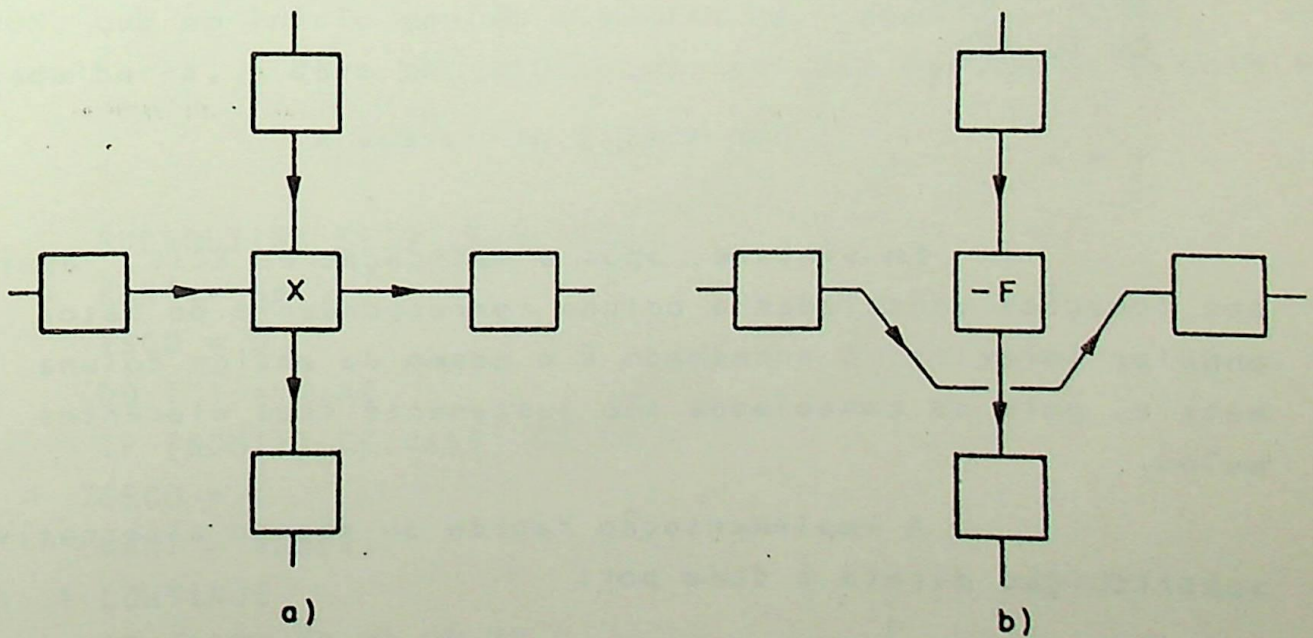


Fig. V.21 - Efeito da rotina POEX: a - antes; b - depois

Note-se que, em vez de devolver a locação à LAVS, a rotina desliga a locação da fila, coloca-se -F e mantém o encadeado da coluna, visando usar a substituição alternativa do item V.B.2 que explora justamente o encadeado por coluna.

A subrotina POEX é dada a seguir, onde o indicado com linha pontilhada é idêntico a POEM.

```

POEX (N1,N2,P,IPO,Y,IND)
. . . .
. . . .
30 Y (NEXT) = Y (NEXT) + P
   IF (Y(NEXT).NE.0) GO TO 70
   IF (LAST.LE.0) GO TO 31
   IPO (LAST,1) = IPO (NEXT,1)
   GO TO 311
31 IPO (N1,1) = IPO (NEXT,1)
311 IF (IND.EQ.0) GO TO 32
    Y (NEXT) = P
    GO TO 700
32 IPO (NEXT,1) = LAVS
   LAVS = NEXT
   GO TO 700
. . . .
. . . .

```

Em síntese, após a aplicação de ELIC, aparece nas locações canceladas a coluna correspondente do fator triangular inferior. O encadeado é o mesmo da antiga coluna da matriz, pois os cancelados são justamente seus elementos não nulos.

A implementação rápida do método alternativo de substituição direta é dada por:

```

DO 1 J = 1,M
X(J) = Y(J)/LS(J)
K = IPO (J,2)
1 IF (K.LE.0) GO TO 2
CALL PARC (K,2,IPO,MP)
Y(MP) = Y(MP) - LS(K)*X(J)
K = IPO (K,2)
GO TO 1
2 CONTINUE

```

3. Implementação da eliminação de Gauss

A subrotina ESCO tem por objetivo escolher uma linha eliminadora com o menor número de elementos não diagonais não nulos para minimizar o efeito de perda de esparsidade, isto é, a criação de novos elementos não nulos nas linhas onde os elementos vão ser eliminados.

Sabe-se que o catálogo com esses números é o NUM, que no início contém o número de linhas penduradas em cada barra, e deve ser atualizado em cada aplicação de ELIMIN.

A subrotina é dada por:

```

SUBROUTINE ESCO (NUM,ISCO)
KANT = NB
ISCO = 0
DO 1 I = 1,NB
IF (NUM(I).GE.KANT) GO TO 1
ISCO = I
KANT = NUM(I)
1 CONTINUE
IF (ISCO.EQ.0) GO TO 2
NUM (ISCO) = NB
2 RETURN
END

```

Após a execução ISCO contém o número da barra escolhida e se todas as barras já foram escolhidas, ISCO contém o valor zero.

Tem-se agora os subsídios necessários para se escrever o programa principal para uma decomposição triangular otimamente ordenada, DT00, baseada na técnica de eliminação de Gauss

```

SUBROUTINE DT00
1 CALL ESCO (NUM,ISCO)
  IF (ISCO.EQ.0) GO TO 2
  J = ISCO
  CALL ELIC (J,IPO,Y)
  GO TO 1
2 RETURN
END

```

Para resolver um sistema com matriz \underline{Y} e vetor de termos independentes \underline{T} , dado por $\underline{Y}\underline{X} = \underline{T}$, após aplicar DT00 chama-se uma subrotina SUBD, substituição direta, feita na base das instruções descritas para o método alternativo de substituição direta do item V.C.2, para resolver o sistema $L(UX) = T$. No caso de $UX = C$, uma rotina SUBI, de substituição inversa, resolve o sistema, fornecendo o valor de X .

A rotina SUBI deve explorar o encadeado por filas de U , contido em $IPO(I)$ com $I = 1, NB$. Note-se ainda que ao DO da rotina alternativa de substituição direta deve ser adicionado um catálogo KAT, que lembra a ordem de escolha das sucessivas linhas eliminadoras

O catálogo KAT é produzido incorporando-se na ESCO um contador KONT que é acrescido em uma unidade toda vez que a ESCO é executada, tendo-se o cuidado de zerar KONT no princípio de DT00.

Após incrementar KONT, faz-se:

KAT(KONT) = I

A sequência do método alternativo de substituição direta vira então:

```
DO 1 JJ = 1,M
```

```
J = KAT(JJ)
```

```
.....
```

prosseguindo normalmente.

A ordem hierárquica das rotinas do programa é dada a seguir:

```
DT00 → ESCO → ELIC → ELIM → PARC
                                     ↘
                                     ↘
                                     POEX
```

4. Aplicação na obtenção de equivalentes externos

A aplicação da eliminação de Gauss na obtenção de equivalentes externos tipo Ward, usando técnicas de esparsidade, é feita facilmente, levando-se em conta que neste caso usa-se uma eliminação truncada. Em outras palavras a eliminação não é executada nas linhas referentes às barras que se deseja reter, em geral barras fronteiras.

Desta forma pode-se aplicar a mesma técnica de eliminação anterior, tomando-se o cuidado prévio de se modificar o catálogo NUM, colocando-se o valor NB nas posições referentes as linhas que correspondem às barras que serão retidas. A figura V.22 mostra a modificação feita

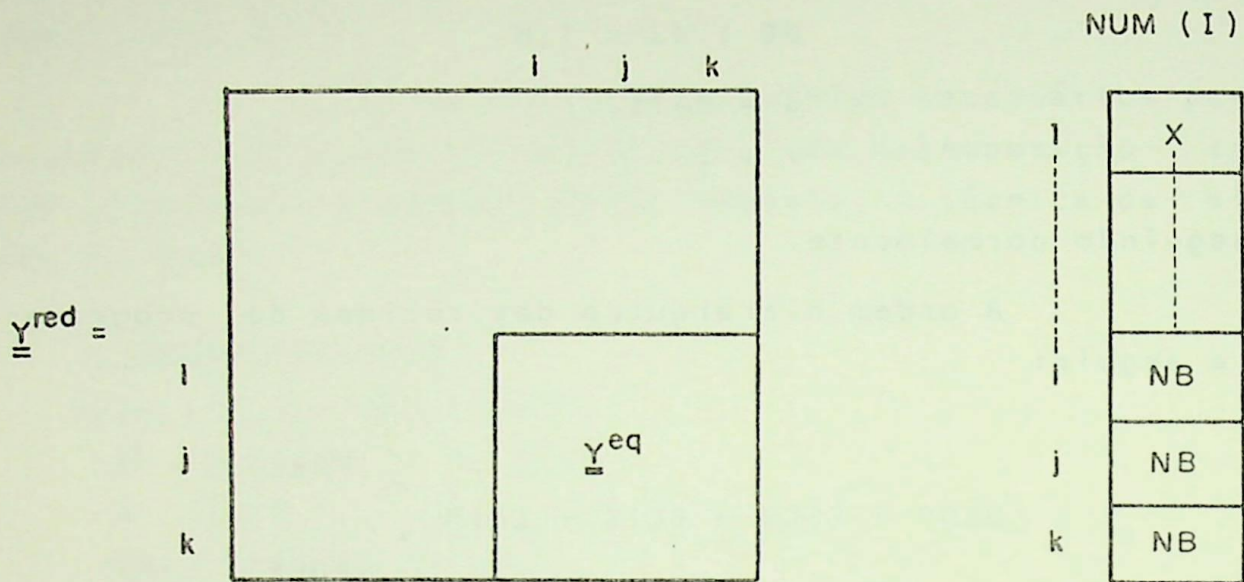


Fig. V. 22 - Obtenção do equivalente Ward

Note-se que a matriz \underline{Y}^{eq} obtida ao final do processo mantém os encadeamentos de linha e de coluna.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

A. APLICAÇÕES NO SISTEMA BRASILEIRO

O sistema elétrico brasileiro apresenta hoje dimensões consideráveis e um certo grau de sofisticação no seu funcionamento, notadamente no sistema sul-sudeste, que implicam na necessidade do uso de técnicas elaboradas para sua operação.

A futura interligação de todo o sistema brasileiro, quando ficarão integrados os sistemas norte e nordeste com os já interligados sul e sudeste, e as ampliações previstas, com as entradas em operação das usinas de Itaipu Binacional e das nucleares Angra I e II, virão aumentar ainda mais esta necessidade, tornando-se um imperativo a adoção de um controle centralizado para um bom funcionamento do sistema |4, 8 |.

1. Estrutura hierárquica

A implantação de um Sistema de Supervisão e Coordenação, tal como exposto no capítulo II, aplica-se bem à situação brasileira, tendo-se neste caso um Centro de Supervisão e Controle (CSC) que seria tipicamente um centro nacional de despacho. No segundo nível hierárquico entrariam os Centros de Operação do Sistema (COS), atuando a nível de área, com uma divisão de áreas que seria definida em função de fatores como o porte do sistema, distribuição geográfica, situação político-administrativa, estrutura das companhias, etc.

A figura VI.1 mostra um esquema das possíveis

áreas, indicando-se na figura VI.2 a estruturação hierárquica. Note-se que cada COS seria praticamente responsabilidade de uma companhia.

No terceiro nível viriam então os Centros de Operação de Distribuição, a nível de região, que seriam definidos pelas estruturas das companhias com controle de COS e seriam constituídos também pelas próprias companhias de menor porte. As figuras VI.1 e 2 indicam também como sugestão, o posicionamento destes centros.

Deve-se observar que a estrutura proposta nas figuras VI.1 e 2 já estão levando em consideração futuras interligações como a nordeste-sudeste, a norte-nordeste e também o funcionamento da Itaipu Binacional. Ainda na figura VI.1, observe-se que as áreas de controle estão definidas pelos círculos tracejados, significando que todas as companhias dentro de um mesmo círculo estão ligadas a um único COS, pertencente a companhia colocada no centro do círculo. Na figura VI.2 procurou-se indicar os COS e somente alguns dos COD, não se indicando ligações abaixo deste nível.

As funções de cada centro e as trocas de dados entre eles, com definição da forma de comunicação, estão sintetizados no capítulo II.

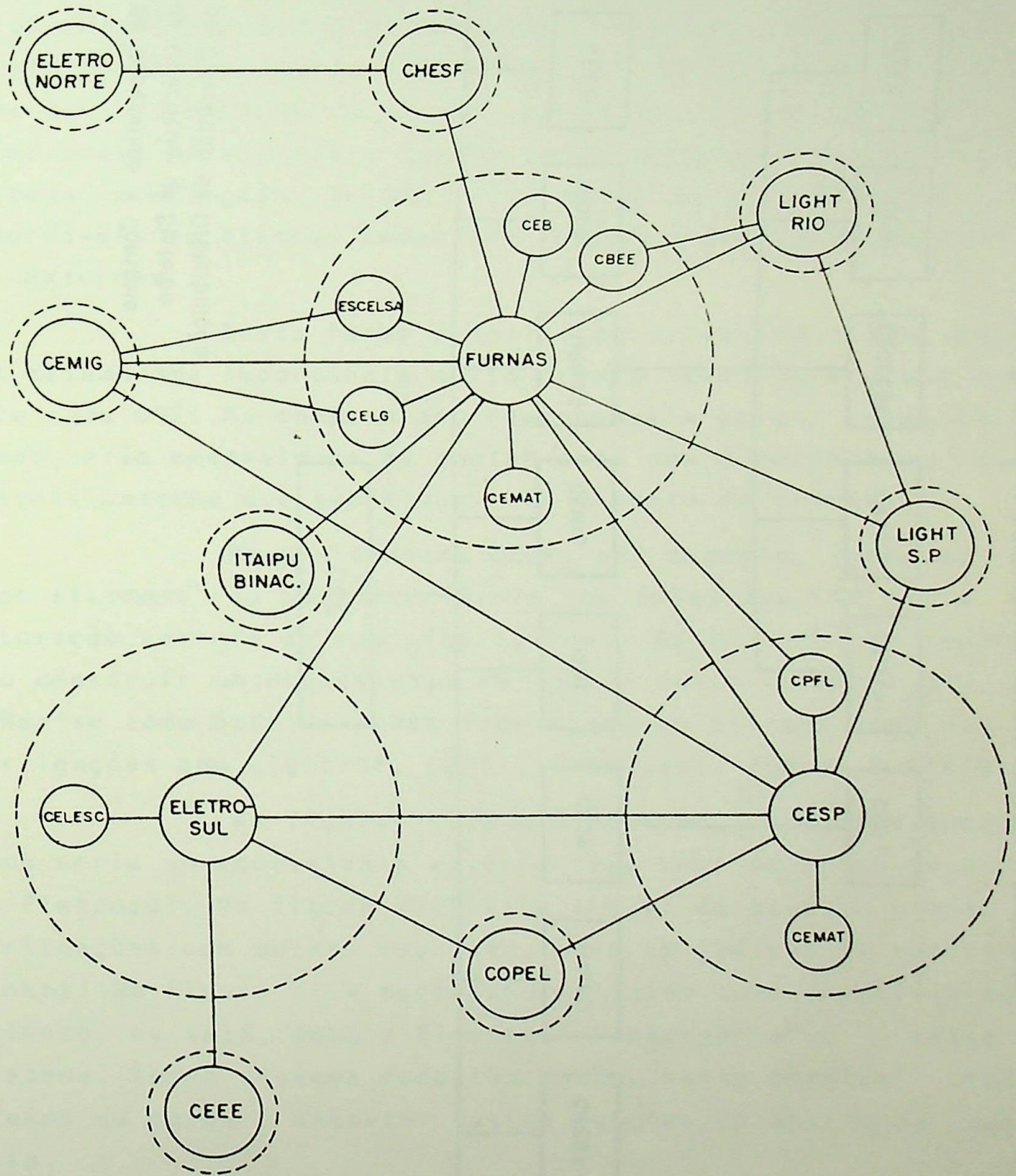


Fig. VI.1 - Possíveis áreas de controle no sistema brasileiro

CSC : Centro de Supervisão e Controle
 COS : Centro de Operação de Sistema
 COD : Centro de Operação de Distribuição

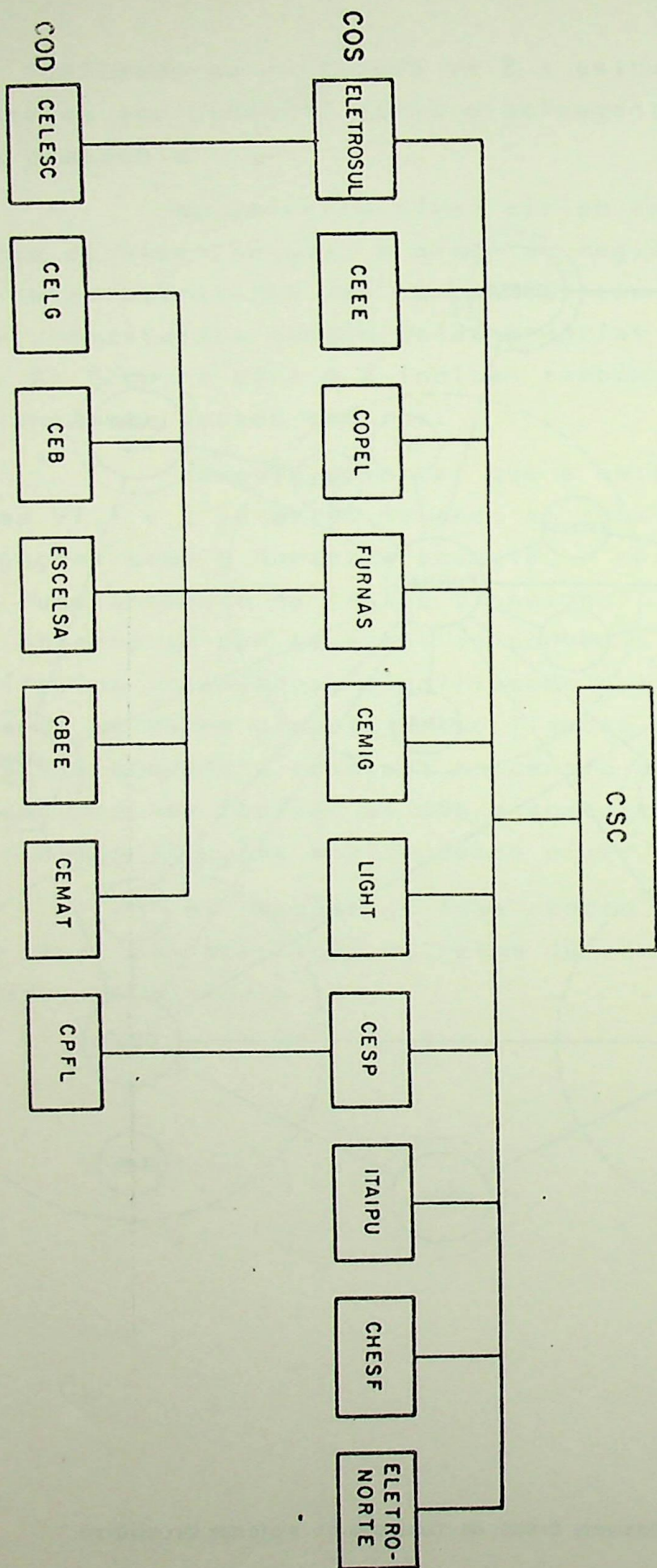


Fig. VI.1.2 - Distribuição hierárquica sugerida para o sistema interligado

2. Equivalentes externos

Para se operar o sistema brasileiro, estruturado da forma indicada e executando as funções descritas no capítulo II, necessita-se trabalhar com equivalentes de redes. Isto decorre do fato de se ter que trabalhar com partes não observáveis do sistema e também pelas próprias dimensões do sistema interligado. O item II.D indica como as partes não observáveis do sistema podem ser representadas por equivalentes externos.

Desta forma a aplicação de equivalentes externos assume uma importância muito grande tanto para o CSC como para cada COS. As companhias, responsáveis pelas respectivas áreas terão necessidade de montar cada uma o respectivo equivalente externo que substitua todo o resto do sistema.

Para o sistema CESP, por exemplo, todos os outros sistemas são não observáveis, ou seja, seu COS faz a monitoração somente de sua própria área. Assim torna-se necessário construir um equivalente de todo o resto do sistema tomando-se como base as bases fronteiras do sistema CESP nas interligações com Light-SP, COPEL, Eletrosul, Furnas e CEMIG.

As figuras VI.3 e 4 mostram esquematicamente como seria um equivalente externo tipo Ward do ponto de vista da Eletrosul. Na figura VI.3 está a área de atuação com as interligações com outras empresas, onde se indicam os números de linhas. Na figura VI.4 está esquematizado como ficaria o equivalente, ou seja, como a Eletrosul "enxergaria" o resto do sistema. Com o sistema reduzido então, seria possível rodar fluxos de carga e executar outras funções no âmbito da companhia.

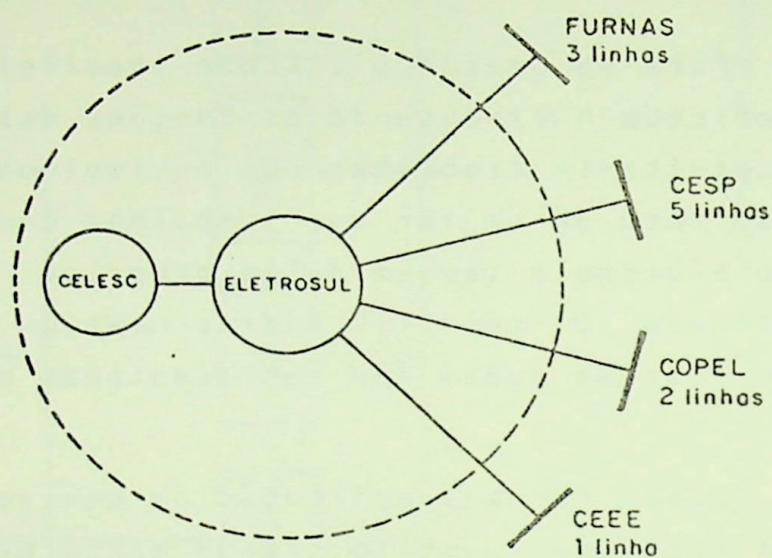


Fig.VI.3 - Sistema Eletrosul isolado

Note-se que o equivalente da CEEE será apenas uma admitância para a "terra", já que existe somente uma barra fronteira. O que se definiu anteriormente como sistema interno, seria neste caso o sistema constituído por Eletrosul e CELESC. Conyém lembrar que no caso de se usar equivalente Ward estendido ou Ward estendido com calibração, a cada barra fronteira se agregará uma barra fictícia.

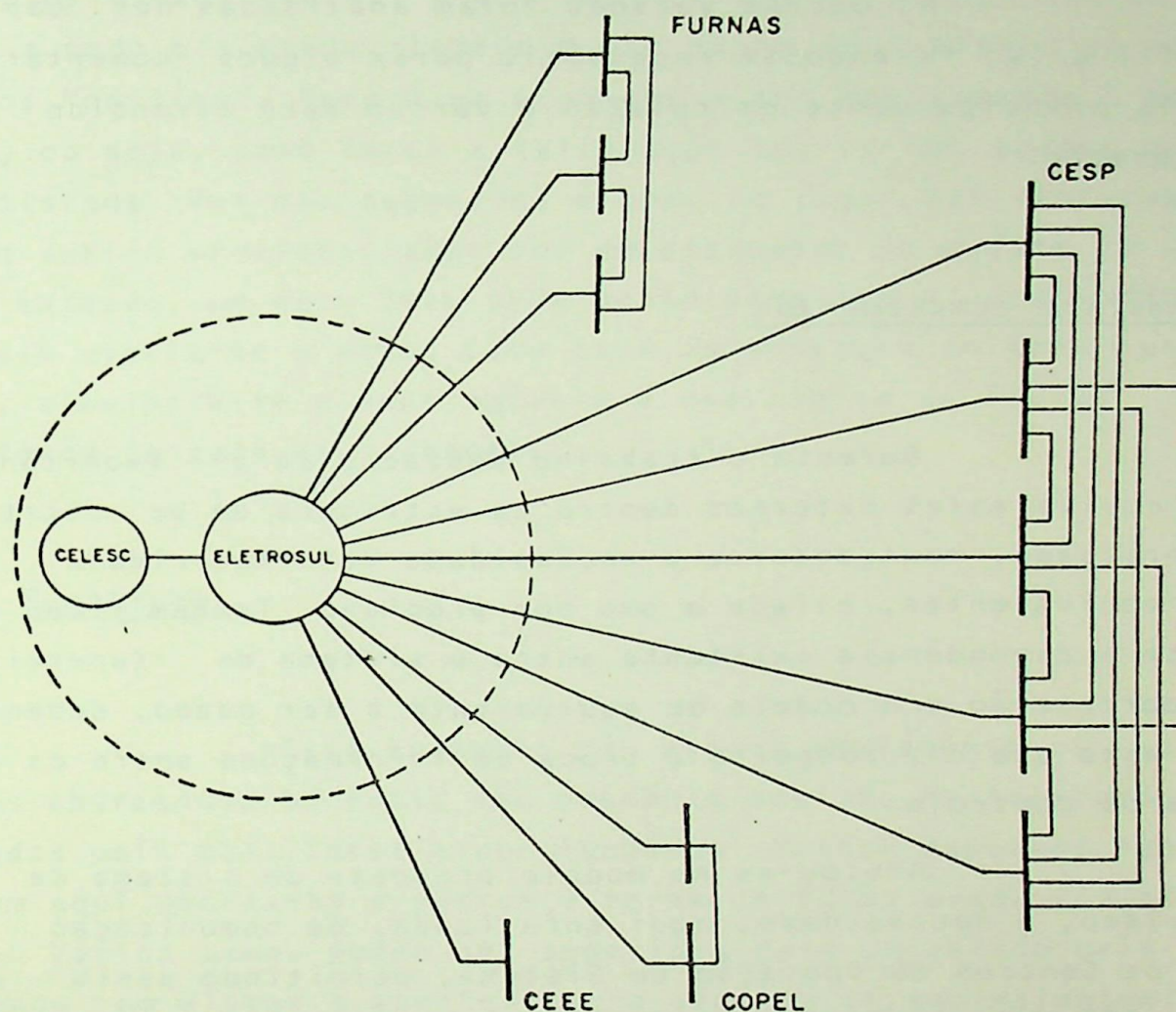


Fig.VI.4 - Equivalente do sistema visto pela Eletrosul

B. COMENTÁRIOS E SUGESTÕES FINAIS

Dentro da linha de equivalentes topológicos, tipo Ward, foram abordados praticamente todas as versões. Uma das não citadas é o equivalente Ward estendido com efeito cruzado, onde se consideram injeções complementares de potência reativa, oriundas do efeito cruzado das barras fronteiras solicitadas desigualmente, supridas por um circuito equivalente complementar. Esta versão entretanto não apresenta significação

tivas melhoras em relação ao Ward estendido [3].

As outras versões foram analisadas nos capítulos III e IV, fazendo-se necessário porém alguns comentários finais principalmente em relação a versão Ward estendido com calibração.

1. Análise complementar

Durante o trabalho destacou-se a importância dos equivalentes externos dentro da estrutura de um sistema interligado, realçando-se a necessidade de simplicidade nestes equivalentes, aliada a uma boa precisão. Também ficou evidente a dependência existente entre o sistema de supervisão e coordenação e o modelo de equivalente a ser usado, dependendo esta que diz respeito a troca de informações entre os centros de controle.

Adotou-se no modelo proposto do sistema de supervisão, a necessidade, aqui enfatizada, de comunicação entre os Centros de Operação de Sistema, permitindo assim que cada COS tome conhecimento das mudanças topológicas mais importantes, principalmente nas áreas vizinhas.

A variante de equivalente proposta, chamada Ward estendido com calibração, pretende apresentar uma eficiência maior, mantendo a simplicidade, atuando de acordo com o sistema de supervisão apresentado. É evidente que, tal como as outras, esta versão também apresenta desvantagens, algumas das quais com possibilidades de serem sanadas. Entre as desvantagens pode-se citar a necessidade de se ter, além do Ward estendido, os fluxos de carga exatos para as principais contingências; também o fato de se ter que escolher uma contingência para a calibração.

Deve-se considerar além disso que este é um modelo ainda não suficientemente testado, necessitando maiores estudos e ensaios, e podendo portanto ser aperfeiçoado.

Também deve-se notar que a necessidade de se ter os fluxos exatos, o que implicaria, em princípio, em acesso a todo o sistema, impede o uso deste equivalente em aplicações "on-line". Este é um problema a ser devidamente estudado, ou seja, como fazer a calibração sem se ter acesso a todo o sistema. Uma das sugestões é usar no lugar das informações que seriam providenciadas por um estimador de estado do sistema externo, um caso base onde seria simulada a contingência. Assim usaria-se o mesmo caso base da montagem do Ward estendido, simularia-se a contingência e usariam-se os fluxos como referência para as correções.

2. Sugestões

Este trabalho não esgota obviamente os assuntos abordados, os quais são bastante amplos, necessitando estudos mais detalhados e aprofundados. Muitos aspectos não foram aqui abordados e outros o foram de forma ainda insuficiente. Vários temas podem ser sugeridos para um estudo mais profundo com vistas a aperfeiçoar a técnica de equivalentes.

Um dos trabalhos a ser realizado é o de testar em um maior número de situações a versão Ward estendido com calibração, comparando-a com outros métodos.

Um outro estudo a ser feito é o de encontrar uma forma de sistematizar as calibrações desta versão, eliminando o caráter aleatório da contingência usada e padronizando o cálculo destas calibrações.

Também deve-se estudar a possibilidade de se obter a calibração sem usar o fluxo exato, obtido usando-se todo o sistema.

Deve ser testado também o uso dos módulos de tensão das barras, no lugar dos fluxos nas linhas, como parâmetro a ser corrigido para a calibração.

A P Ê N D I C E

COMENTÁRIOS E RESULTADOS ADICIONAIS

Neste apêndice estão acrescentados alguns resultados e análises de testes apresentados na defesa da dissertação, bem como observações fruto de discussões havidas durante a mesma, as quais julgou-se interessante incluir no trabalho já que apresentam informações adicionais úteis.

Estas complementações referem-se ao item IV.D, ou seja, a apresentação e análise dos resultados obtidos com os vários testes realizados.

Foi observado durante os testes que a contingência 3, ou seja, saída da linha 1-3 apresenta problemas no que diz respeito a erros mais acentuados, podendo-se perceber na tabela IV.4 alguns resultados insatisfatórios nas linhas 4-2 e 4-3. Convém ressaltar que esta contingência deforma bastante o sistema fazendo inclusive com que parte do equivalente fique radial.

Entretanto não se conseguiu uma explicação ou uma justificativa exata para os resultados citados.

Pode-se observar ainda que os resultados insatisfatórios aparecem justamente em linhas de fluxos pequenos, como os fluxos reativos das linhas 4-2 e 4-3 da contingência 3, implicando em que pequenos erros de cálculo fiquem ampliados, obtendo-se resultados bastante imprecisos. Pode-se observar claramente este fenômeno pela fórmula:

$$\text{ERRO}(\%) = \frac{\text{OBTIDO} - \text{EXATO}}{\text{EXATO}} \times 100$$

Quando o valor exato é pequeno, qualquer imprecisão no valor obtido implicaria em um valor de erro bastante insatisfatório. Em outras palavras, a diferença valor obtido menos valor exato é ampliada sempre que o valor exato for pe

queno.

Convém também ressaltar que o valor limite, isto é, o valor limite de fluxo admissível para a linha em questão, pode estabelecer se um determinado erro percentual é significativo ou não. Por exemplo quando se tem um valor exato muito abaixo do valor limite, linha com bastante folga, pode-se ter um valor de erro percentual elevado, sem que isto seja importante.

O erro percentual é tanto menos importante quanto menor for o valor exato em relação ao valor limite, sendo portanto um índice nem sempre confiável e que foi adotado como uma referência e também pelo seu uso difundido em trabalhos acadêmicos. Deve ficar claro que o resultado apresentado pelo equivalente deve ser tanto mais preciso quanto mais carregada estiver a linha em questão.

Deve-se notar também que o mesmo fenômeno de valor exato pequeno, ocorre na linha 3-1 nas contingências 1 e 2 com método WEC-A2-CT1 e na contingência 1 com método WEC-B2-CT1, casos esses anteriormente citados e que constam das tabelas IV.2 e IV.3.

A tabela 1 do apêndice apresenta alguns resultados de testes realizados com a contingência 1, utilizando-se para calibração as contingências 2 e 3, usando-se os métodos A1, B1, C2 e D2. Esta tabela é um complemento da IV.2 onde a calibração usada baseou-se na própria contingência em estudo.

Pode-se perceber que o método WEC-C2 calibrado com a contingência 2 apresenta excelentes resultados, sendo somente um pouco inferior ao WEC-C2-CT1 da tabela IV.2. Também o WEC-D2-CT2 apresenta um comportamento muito bom. Já os métodos WEC-A1-CT2 e WEC-B1-CT2 mostram um desempenho inferior aos anteriores embora ainda muito bom.

No entanto os métodos que usam a contingência 3 para calibração como os WEC-C2-CT3 e WEC-D2-CT3 apresentam erros bastante elevados na linha 4-2 e um pouco menos na 4-3, estando estes casos entre os já comentados que envolvem a saída da linha 1-3.

TABELA 1
 RESULTADOS APRESENTADOS PARA A
 CONTINGENCIA 1

LINHA	WEC-A1 CT-2		WEC-B1 CT-2		WEC-C2 CT-2		WEC-D2 CT-2		WEC-C2 CT-3		WEC-D2 CT-3	
	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)	FLUXO (pu)	ERRO (%)
3 - 1	0,0173	1,2	0,0174	1,7	0,0171	0,0	0,0170	-0,6	0,0174	1,7	0,0175	2,3
	-j0,2040	4,9	-j0,2050	5,4	-j0,2021	4,0	-j0,2002	3,0	-j0,1999	2,8	-j0,1993	2,5
4 - 2	-0,2902	-0,1	-0,2902	-0,1	-0,2903	-0,1	-0,2904	0,0	-0,2895	-0,3	-0,2893	-0,4
	-j0,1152	-14,1	-j0,1258	-6,2	-j0,1229	-8,3	-j0,1223	-8,8	-j0,0530	-60,5	-j0,0462	-65,5
4 - 3	-0,1302	-0,1	-0,1301	-0,1	-0,1301	-0,1	-0,1301	-0,1	-0,1305	0,1	-0,1305	0,1
	-j0,0820	-10,3	-j0,0841	-8,0	-j0,0848	7,2	-j0,0856	-6,3	-j0,0686	-24,9	-j0,0672	-26,5
1 - 2	0,3142	-0,2	0,3142	-0,2	0,3144	0,2	0,3145	-0,2	0,3136	-0,4	0,3135	-0,5
	+j0,9215	0,0	+j0,9216	0,0	+j0,9215	0,0	+j0,9215	0,0	+j0,9217	0,0	+j0,9218	0,0

B I B L I O G R A F I A

- | 1 | - HAPP, H. H. An overview of short and long range operations planning functions in power systems. In: Proceedings of the International Symposium Computerized Operation of Power Systems (COPOS'75). Organizado por Savu Crivat Savulescu. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p. 1-19.
- | 2 | - PIZZOLANTE, A. C. Representação de partes parcialmente observáveis de sistemas de energia elétrica. São Paulo, 1979. [Tese de mestrado - Faculdade de Engenharia da UNICAMP].
- | 3 | - DECKMANN, S. M. Equivalentes estáticos para sistemas de energia elétrica. São Paulo, 1979. [Tese de doutoramento - Faculdade de Engenharia da UNICAMP].
- | 4 | - BUBENKO, J., PAULSSON, E., SJELVGREN, D., ANDERSON, M. Security assessment for power system operation. In: Proceedings of the International Symposium Computerized Operation of Power Systems (COPOS'75). Organizado por Savu Crivat Savulescu. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. p. 137-155.
- | 5 | - FREGOSI, A., ARANGO, H. Centros de controle de sistemas elétricos de potência. Aceito para publicação na revista EFEI Pesquisa.
- | 6 | - PIZZOLANTE, A.C., MONTICELLI, A.J., DECKMANN, S.M. Execução de funções avançadas de controle em tempo real em sistemas parcialmente observáveis. In: V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, Abr. 1979.
- | 7 | - DY LIACCO, T.E. System security: the computer's role. IEEE Spectrum, Jun. 1978. p. 43-50.

- | 8 | - ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Natio
nal system for supervision and coordination of the
brazilian interconnected electrical system: Executi
ve summary of the real time supervision system. Rio
de Janeiro, Jul. 1979.
- | 9 | - FREGOSI, A., ARANGO, H. Controle operacional e coorde
nação hidrotérmica no sistema brasileiro. Aceito pa
ra publicação na revista EFEI Pesquisa.
- | 10 | - HANDSCHIN, E., BONGERS, C. Theoretical and practical
considerations on the design of state estimators
for electric power systems. In: Proceedings of the
International Symposium Computerized Operation of
Power Systems (COPOS'75). Organizado por Savu Crivat
Savulescu. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing
Company, 1976. p. 104-136.
- | 11 | - DY LIACCO, T.E. Real-time computer control of power
systems. Proceedings of the IEEE, v. 62, Jul, 1974
p. 884-891.
- | 12 | - EJEBE, G.C., WOLLENBERG, B.F. Automatic contingency
selection. IEEE Transactions on Power Apparatus and
Systems, v. 98, Jan/Febr. 1979. p. 97-109.
- | 13 | - IRISARRI, G., SASSON, A.M., LEVNER, D. Automatic con-
tingency selection for on-line security analysis -
real-time tests. IEEE Transactions on Power Appara
tus and Systems, v. 98, nº 5, Sept/Oct. 1979. p.
1552-1559
- | 14 | - MONTICELLI, A., GARCIA, A., STOTT, B. Real-time exter
'
nal equivalents for static security analysis. IEEE
Transactions on Power Apparatus and Systems. v. 98,
Mar/Apr. 1979. p. 498-508.

- |15| - DENZEL, D., GRAF, R. On-line determination of external system equivalents. Study Committee 32, CIGRÉ, Meeting 1977 in Dortmund, Germany. p. 1-9.
- |16| - DEBS, A.S. Estimation of external network equivalents from internal system data. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 94, Mar/Apr. 1975. p. 273-279.
- |17| - WARD, J.B. Equivalent circuits of power-flow studies. AIEE Transactions, v. 68, 1949. p. 373-382.
- |18| - ASCHMONEIT, F.C., VERSTEGE, J.F. An external system equivalent for on-line steady-state generator outage simulation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 98, May/June. 1979. p. 770-779.
- |19| - DOPAZO, J.F., IRISARRI, G., SASSON, A.M. Real-time external system equivalent for on-line contingency analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 98, Nov/Dec. 1979. p. 2153-2171.
- |20| - DOPAZO, J.F., DWARAKANATH, M. H., LI, J.J., SASSON, A. M. An external system equivalent model using real-time measurements for system security evaluation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. v. 96, Mar/Apr. 1977. p. 431-446.
- |21| - CALVAER, A.J. Power system steady state linearization around an operating point and applications. Study Committee 32, CIGRÉ, Meeting 1979 in Minneapolis, USA, p. 1-41.
- |22| - CARPENTIER, J. System security in the differential injections method for optimal load flows. Power Systems Computation Conference. Proceedings. Cambridge, Sept. 1975. p. 2.2/7.

- |23| - BROWN, H.E. Interchange capability and contingency evaluation by a Z-matrix method. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 91, May/Jun. 1972. p. 1827-1832.
- |24| - BROWN, H.E. Contingencies evaluated by a Z-matrix method. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. v. 88, Apr. 1969. p. 409-412.
- |25| - DY LIACCO, T.E., SAVULESCU, S.C., RAMARAO, K.A. An on-line topological equivalent of a power system. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 97, Sept/Oct. 1978. p. 1550-1563.
- |26| - DIMO, P. Nodal analysis of power systems. Kent, Abacus Press, 1975.
- |27| - BROWN, H.E. Contingency evaluation methods of power systems by partial correction of Z-matrix. Power Industry Computer Application, Conference. Proceedings. Minneapolis, 1973. p. 397-401.
- |28| - DECKMANN, S., PIZZOLANTE, A., MONTICELLI, A., STOTT, B., ALSAÇ, O. Numerical testing of power system load flow equivalents. Aceito para publicação no IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.
- |29| - DECKMANN, S., PIZZOLANTE, A., MONTICELLI, A., STOTT, B., ALSAÇ, O. Studies on power system load flow equivalencing. Aceito para publicação no IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.
- |30| - BROWN, H.E. Grandes sistemas elétricos: métodos matriciais. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- |31| - ARANGO, H. Apectos computacionais dos sistemas elétricos de potência. Itajubá, EFEI, 1980.

- [32] - BRAMELLER, A., ALLAN, R.N., HAMAM, Y. M. Sparsity: its practical application to systems analysis. London, Pitman Publishing, 1976.
- [33] - MOROZOWSKY FILHO, M. Matrizes esparsas em redes de potência: técnicas de operação. Rio de Janeiro, 1973. [Tese de mestrado - COPPE, UFRJ].
- [34] - BUNCH, J.R., ROSE, D.J. Sparse matrix computation. New York, Academic Press, 1976.
- [35] - HARRISON, M.C. Data structures and Programming. Illinois, Scott, Foresman and Co, 1973.
- [36] - BERZTISS, A.T. Data structures, theory and practice. New York, Academic Press, 1975.

data 20, 10, 1980
ad. @PG
Seacao

I V O C BIM - EFEI	
DATA	Publicação

Publicado pela Editora da
Escola Federal de Engenharia de Itajubã

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200298

NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA