

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

AVALIAÇÃO E CONTROLE DA SEGURANÇA NO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO  
E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA.

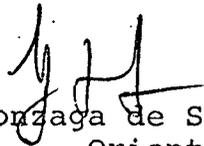
Geraldo Kindermann

Fevereiro - 1981

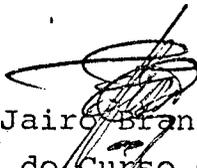
AVALIAÇÃO E CONTROLE DA SEGURANÇA NO PLANEJAMENTO DA  
TRANSMISSÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Geraldo Kindermann

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE  
EM ENGENHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM  
SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

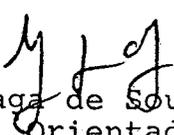


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.  
Orientador

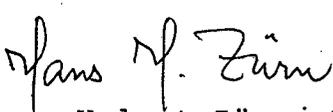


Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

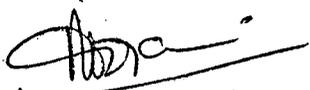
APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES:



Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.  
Orientador



Prof. Hans Helmut Zörn, Ph.D.



Prof. Rajamani Doraiswami, Ph.D.



Prof. Carlos Raul Borenstein, M.Sc.

À minha família

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

Ao professor Luiz Gonzaga de Souza Fonseca pela orientação segura, sugestões, e inestimável ajuda prestada durante todo o tempo de execução deste trabalho.

Agradeço a todos os colegas do departamento, que de uma forma ou de outra ajudaram na realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Catarina e o CNEN pelo apoio financeiro.

Í N D I C E

RESUMO ..... 1

ABSTRACT ..... 2

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO ..... 3

CAPÍTULO II - METODOLOGIA UTILIZADA ..... 8

    2.1 - Introdução ..... 8

    2.2 - Grafo do sistema ..... 9

        2.2.1 - Ramo orientado  $j$  ..... 9

        2.2.2 - Estado do ramo ..... 9

        2.2.3 - Nó ou barra  $p$  ..... 10

    2.3 - Configuração de um sistema ..... 10

    2.4 - Matriz admitância de barras ..... 11

    2.5 - Matriz impedância de barras ..... 11

    2.6 - Modificação da matriz impedância ..... 12

    2.7 - Fluxo de carga d-c ..... 13

    2.8 - Matriz de incidência dos ramos nos nós ... 17

    2.9 - Relação entre ângulos de ramos e ângulos  
        de barras ..... 8

    2.10 - Equacionamento do vetor de ângulos de ra-  
        mos em função de  $[P_G]$  ..... 18

    2.11 - Balanço de energia ..... 19

    2.12 - Vetor dos ângulos limites ..... 20

    2.13 - Politopo dos limites de defasagem ou poli-  
        topo ..... 22

|  |    |
|--|----|
| 2.13.1 - Semi-espaco viavel positivo ..... | 22 |
| 2.13.2 - Semi-espaco viavel negativo ..... | 23 |
| 2.13.2 - Faixa viavel do ramo i .....      | 23 |
| 2.14 - Limitacao dos geradores .....       | 26 |
| 2.15 - Politopo de geracao .....           | 28 |
| 2.16 - Caracteristicas das cargas .....    | 30 |
| 2.17 - Contingencia .....                  | 31 |
| 2.18 - Sobrecarga .....                    | 32 |
| 2.19 - Sistema viavel .....                | 33 |
| 2.20 - Sistema seguro .....                | 33 |
| 2.21 - Sistema inseguro .....              | 34 |
| 2.22 - Sistema em alerta .....             | 34 |
| 2.23 - Conclusao .....                     | 35 |

|  |    |
|--|----|
| CAPITULO III - EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO A SEGURANÇA .....                     | 36 |
| 3.1 - Introducao .....   | 36 |
| 3.2 - Matriz das Contingencias .....   | 36 |
| 3.3 - Expansão do sistema de transmissao considerando a linha mais sobrecarregada .....              | 37 |
| 3.3.1 - Vetor das defasagens máximas da configuração $C^0$ .....                                     | 38 |
| 3.3.2 - Vetor de sobrecarregamento .....   | 39 |
| 3.3.3 - Índice de sobrecarga .....   | 39 |
| 3.3.4 - Política da expansao da configuracao original com o ponto de operacao fora do politopo ..... | 40 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.5 - Expansão do sistema de transmissão ..  | 42 |
| 3.3.6 - Interpretação .....  | 42 |
| 3.4 - Expansão do sistema de transmissão através do<br>ponto mais afastado do politopo ..... | 45 |
| 3.4.1 - Análise e formulações para ponto den-<br>tro do politopo .....                       | 46 |
| 3.4.1.1 - Definição do vetor de sobre<br>carregamento .....                                  | 46 |
| 3.4.1.2 - Índice de sobrecarga .....   | 48 |
| 3.4.1.3 - Configuração debilitada ...  | 49 |
| 3.4.1.4 - Índice de penetração .....   | 49 |
| 3.4.2 - Análise para ponto fora do politopo .  | 52 |
| 3.4.3 - Interpretação .....  | 53 |
| 3.4.4 - Diagrama de bloco .....  | 54 |
| 3.5 - Conclusão .....  | 56 |
| <br>   |    |
| CAPÍTULO IV - REMANEJAMENTO DA GERAÇÃO .....   | 57 |
| 4.1 - Introdução .....   | 57 |
| 4.2 - Programação linear com função objetiva modifi-<br>cada .....                           | 59 |
| 4.3 - Politopo contráctil .....  | 66 |
| 4.4 - Índice de penetração .....   | 63 |
| 4.5 - Politopo normalizado .....   | 64 |
| 4.6 - Matriz capacidade dos ramos .....  | 64 |
| 4.7 - Equações normalizadas .....  | 64 |
| 4.8 - Mudança de variáveis de geração .....  | 65 |
| 4.9 - Gerador de referência .....  | 67 |

|   |    |
|---|----|
| 4.10 - Equacionamento de $[\psi_N]$ em função de $[p_G^*]$ ..                         | 68 |
| 4.11 - Diagrama de bloco do remanejamento da geração .....                            | 69 |
| 4.12 - Fluxograma do algoritmo do remanejamento da geração .....                      | 69 |
| 4.13 - Conclusão .....  | 71 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO V - EXEMPLOS .....   | 74 |
| 5.1 - Introdução .....  | 74 |
| 5.2 - Exemplos de reforços do sistema de transmissão pelos algoritmos propostos ..... | 74 |
| 5.3 - Exemplo do remanejamento da geração .....                                       | 83 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS .....  | 93 |
| 6.1 - Conclusões e comentários finais .....   | 93 |
| 6.2 - Aplicações .....  | 96 |
| 6.3 - Sugestões .....   | 97 |
| <br>  |    |
| BIBLIOGRAFIA .....  | 99 |

R E S U M O

Apresenta-se neste trabalho o problema da avaliação e controle da segurança no planejamento da transmissão e operação de sistema de energia elétrica.

São dados os conceitos básicos relativos à definição do modelo do sistema elétrico e definidos às restrições operativas da rede de transmissão, através de ângulos de ramos.

A partir destes limites definiu-se uma região, chamada politopo, que é básica para a definição de índices usados na caracterização da segurança do sistema.

São fornecidos dois algoritmos para a melhoria da segurança do sistema. Um através da expansão da rede de transmissão e o outro através do remanejamento da geração, fazendo-se uso de programação linear com definição conveniente da função objetivo.

São mostrados diversos exemplos para ilustrar a utilização e os resultados fornecidos pelos algoritmos.

A B S T R A C T

The problem of evaluation and control of security in planning and operation of electrical energy system, is presented.

The basic concepts relating to the definition of the electrical system model and the operating restrictions through the use of branch angle differences, are given from the limits of the angular differences, a region, termed herein as politope, is defined and this forms the basis for the definition of indices used to characterize the security of the system.

Two algorithms for improving the security of the system are given. One treats the transmission line expansion and the other treats the remanagement of the generations using the technique of linear programming with convenient definition of the objective function. Various examples are given to illustrate the utilization and the results of the proposed algorithms.

## C A P Í T U L O I

### INTRODUÇÃO

O constante crescimento da demanda de energia exige do planejamento e da operação de um sistema de energia elétrica, a formulação de alternativas, no sentido de oferecer opções que garantam a qualidade e continuidade de serviços, em condições normais e mesmo sob certas condições de defeito.

Do ponto de vista da operação as sobrecargas causadas pelas contingências poderão em geral, ser eliminadas pelo remanejamento da geração |1|, |4|, |5|, |7| - |15|.

Na operação em tempo real, o redespacho de geração (ou remanejamento) deve ser processado de maneira que o ponto de operação do sistema fique contido em uma região onde se garanta a segurança, de modo que a operação seja confiável.

Devido à aleatoriedade das cargas, é impossível determinar exatamente quais serão as condições reais de operação. Monitora-se então, o estado do sistema durante a operação, para se ter uma avaliação da sua segurança, uma vez que o ponto de operação será certamente diferente daquele planejado. Deve-se então, estabelecer um procedimento para a verificação em tempo real da segurança e especificar limites, função das contingências consideradas, a serem respeitados. Esta análise deve ser feita no menor tempo possível para que a estimativa da segurança seja o mais próximo possível do instante da operação |12|.

Por outro lado em planejamento deve-se analisar um grande número de alternativas, considerando algum critério de desempenho e restrições operativas, entre elas a segurança.

No planejamento e na operação em tempo real, faz-se uso de modelos simplificados, para se minimizar os esforços computacionais exigidos pelos métodos de cálculos |1|, |3|, |4|, |7|, |8|, |10|, |11|, |13| - |21|, |28|, |30|.

A formulação de modelos utilizando o fluxo de carga d-c, e suas comparações com o fluxo de carga A-C, tem sido estudados em |1|, |4|, |10|, |23|.

Na modelagem de sistemas elétricos muitas vezes, não figuram as componentes reativas, devido ao pequeno acoplamento com as potências ativas |1|, |4|, |5|, |7|; |10|, |17|, |18|, |24|. Pode-se, no entanto, utilizar-se a partir dos resultados obtido no fluxo d-c, um programa separado para conhecimento do fluxo de reativos.

O objetivo prioritário da operação em tempo real, é procurar manter em qualquer situação a segurança do sistema |1| - |5|, |10|, |25|. Com o sistema temporariamente em estado de emergência, procura-se deslocar o ponto de operação de maneira preventiva de modo que o sistema saia do estado de alerta e passe a operar com segurança |1| - |5|, |9|, |10|, |13|, |15|, |17|, |25|.

Em |26| resolveu-se o problema da melhoria da segurança apenas remanejando a geração de modo a aliviar a sobrecarga no sistema, buscando um ponto de operação pelo menos em estado de alerta, enquanto em |27|, faz-se o despacho ótimo sem levar essa conta a segurança do sistema.

A preocupação apresentada em |3|, |4|, |9|, |16|, |17|, consiste em deixar o sistema operando, obedecendo às restrições elétricas em contingência do tipo perda de linha, levando em conta o despacho ótimo feito através de programação linear, no qual o ponto de operação de uma determinada contingência fique no limiar dos limites, ou seja, sem folga.

Em |21|, realiza-se o despacho econômico através de programação linear, dentro de uma região fixada a 90% das restrições do sistema.

Estudos sobre as interrupções do sistema feito em |2|, mostram que as causas das mesmas são devido ao atendimento dos consumidores em estado de carregamento críticos, não se fazendo um estudo adequado quanto à prevenção antecipada do estado do sistema.

As prevenções do estado de alerta no sistema, devem ter prioridade, quando ocorre a perda de uma linha ou quando a linha fica fora de serviço devido a manutenção |2|. As correções de remanejamento para colocar o sistema em segurança devem ser processadas, para prevenir o risco de perdas de novas linhas, que podem provocar perdas em cascatas, com a consequente perda do sistema |1|-|3|.

Já em |5| é apresentado um procedimento para detectar rapidamente problemas de segurança no sistema, selecionando e mandando para um monitor as informações sobre as violações. Um monitor separado, deverá tomar as decisões necessárias para a segurança do sistema.

Em |15|, monta-se uma função objetivo correspondente a linha mais sobrecarregada, processando um algoritmo de modo

a diminuir a função passo a passo, colocando lentamente o ponto de operação do sistema na região de segurança.

Em [17], procura-se tornar o sistema seguro, para então, através de uma função objetivo, minimizar o custo da operação, usando como restrições as características dos geradores e as das linhas que sofreram violações em contingências.

Procura-se em [18] o conjunto de linhas a serem conectadas no sistema, de modo a ter o menor custo, obedecendo aos critérios de segurança.

Em [28] utiliza-se o fluxo de carga d-c para calcular os fluxos na linha. A segurança é testada segundo uma análise de contingência, em que se verifica a defasagem entre barras e a potência transmitida, que não devem ultrapassar certos limites. Através de um algoritmo de busca em grafos, adicionam-se linhas que produzem um conjunto de configurações ordenadas em relação ao custo.

Em [29], utiliza-se o fluxo de carga d-c para detectar sobrecarga no sistema de transmissão e adição de linhas conforme sua sobrecarga. No qual, a decisão depende entretanto de considerações sobre os aspectos não quantificáveis que influem nas configurações analisadas.

Procura-se, neste trabalho, resolver o problema da operação do sistema de potência conforme exposto adiante.

O dia a dia da operação do sistema, apresenta várias situações diferentes da planejada, deixando o sistema a operar em situações não previstas. Nestas situações, novas perturbações podem levar à perda, de continuidade da operação do sistema.

É então, necessário buscar um ponto de operação que dê ao sistema segurança para suportar as possíveis contingências no sistema.

Neste trabalho, usa-se um procedimento através do remanejamento da geração, que procura mudar o ponto de operação do sistema em estado de alerta, para um ponto de operação seguro, de modo a suportar perturbações tipo perdas de linha com relativa folga.

Em termos de planejamento propõem-se política de expansões de adições de linhas, de modo a buscar a segurança do sistema.

Dentro do capítulo II, são definidos e modelados todos os elementos necessários à formulação do trabalho proposto.

No capítulo III, são dados os algoritmos e seus elementos específicos, para o tratamento do problema da expansão de transmissão do sistema de potência.

Todas as formulações e tratamentos necessários para a programação linear adaptativa ao remanejamento da geração, são vistos no capítulo IV.

Serão mostrados exemplos de aplicações dos algoritmos sobre sistemas de potência dados no capítulo V.

No final serão apresentados diversas aplicações deste trabalho, como também serão sugeridas várias indicações para trabalhos futuros.

## C A P Í T U L O    I I

### METODOLOGIA UTILIZADA

#### 2.1 - Introdução

Neste capítulo é apresentada a modelagem matemática proposta para a solução do problema do planejamento da transmissão e o redespacho da geração na operação do sistema.

Considera-se que um sistema planejado é viável quando os pontos de operação do sistema em regime normal e sob contingências estão contidos em uma região de segurança. A expansão do sistema de transmissão de energia elétrica é feita, de modo que sejam mantidas as características acima. Neste sentido são apresentados os elementos para a formulação de dois algoritmos de expansão do sistema transmissão, discutidos no capítulo III.

Na operação, várias são as ocorrências que afetam o equilíbrio do sistema. Pontos de equilíbrios diferentes apresentam diferentes níveis de segurança que dependem de parâmetros do sistema, como por exemplo o nível de geração. Assim, apresenta-se também os elementos necessários para o desenvolvimento de um algoritmo que redespacha a geração com o objetivo de melhorar a segurança.

## 2.2 - Grafo do sistema

Grafo ou topologia de um sistema é uma estrutura formada por um conjunto de ramos, nós ou barras e suas conexões.

Neste trabalho, utilizam-se os conceitos abaixo.

### 2.2.1 - Ramo orientado j

Ramo orientado j ou simplesmente ramo j, é definido como sendo a ligação existente entre o nó (barra) p e q, com o sentido de p para q, se  $p < q$ .



Assim,

$$\text{ramo } j = R(p, q)$$

onde, p - barra onde começa o ramo j

q - barra onde termina o ramo j

### 2.2.2 - Estado do ramo

Estado do ramo j ( $ESTA_j$ ), é definido como sendo o número de arcos (linhas) contidos no ramo j.

Se  $ESTA_j = 0$ , o ramo j não existe fisicamente no grafo.

Então, em termos de grafo, um ramo fica caracterizado por:

- índice do ramo
- estado do ramo
- barra inicial do ramo
- barra final do ramo.

### 2.2.3 - NÓ ou barra p

É o elemento de conexão de dois ou mais ramos.

### 2.3 - Configuração de um sistema

A configuração de um sistema elétrico é caracterizada pelo grafo, juntamente com as considerações físicas dos elementos do sistema.

Então

$C(G,F)$  - configuração de um sistema elétrico

$G$  - grafo do sistema elétrico

$F$  - conjunto das características físicas do sistema associadas aos elementos de  $G$ .

Dentro destes aspectos, a característica física de uma linha de transmissão do sistema elétrico, associada a um arco de um ramo do grafo é a sua impedância série.

As perdas no sistema não são consideradas, isto é, as resistências série serão desprezadas ([1], [4]-[7], [10], [11], [17], [18], [20], [22]-[24], [30]), tendo em vista que o valor da reatância série da linha é bem maior que a sua resistência série.

Assim,

$x_{jk}$  - reatância série da linha  $k$  que compõe o ramo  $j$ .

Se  $ESTA_j > 1$ , considera-se que as linhas de transmissão que compõe o ramo  $j$  são de mesma capacidade.

#### 2.4 - Matriz admitância de barras

A geração desta matriz é feita por um processo simples e rápido ([1], [6], [10], [11], [17], [28], [30]), como é indicado a seguir:

$$Y_{ij} = - \frac{ESTA_{k(ij)}}{x_{k(ij)}} , \quad \forall \quad i \neq j$$

(2.5.1)

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^{NB} \frac{ESTA_{k(ij)}}{x_{k(ij)}}$$

onde, NB - número de barras no sistema.

A matriz de admitância aumentada  $[Y_a]$ , de ordem  $NB \times NB$  é singular.

Escolhe-se então uma barra como referência, o que implica na retirada da linha e coluna correspondente à respectiva barra, obtendo-se assim a matriz de admitância  $[Y_b]$  de ordem  $(NB-1) \times (NB-1)$ .

#### 2.5 - Matriz impedância de barras

A matriz impedância é obtida pela inversão da matriz  $[Y_b]$ . Tal inversão é feita através do método de Shipley ([31]), que tem as seguintes vantagens:

- inverte a matriz dentro da própria área do compu

tador reservada à matriz original.

- faz operações duplas simultâneas com linhas e colunas, diminuindo o tempo computacional.

Nota-se

$[Z_b]$  - matriz impedância de ordem  $(NB-1) \times (NB-1)$ .

Neste trabalho a inversão é exigida uma única vez para cada configuração. Nas modificações nos estados da configuração do sistema, é utilizada a matriz  $[Z_b]$  original para a obtenção da nova matriz  $[Z_b]$ .

## 2.6 - Modificação da matriz impedância

As simulações das contingências, são feitas através de modificações na matriz impedância do sistema original, ( $[1]$ ,  $[11]$ ,  $[30]$ ,  $[32]$ ), as quais são executadas pelo processo indicado em  $[32]$ .

O processo, numa forma compacta, é apresentado abaixo:

$$Z_{ij} = Z_{ij} - \frac{(Z_{pi} - Z_{qi})(Z_{pj} - Z_{qj})}{Z_{pp} + Z_{qq} - Z_{pq} - Z_{qp} \pm x_k} \quad \forall i, j=1, NB-1 \quad (2.6.2)$$

Onde o ramo  $k$  é o elemento que está sendo modificado. Na retirada de linha usa-se o sinal (-) e na adição de linha o sinal (+).

Esta formulação é utilizada nos testes do sistema na análise das simulações das contingências e da sua expansão, e apresenta as seguintes vantagens:

- não cria uma nova matriz
- não cria nova linha e coluna
- não opera sobre a matriz aumentada, para eliminar a nova linha e coluna.

## 2.7 - Fluxo de carga d-c

O fluxo de carga d-c é utilizado com muita frequência no planejamento e controle em tempo real do sistema de potência ([1], [4], [5], [7], [10], [11], [17]-[20], [22], [23], [28], [20]).

A potência ativa em uma linha de transmissão (L.T.) em Extra Alta Tensão/Ultra Alta Tensão (EAT/UAT), neste caso, é diretamente proporcional à diferença angular entre os nós extremos da linha e flui no sentido da barra de maior ângulo para a barra de menor ângulo.

O fluxo de carga d-c é análogo a um fluxo de carga feito em um sistema de corrente contínua, onde a corrente elétrica é análoga à potência ativa e a d.d.p. representa a defasagem angular da linha do sistema de potência ([1]).

O fluxo de carga d-c, permite estimar com precisão aceitável o fluxo de potência ativa usado em muitas aplicações, desenvolvendo menor esforço computacional.

Vários autores fizeram estudos comparativos do fluxo de carga d-c com o fluxo de carga A-C, conforme a literatura mostrada no capítulo I, deste trabalho.

Os erros percentuais verificados quando se utiliza o modelo d-c para estimar os fluxos de potência ativa são menores para as ligações mais sobrecarregadas, e estas são as ligações

de maior interesse quando se pretende verificar as condições de segurança do sistema, como ocorre freqüentemente no estudo da expansão do sistema de transmissão e na monitorização da segurança através de um centro de supervisão e controle [1] [17].

Um estudo completo do fluxo de carga d-c é feito em [1], o qual apresenta vários exemplos comparativos dos modelos.

O equacionamento do modelo para o fluxo de carga d-c é:

$$[\theta_b] = [z_b] \cdot [P_L] \quad (2.7.3)$$

onde,  $[P_L]$  - vetor coluna das potências líquidas injetadas nas barras do sistema.

$[\theta_b]$  - vetor coluna dos ângulos de barras em relação ao ângulo da barra de referência.

Neste trabalho, a barra 1 é escolhida como barra de referência, onde, arbitrariamente fixa-se um valor de ângulo. Por conveniência e simplicidade escolhe-se o valor zero ( $\theta_{b1} = 0^\circ$ ) ([1], [3]-[30]). A barra 1 deverá ser uma barra de geração.

A potência líquida  $p_{Li}$  injetada na barra  $i$ , é composta de duas parcelas:

- uma parcela é a potência fornecida pelo gerador  $i$  à barra  $i$ , que é designada por  $p_{GBi}$ .
- a outra parcela, corresponde à potência absorvida pela carga  $i$  conectada diretamente na barra  $i$ , designada por  $p_{Ci}$ .

Portanto,

$$[P_L] = [P_{GB}] - [P_C] \quad (2.7.4)$$

Dependendo da ordem da enumeração das barras no sistema, o vetor  $[P_{GB}]$  poderá apresentar lacunas no seu enchimento, porque nem todas as barras contêm geradores.

Com o objetivo de aproveitar a esparsidade, compactação e arranjo adequado para o processo da formulação do remanejamento da geração, a ser apreciado no capítulo IV, é feita uma ordenação de barras, onde a enumeração seqüencial segue a ordem da abaixo:

- a primeira barra é uma barra de geração e é tomada como referência.
- as seguintes são as barras que contêm geradores.
- as restantes são as barras sem geração.

Assim, o vetor  $[P_{GB}]$  de dimensão  $NB \times 1$ , tem a forma abaixo:

$$[P_{GB}] = [P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GNG}, 0, \dots, 0]^t \quad (2.7.5)$$

NG - número de barras de geração do sistema.

Em forma matricial,

$$[P_{GB}] = [[P_{GA}]^t : [0]]^t \quad (2.7.6)$$

onde o vetor  $[P_{GA}]$ , obedece os dois itens da ordenação de barras, isto é

$$[P_{GA}] = [P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GNG}]^t \quad (2.7.7)$$

O vetor  $[P_c]$ , segue a ordenação correspondente das barras, segundo a seqüência acima.

O vetor  $[P_{GA}]$  é particionado pela primeira barra de referência e fica

$$[P_{GA}] = [P_{G1} : [P_G]]^t \quad (2.7.8)$$

De (2.7.3), (2.7.4), (2.7.6) e (2.7.8), procede o seguinte desenvolvimento:

$$[\theta_b] = [z_b] \cdot ([P_{GB}] - [P_C]) \quad (2.7.9)$$

observa-se que, pela característica do vetor  $[P_{GB}]$ , onde os NG-1, em ordem seqüencial, são não nulos e os restantes todos nulos, o produto do primeiro termo é então modificado. São utilizadas apenas as NG-1 colunas da matriz  $[z_b]$ :

$$[z_b] = \left[ [z_G] : [z_{\tilde{NG}}] \right], \quad (2.7.10)$$

onde a matriz  $[z_G]$ , representa apenas as NG-1 colunas da matriz  $[z_b]$ .

Assim, com o uso das equações (2.7.6), (2.7.9) e (2.7.10) obtêm-se:

$$[\theta_b] = \left[ [z_G] : [z_{\tilde{NG}}] \right] \begin{bmatrix} [P_G] \\ \dots \\ [0] \end{bmatrix} - [z_b] \cdot [P_C]$$

$$[\theta_b] = [z_G] \cdot [P_G] - [z_b] \cdot [P_C] \quad (2.7.11)$$

A parcela  $[z_b][P_C]$ , representa os ângulos das bar

ras em relação à barra de referência, quando a demanda respectiva é assegurada pelo gerador de referência, ou seja, quando  $[P_G] = [0]$ .

Pela equação (2.7.11) consegue-se então uma função

$$f : R^{NG-1} \longrightarrow R^{NB-1}$$

$$[P_G] \longrightarrow f([P_G]) = [\theta_b]$$

### 2.8 - Matriz de incidência dos ramos nos nós

É uma matriz extraída da topologia da configuração, que expressa matematicamente a forma em que os ramos estão ligados aos nós.

É a matriz  $A_{(NB-1) \times NR}$  onde

$$a_{ij} = \begin{cases} + 1 & \text{se o ramo } j \text{ sai da barra } i \\ - 1 & \text{se o ramo } j \text{ entra na barra } i \\ 0 & \text{se o ramo } j \text{ não esta conectado na barra } i \end{cases} \quad (2.8.12)$$

Na simulação das contingências das retiradas de L.T., há dois casos a considerar:

- o ramo  $j$  onde é feita a contingência, permanece com o seu estado  $ESTA_j \neq 0$ . Neste caso a matriz  $[A]$ , não se modifica.
- se a retirada da L.T., faz com que o estado do ramo fique zero, permanecendo o sistema conexo, a matriz  $[A]$  perde a respectiva coluna.

2.9 - Relação entre ângulos de ramos e ângulos de barras

Define-se o vetor ângulos de ramos  $[\psi]$ , como sendo:

$$[\psi] = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{NR}]^t$$

onde,  $\psi_i$  - defasagem do ramo  $i$ , de acordo com o sentido do fluxo dada em 2.2.

A relação entre  $[\psi]$  e  $[\theta_b]$  é dada por:

$$[\psi] = [A]^t \cdot [\theta_b] \quad (2.9.13)$$

2.10 - Equacionamento do vetor de ângulos de ramos em função de [PG]

Procura-se achar uma expressão que relacione o vetor de ângulos de ramos  $[\psi]$  com as potências injetadas pelos geradores  $[PG]$  nas suas barras correspondentes. Ou seja, uma função  $f$  tal que

$$f : R^{NG-1} \longrightarrow R^{NR}$$

$$[PG] \longrightarrow f([PG]) = [\psi]$$

Utilizando as equações (2.7.11) e (2.9.13), temos:

$$[\psi] = [A]^t [\theta_b] = [A]^t ([Z_G] [P_G] - [Z_b] [P_C])$$

$$[\psi] = [A]^t [Z_G] [P_G] - [A]^t [Z_b] [P_C] \quad (2.10.14)$$

O último termo da expressão (2.10.14), pode ser interpretado como sendo as defasagens nos ramos que existiriam se  $[P_G] = [0]$ , e todas as cargas fossem alimentadas somente pelo gerador de referência. Esta interpretação é uma variação daquela apresentada em [11].

A equação (2.10.14), no capítulo IV, com utilização específica no remanejamento da geração, será normalizada para a utilização na resolução do problema através da programação linear.

### 2.11 - Balanco de energia

Dentro das considerações estipuladas neste trabalho, todas as potências geradas são integralmente consumidas pelas respectivas cargas distribuídas nos barramentos do sistema. Portanto, o balanço de energia é instantaneamente e integralmente satisfeito entre a geração e demanda do sistema, isto é, a seguinte relação será sempre verificada.

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{Gi} = \sum_{j=1}^{NB} P_{Cj} \quad (2.11.15)$$

Esta equação representa um hiperplano do  $R^{NG}$  ([35]), onde o remanejamento da geração pode ser efetuado e é chamado de hiperplano da demanda.

## 2.12 - Vetor dos ângulos limites

As limitações de fluxo são formulados em termos de defasagens máximas dos ângulos entre barras, dentro das características das potências limites de tráfego pela linha.

O limite de potência de uma linha é definido como sendo a potência máxima que pode fluir pela linha, e é dada pela potência mínima entre aquelas associadas com as limitações abaixo:

- limite de temperatura da L.T.
- limite em corrente da L.T.
- limite em queda de tensão da linha
- limite da distância mínima da flexa máxima a terra
- limite da defasagem do ramo na consideração da segurança da estabilidade do sistema.

As limitações relativas a cada ramo, são armazenadas no vetor limite de potência  $[P_{LT}]$ , sendo  $P_{LTi}$  o limite de potência do ramo  $i$ .

Hã vantagens de se utilizar as limitações em termos de defasagem angular dos ramos ( $[1], [10], [11], [17], [18], [20]$ ), devido ao fato de todas as linhas do ramo estarem submetidas à mesma diferença angular, sendo diretamente relacionadas com os fluxos de energia.

As transformações dos limites de fluxo de uma linha para a respectiva defasagem do ramo, são dadas abaixo ( $[1], [10], [11], [18], [20]$ ).

A expressão particular de uma linha é:

$$p_i = \frac{\psi_i}{x_i} \quad \text{ou} \quad \psi_i = x_i p_i \quad (2.12.16)$$

sendo,

$p_i$  - potência que flue na linha.

Usando a potência limite da L.T., as defasagens máximas dos ramos são:

$$\psi_{Mi} = x_i \cdot P_{LTi} \quad \forall \quad i = 1, \dots, NR \quad (2.12.17)$$

onde,

$\psi_{Mi}$  - defasagem máxima do ramo  $i$ , respeitado o seu limite de potência.

Assim sendo, em qualquer ramo, sem fazer estudos sobre as capacidades de transmissão de potência pelo ramo, pode-se definir sobrecarregamento em termos de defasagens de ramo, que não muda com a colocação ou retirada de linha do sistema. Já com o tratamento feito em potência o seu limite muda com a mudança de linha no ramo, limitando e dificultando a formação de índice de sobrecarga e/ou segurança normalizado baseado em um mesmo referencial.

O único cuidado a ser tomado com a análise recomendada, é no caso da simulação de contingência com perda de linha no qual o ramo deixa de existir fisicamente na configuração. Pelo tratamento normal do fluxo de carga existe a defasagem angular nas respectivas barras, devido às interligações de linhas pelos ou

tros laços, já que a configuração permanece conexa. Estas considerações são previstas e contornadas dentro dos algoritmos a serem apresentados.

### 2.13 - Politopo dos limites de defasagem ou politopo

Apresenta-se a seguir, definições para o tratamento e entendimento da região obtida pela intersecção de semi-espacos, obtidos pelas restrições das defasagens angulares dos ramos do sistema, chamada de politopo.

Cada ramo  $i$ , possui duas restrições, uma  $\psi_{Mi}$  e outra  $-\psi_{Mi}$  e o hiperplano característico associado a este ramo  $i$  é definido como sendo a  $i$ -ésima linha de (2.10.14).

#### 2.13.1 - Semi-espaco viável positivo

Para o ramo  $i$ , utiliza-se o semi-espaco viável positivo como limitação superior de seu grau de liberdade, definido por:

$$\pi_{i+} = \{ [\psi] / [e_i]^t \cdot [\psi] \leq \psi_{Mi}, [e_i] \text{ e } [\psi] \in R^{NR} \} \quad (2.13.15)$$

onde:

$[e_i]$  - é o  $i$ -ésimo vetor da base padrão normal do espaco  $R^{NR}$ , suas componentes são todas nulas exceto a da posição  $i$ -ésima que é igual a 1.

O elemento  $\psi_{Mi}$ , pode ser tratado como escalar ou uma matriz  $1 \times 1$ .

O último termo da expressão (2.13.15) pode ser interpretado como um produto matricial ou como um produto interno de vetores. Esta última interpretação é mais interessante, devido ao maior relacionamento com o uso dos hiperplanos, que é explorado neste trabalho.

A expressão (2.13.15), define um semi-espaco conexo do  $R^{NR}$ , que restringe os fluxos de energia nos ramos, limitado superiormente pelo hiperplano  $[e_i] [\psi] = \psi_{Mi}$ .

### 2.13.2 - Semi-espaco viável negativo

As restrições dos fluxos negativos de energia no ramo  $i$ , são consideradas tomando-se o semi-espaco viável negativo  $(\pi_{i-})$ , definido por:

$$\pi_{i-} = \{ [\psi] / [e_i] [\psi] \geq -\psi_{Mi} ; [e_i] e [\psi] \in R^{NR} \} \quad (2.13.16)$$

Assim, o semi-espaco  $\pi_{i-}$ , é um conjunto convexo, limitado inferiormente pelo hiperplano  $[e_i] \cdot [\psi] = -\psi_{Mi}$ .

### 2.13.3 - Faixa viável do ramo $i$

A faixa viável do ramo  $i$  ( $\pi_i$ ), é a região de viabilidade de todos os fluxos de energia no respectivo ramo, dada pela intersecção dos semi-espacos viáveis.

$$\pi_i = \{ [\psi] / [\psi] \in \pi_{i+} \cap \pi_{i-} \text{ e } [\psi] \in R^{NR} \} \quad (2.13.17)$$

Observa-se que  $\pi_i$  é convexo ([35]).

Segue, então a definição do politopo dos limites de defasagem ou politopo ( $\pi$ ):

"É o conjunto de todos os pontos do  $R^{NR}$  que pertencem à região (conjunto convexo) formada pela intersecção de todas as faixas viáveis dos ramos".

$$\pi = \{ [\psi] / [\psi] \in \bigcap_{i=1}^{NR} (\pi_i) \text{ e } [\psi] \in R^{NR} \} \quad (2.13.18)$$

Então o politopo  $\pi$  é um conjunto convexo contido no  $R^{NR}$ , cujas faces são hiperplanos características do respectivo espaço.

Com esta formulação, pode-se tirar várias conclusões sobre o estado do sistema elétrico.

O vetor  $[\psi]$ , é um ponto do espaço  $R^{NR}$ , e suas componentes contêm todas as informações das diferenças angulares dos ramos do sistema, obtidos pela solução do fluxo de carga.

A seguir faz-se uma interpretação da posição relativa entre o ponto de operação do sistema e o politopo.

a) Ponto de operação dentro do politopo

Se na operação de um sistema elétrico normal, o ponto  $[\psi]$  estiver contido dentro do politopo  $\pi$ , a operação é viável, porque em nenhuma L.T. é ultrapassado o respectivo limite.

Em contra partida, com o "aprofundamento" do ponto para o interior do politopo, ocorre uma redistribuição dos fluxos pelas linhas do sistema, resultando em um ponto de operação mais seguro (robusto) que "resiste" melhor às perturbações. Desta maneira, o grau de "profundidade" da penetração do ponto de operação no politopo, dá origem a um índice de ponderação da "folga" do sistema original, o qual é utilizado como referência para decidir e avaliar diversas situações do sistema.

Se o ponto de operação do sistema se aproxima da fronteira do politopo, em função de mudanças nos parâmetros do sistema, isto indica que alguma linha ou linhas de transmissão estão com os seus fluxos se aproximando de seus respectivos limites.

Serão dadas, mais tarde, definições com utilização do conceito do politopo, quando a segurança do sistema for analisada em relação a contingências.

#### b) Ponto de operação fora do politopo

Com o ponto de operação do sistema fora do politopo, o sistema está operando em situação crítica e sob emergência, com alguma ou algumas linhas além de seu limite de potência, significando, de qualquer maneira, que o sistema está sobrecarregado. A operação com o ponto fora do politopo, indica então um sistema sobrecarregado ou com sobrecarga.

Dependendo da situação relativa do ponto de operação, a linha sobrecarregada será um elo fraco no sistema, colocando o mesmo em risco [2].

Pode-se corrigir esta situação, colocando-se o ponto de operação do sistema para dentro do politopo, através de:

- expansão do sistema de transmissão
- remanejamento da geração
- alívio de carga

As duas primeiras situações acima, não prejudicam a continuidade de serviço e são assunto deste trabalho.

A primeira será utilizada para o planejamento, enquanto que a segunda será usada na operação em tempo real.

Conforme a situação da sobrecarga, com sistema sob controle e por um determinado tempo, pode-se operar em estado de emergência. Isto dependerá do conhecimento do comportamento do sistema e de uma avaliação do grau de sobrecarga, que pode ser medida pelo afastamento da operação em relação ao politopo.

Quando procura-se fazer uma análise mais apurada do sistema através do fluxo de carga A-C, pode-se fazer uma pré-seleção das contingências, utilizando-se o índice de afastamento do ponto ao politopo, obtido após o cálculo do fluxo de carga d-c.

#### 2.14 - Limitação dos geradores

Os geradores são responsáveis pelas injeções de potência nas barras do sistema e a distribuição do fluxo é dada pela configuração física do sistema de acordo com a distribuição de carga nos barramentos.

Os geradores são máquinas síncronas projetadas para operarem dentro de certos limites, sob pena de dano ou diminui

ção no tempo de sua vida útil.

As condições limitativas dos geradores são obtidas através de considerações que conciliam os estudos de desempenho teóricos e práticos da máquina frente ao sistema de potência.

O conjunto gerador e máquina primária impõem limitações tanto elétricos como mecânicos.

As regiões, em termos mais práticos e operativas da máquina são dadas pelo seu diagrama de capacidade, onde as suas fronteiras mostram situações diferentes de limitações físicas das máquinas e dependem de fatores tais como: cavitação, limitações de potência, aquecimento, estabilidade, excitação, etc ... .

Usa-se, em termos gerais, para as limitações de potência dos geradores, as limitações máximas e mínimas dadas por ([1], [4], [10], [11], [17]):

- potência máxima:

$$[P_{GMAX}] = [P_{GMAX 1}, P_{GMAX 2}, \dots, P_{GMAX NG}]^t \quad (2.14.19)$$

onde,

$P_{GMAX i}$  - é a potência máxima do gerador i.

- potência mínima:

$$[P_{GMIN}] = [P_{GMIN 1}, P_{GMIN 2}, \dots, P_{GMIN NG}]^t \quad (2.14.20)$$

onde,

$P_{GMIN i}$  - é a potência mínima do gerador i.

Assim, o sistema deve operar com os geradores operando individualmente dentro das suas faixas de limitação. O re manejo da geração, deverá se processar dentro destas faixas, de modo a buscar as melhores condições para a segurança do siste ma.

### 2.15 - Politopo de geração

Sabendo que os geradores são máquinas elétricas su jeitas a limitações, espera-se então que se possa planejar e ope rar um sistema de modo que seu ponto de operação esteja contido na zona de segurança e que suas linhas tenham "equi-folgas" em suas limitações, e possam suportar quaisquer perdas de linhas.

Levando em conta as limitações dos geradores, será formulado um politopo de geração  $\pi_G$ .

#### - semi-espaco de geração superior

Dado por:

$$\pi_{G_i \text{ sup}} = \{ [P_G] / [e_i] \quad [P_G] \geq p_{G \text{ MIN } i} \text{ e } [e_i], [P_G] \in R^{NG} \}$$

$$\forall \quad i=1, \dots, NG \quad (2.15.21)$$

São levados em conta, as mesmas considerações fei tas no item 2.13.

#### - semi-espaco de geração inferior

Dado por:

$$\pi_{G_i \text{ Inf}} = \{ [P_G] / [e_i] \quad [P_G] \leq p_{G \text{ MAX } i} \text{ e } [e_i], [P_G] \in R^{NG} \}$$

$$\forall \quad i=1, \dots, NG. \quad (2.15.22)$$

Os dois semi-espacos individualmente dividem o espaco  $R^{NG}$  em duas regioes convexas, tendo como separacao os hiperplanos fronteiras caracteristicas destes espacos.

- Faixa espaco do gerador

Dentro do espaco  $R^{NG}$ , cada unidade de maquina  $i$ , tem como viabilidade de operacao uma faixa espaco limitadas por dois hiperplanos, inferior e superior, dado por:

$$\pi_{G_i} = \{ [P_G] / [P_G] \in \pi_{G_i, \text{sup}} \cap \pi_{G_i, \text{inf}} \text{ e } [P_G] \in R^{NG} \} \quad \forall i=1, \dots, NG \quad (2.15.23)$$

Assim,  $\pi_{G_i}$  e a interseccao de dois semi-espacos caracteristicos de uma unidade de geracao.

Tendo por base esta formulacao, pode-se caracterizar o politopo de geracao.

Politopo de geracao  $\pi_G$  e o conjunto de todos os pontos  $[P_G] \in R^{NG}$  e pertencentes a regioe dada pela interseccao de todas as faixas de geracao do sistema.

$$\pi_G = \{ [P_G] / [P_G] \in \bigcap_{i=1}^{NG} (\pi_{G_i}) \text{ e } [P_G] \in R^{NG} \} \quad (2.15.24)$$

O politopo de geracao, e um conjunto convexo contido no  $R^{NG}$ , cujas faces sao hiperplanos caracteristicos deste espaco.

A analise dos pontos de operacao utilizando os politopos, e simples e fornece boas interpretacoes para o entendimento

mento de diversas situações do sistema.

Levando em conta que um gerador é um elemento vital e de alto custo, não é aceitável a sua operação fora do politopo de geração, pois isto implicaria que alguma máquina opera fora de seu limite, com sérios riscos para ela e a rede.

Assim, o ponto de operação é aceitável quando estiver simultaneamente:

- sobre o hiperplano da demanda (2.11.15)
- dentro do politopo de geração (2.15.24)
- dentro do politopo  $\pi$  (2.13.18)

Uns dos objetivos, em termos de segurança, é efetuar o remanejamento da geração sobre o sistema original, de modo que o ponto  $[\psi]$  penetre o mais possível no politopo  $\pi$ , de tal maneira que todos os pontos de operação sob contingência fiquem dentro do politopo, mantendo alguma margem de folga. Isto é proposto no capítulo IV, a partir da definição de índice de segurança.

#### -2.16 - Características das cargas

Neste trabalho as cargas são consideradas pré-fixadas mediante estudos específicos e distribuídas no sistema.

O planejamento do sistema deve fornecer alternativas para o atendimento das referidas cargas.

O planejamento da geração deve ser feito de modo a fornecer alternativas que supram a demanda, sem restringir a flexibilidade operativa, de modo que seja possível, quando necessã

rio, remanejar a geração para melhorar a qualidade da operação.

A demanda total  $D$  é dada por:

$$D = \sum_{i=1}^{NB} P_{Ci} \quad (2.16.25)$$

Do ponto de vista do planejamento da geração é necessário que a demanda total seja tal que:

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{GMIN\ i} < D < \sum_{j=1}^{NG} P_{GMAX\ j} \quad (2.16.26)$$

Sem considerar os aspectos econômicos e o sistema de transmissão, a situação que oferece maior flexibilidade operativa, fornecida pelo planejamento da geração, é

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{NG} P_{GMIN\ i} + \sum_{j=1}^{NG} P_{GMAX\ j}}{2} \quad (2.16.27)$$

Com a demanda total  $D$ , condicionada ao valor acima, tem-se uma folga que facilita o remanejamento da geração aumentando o controle da segurança do sistema.

### 2.17 - Contingência

Contingência é definida neste trabalho como sendo a perda de qualquer linha de transmissão do sistema elétrico.

A perda de linha altera a distribuição dos fluxos de energia nas linhas remanescentes, podendo produzir sobrecarga na

rede. O ideal, em termos de segurança é que com a perda de qualquer linha do sistema, os pontos de operação sob contingência sempre permaneçam dentro do politopo.

Uma análise de contingência é feita com a retirada de todas as linhas do sistema, uma de cada vez ([1], [4], [7], [15]). Não há uma maneira geral de se obter uma seqüência definida em termos de criticalidade ([4], [7], [8]). Existem vários estudos de relação de contingência, que dependem dos modelos e formulações impostas ([14], [22]-[24]), que visam indicar as contingências mais críticas.

#### 2.18 - Sobrecarga

Um sistema é dito sobrecarregado ou com sobrecarga quando alguma linha do sistema está transportando um fluxo de potência além dos seus limites, ou de outra forma, o ponto de operação está fora do politopo  $\pi$ .

Propõem-se, nos capítulos seguintes dois índices de sobrecarga para um sistema elétrico. Há certa dificuldade na formulação genérica dos índices de sobrecargas ([1]-[3], [18], [34]), devido ao fato de que para a mesma configuração, existe a dependência sobre o nível de geração e distribuição da demanda. Normalmente, cada empresa emprega os índices adequados às suas situações.

## 2.19 - Sistema viável

Considera-se um sistema viável, quando seu ponto de operação, satisfaz as condições abaixo ([3]):

- o ponto está sobre o hiperplano da demanda
- o ponto está dentro do politopo de geração
- o ponto está dentro do politopo  $\pi$ .

O sistema viável apenas produz um ponto de operação do sistema, não indicando nada sobre a sua situação sob contingência. Observa-se que para uma mesma configuração, existe uma infinidade de pontos de operação viáveis.

## 2.20 - Sistema seguro

Um sistema é seguro, quando ele e todas as configurações advindas das contingências permaneçam mantendo a condição de sistema viável [1]-[4], [10], [15]-[18], [25], [26].

As perturbações empregadas para a formulação das condições de segurança, são as obtidas pelas simulações das contingências no sistema.

Para um mesmo sistema, dependendo das suas características físicas, pode haver uma infinidade de pontos de operação no qual o sistema permanece seguro.

De toda maneira, para qualquer sistema, o objetivo desejado é manter sempre o sistema operando em segurança. Satisfeita esta condição, pode-se então, procurar um ponto de operação mais econômico para o sistema.

Na ocorrência de qualquer perturbação a prioridade é manter a segurança. Em seguida, normalmente, deve-se procurar outro despacho de geração, considerando os critérios econômicos, mantendo a segurança.

#### 2.21 - Sistema inseguro

Qualquer sistema ou configuração é insegura quando o seu ponto de operação estiver fora do politopo  $\pi$ .

Assim, a posição deste ponto de operação fica:

- sobre o hiperplano da demanda
- dentro do politopo de geração
- fora do politopo  $\pi$ .

Procura-se sempre supervisionar e controlar o sistema de maneira que o ponto de operação, em alguma situação de futura perturbação, não deixe o sistema em condição insegura. Esta situação é conhecida por segurança preventiva do sistema [1], [2], [4].

#### 2.22 - Sistema em alerta

Um sistema está em estado de alerta, quando ele é viável, mas o ponto de operação para alguma contingência deixa o sistema inseguro [1].

No controle preventivo do sistema, com a supervisão em tempo real, procura-se detetar quando o sistema fica em estado de alerta, e toma-se medidas corretivas através do remanejamento,

para tirar o sistema deste estado é levá-lo ao estado seguro.

Um sistema pode ficar em estado de alerta quando o corre alguma modificação estrutural no sistema, como por exemplo equipamento importante entra em manutenção [2].

### 2.23 - Conclusão

Procurou-se, neste capítulo, apresentar os conceitos básicos, correspondentes ao tratamento da expansão e operação do sistema de potência.

Foram dadas algumas definições relativa a grafos e à descrição do sistema elétrico considerado.

Discutiu-se o fluxo de carga D-C e introduziu-se a definição de politopo ligado a linhas de transmissão e à geração. A intersecção destes politopos, conforme mostrado, é uma região de pontos de operação viáveis. Em função disto, foram apresentados os conceitos de sistema sobrecarregado, seguro, inseguro e em alerta.

Estes conceitos serão usados nos capítulos seguintes para a definição do problema de melhoria da segurança.

## C A P Í T U L O    I I I

## EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO A SEGURANÇA

3.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados dois procedimentos de alteração do sistema de transmissão original, que permitem que seja alcançada a condição de segurança para o mesmo.

As decisões de alteração de linhas são baseadas em índices que indicam as linhas a serem inseridas no sistema. Os índices serão formulados e aplicados dependendo da filosofia usada.

Serão apresentadas várias definições adicionais para a completa apreciação dos algoritmos.

3.2 - Matriz das Contingências

A matriz das contingências  $[C]_{NR \times NR}$  é formada simulando-se as retiradas de linha e armazenando-se os novos pontos  $[\psi]$  do sistema na linha respectiva da matriz  $[C]$ . Cada linha da matriz  $[C]$  corresponde a uma contingência e cada coluna representa todos os valores de defasagem angular do respectivo ramo ([18]).

Assim,  $C_{ij}$  corresponde ao valor da defasagem do ramo  $j$ , correspondente a contingência  $i$  obtida da configuração original.

A matriz  $[C]$  contém todas as informações das contin

gências relativas a um determinado sistema original  $C^0$ .

Quando critérios de seleção de contingência [14], [22], [23], são utilizados, a matriz [C] fica reduzida ao número de linhas especificado de acordo com o critério adotado. Esta redução também pode ser obtida com o emprego de métodos heurísticos no sistema.

Em simulações de contingências, pode ocorrer que o ramo relacionado a uma contingência fique com o estado do ramo igual a zero, indicando assim que a configuração perdeu o ramo. Sem a presença física do ramo não há fluxo de energia, porém existe defasagem angular entre as duas barras, devido a interligações através de outros ramos, porque o sistema permanece conexo. Isto, exige uma pequena modificação na matriz das contingências, afim de que o ramo em estado zero não tenha influência nas avaliações baseadas na matriz [C], conforme se verá mais adiante.

Assim, para a perda do ramo em contingência, o elemento respectivo da diagonal principal da matriz fica igual a zero.

Então.

$$C_{ii} = 0, \text{ se o ramo } i \text{ fica com } ESTA_i = 0.$$

### 3.3 - Expansão do Sistema de Transmissão Considerando a Linha mais Sobrecarregada

O objetivo é a determinação de reforços no sistema, de modo a se obter um sistema seguro. Para cada configuração inicial, dependendo da política adotada para a evolução do sistema,

obtem-se configurações seguras distintas, empregando maior ou menor número de linhas.

Usando-se uma política de expansão baseada no índice de sobrecarga do sistema dado a seguir obtém-se uma sequência de linhas que leva o sistema a segurança.

A seguir são apresentadas vários conceitos necessários à elaboração do algoritmo completo.

3.3.1 - Vetor das defasagens máximas da configuração C<sup>o</sup>

Após a formação da matriz das contingências [C] para uma determinada configuração original C<sup>o</sup>, determina-se o vetor das defasagens máximas  $[\phi_{MC^o}] \in R^{NR}$  onde as suas componentes são:

$$\phi_{MC^o_j} = \max \{ \psi_j, \forall C_i^o, i=1, \dots, NR \} \text{ e } j=1, \dots, NR \quad (3.3.28)$$

e C<sup>o</sup><sub>i</sub> é a i-ésima contingência sobre a configuração original.

Ou de outra forma:

$$\phi_{MC^o_j} = \max \{ C_{ij}, \text{ com } i=1, \dots, NR \} \text{ e } j=1, \dots, NR \quad (3.3.29)$$

Os elementos que constituem o vetor  $[\phi_{MC^o}]$  são portanto, as máximas defasagens dos ramos obtidas no teste das contingências.

### 3.3.2 - Vetor de sobrecarregamento

é um vetor tal que suas componentes são:

$$\phi_{sci} = \begin{cases} 0 & \text{se } \phi_{MC^o_i} \leq \psi_{Mi} \\ \frac{\phi_{MC^o_i}}{\psi_{Mi}} - 1 & \text{se } \phi_{MC^o_i} > \psi_{Mi} \end{cases} \quad i=1, \dots, NR \quad (3.3.30)$$

Os componentes do vetor de sobrecarregamento  $[\phi_{sc}]$  e  $R^{RN}$  do sistema elétrico de potência analisado, permitem indicar no teste das contingências, quais as linhas sobrecarregadas, ou seja, as que ultrapassaram em percentagens na base unitária os seus respectivos limites. As componentes não nulas indicam as linhas com problemas.

Por análise do vetor de sobrecarregamento em relação ao seu grau de enchimento, é possível avaliar a debilidade do sistema elétrico. O sistema é seguro se o  $[\phi_{sc}]$  tem suas componentes todas nulas. Em correspondência ao politopo  $\pi$ , isto significa que todos os pontos de operação sob contingência estão dentro do politopo. Se não for este o caso, alguns dos pontos de operação sob contingência estão fora do politopo.

### 3.3.3 - Índice de sobrecarga

Os sobrecarregamentos e a escolha de um índice de sobrecarga não estão bem esclarecidos e compreendidos ([18], [20],

[34]). Os critérios são variados e cada empresa adota particularmente o seu próprio. Isto advém do fato de que o desempenho do sistema está relacionada à topologia e o nível de injeção de potência no mesmo.

Utiliza-se para a evolução da expansão do sistema de transmissão, um índice de sobrecarga dado pelo maior sobrecarregamento de linha, obtido com a realização do teste de contingência sobre o sistema original. Assim, o valor do índice dá o maior efeito de carregamento possível de linha para o referido sistema.

Portanto, o índice de sobrecarga ( $I_{sc}^1$ ) é dado por:

$$I_{sc}^1 = \text{máx} \{ \phi_{sci} , i=1, \dots, NR \} \quad (3.3.31)$$

Este índice deteta a linha mais frágil do sistema, ou seja, a mais sobrecarregada, não levando em conta as linhas restantes.

Em termos de politopo  $\pi$ , o índice de sobrecarga é dado pela menor distância do ponto de operação em contingência ao hiperplano limite característico da linha, ou seja, da face do politopo da linha correspondente.

O índice de sobrecarga é o fator que indica a linha a ser reforçada no sistema original, de modo a corrigir o sobrecarregamento.

#### 3.3.4 - Política da expansão da configuração original com o ponto de operação fora do politopo

Pode ocorrer, devido ao aumento de carga, que a situação inicial da configuração esteja sobrecarregada, ou seja, com o ponto de operação fora do politopo  $\pi$ .

Neste caso, como o sistema inicialmente já está em condição insegura, não é efetuado o teste de contingências, não sendo portanto possível, a formação da matriz de contingência [C], e nem do vetor de sobrecarregamento da maneira proposta.

As modificações necessárias são mostradas a seguir.

Não é processada a formação do vetor  $[\phi_{MC^0}]$ , porque este se confunde com o próprio vetor  $[\psi]$ , dada a característica acima.

Então, o vetor de sobrecarregamento  $[\phi_{sc}]$  é obtido diretamente do vetor  $[\psi]$  e suas componentes são dadas por:

$$\phi_{sci} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } \psi_i \leq \psi_{Mi} \\ \frac{\psi_i}{\psi_{Mi}} - 1 & \text{se } \psi_i > \psi_{Mi} \end{array} \right\} \quad i=1, \dots, NR \quad (3.3.32)$$

O grau de enchimento do vetor  $[\phi_{sc}]$  é um parâmetro extremamente importante, pois indica indiretamente a fragilidade da segurança do sistema, conforme comentado em (3.3.2).

Neste caso específico, o vetor  $[\phi_{sc}]$  sempre terá pelo menos uma componente não nula.

Após a completa formação do vetor de sobrecarregamento, procede-se da maneira idêntica o cálculo do índice de so

brecarga, que indica a linha sobrecarregada, no qual será a selecionada para o reforço no sistema.

### 3.3.5 - Expansão do Sistema de Transmissão

Com base no índice de sobrecarga é selecionado o ramo a reforçar com a adição de uma linha, para tornar a configuração mais robusta, deslocando o ponto de operação  $[\psi]$  no sentido de penetrar no politopo  $\pi$ . Assim, com a repetição do processo o ponto de operação desloca-se penetrando no politopo, até que seja alcançada uma configuração segura.

O processo é esquematizado no diagrama de bloco da figura 1.

Procedendo-se desta forma, é obtida a sequência de reforços no sistema, até que o ponto de operação e os de todas as contingências, estejam contidos no politopo  $\pi$ .

Para qualquer sistema inicial, por mais precário que seja, o algoritmo indicará a sequência de linhas necessárias para levar o sistema a segurança.

Independente da enumeração das barras e dos testes de contingência, a sequência de linhas processada será sempre a mesma. Tal não ocorre com a política de expansão proposta em [30], referente à segurança estática.

### 3.3.6 - Interpretação

Apresenta-se nas figuras adiante, uma representação simbólica que não caracteriza totalmente a realidade física do

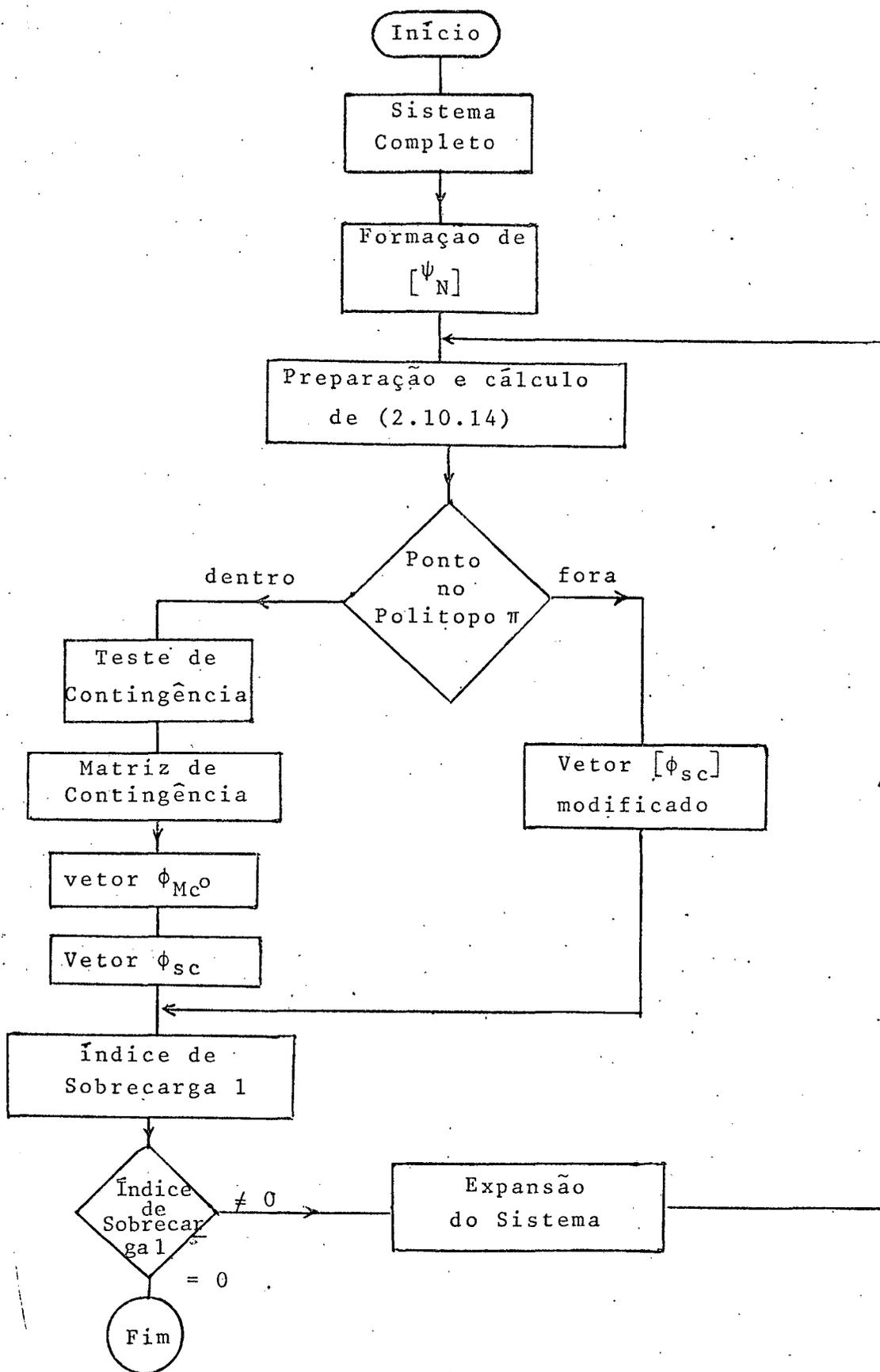


Figura 1: Fluxograma da expansão do sistema proposto em 3.3.

problema, mas fornece boa interpretação do processo básico desenvolvido.

Assim, inicialmente com o ponto fora do polítopo, procede-se a política de expansão proposta, mostrada na figura 2, até a introdução do ponto no polítopo.

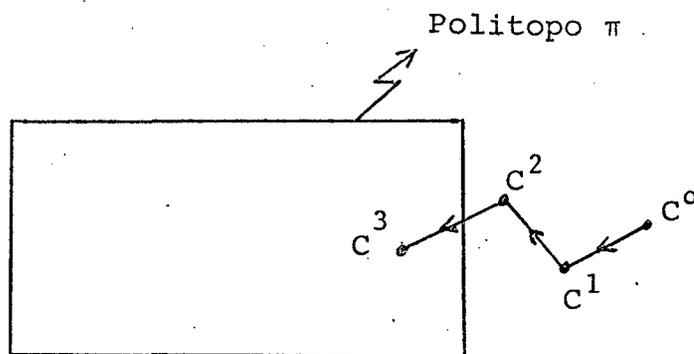


Figura 2: Ponto fora do polítopo, e a sucessão de reforços.

Com o ponto de operação no interior do polítopo, o algoritmo efetua o teste de contingência, o que está representado na figura 3.

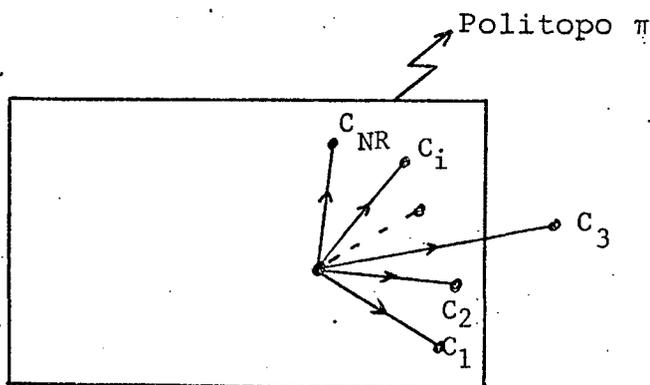


Figura 3: Teste de contingência

O ponto de operação interior é origem da variação dos pontos sob contingência. O índice de sobrecarga seleciona a

linha a ser conectada no sistema, de modo a deslocar o ponto inteiro a penetrar no politopo, no sentido de trazer todos os pontos sob contingência para o interior do politopo, até que a correspondente situação seja o da Figura 4.

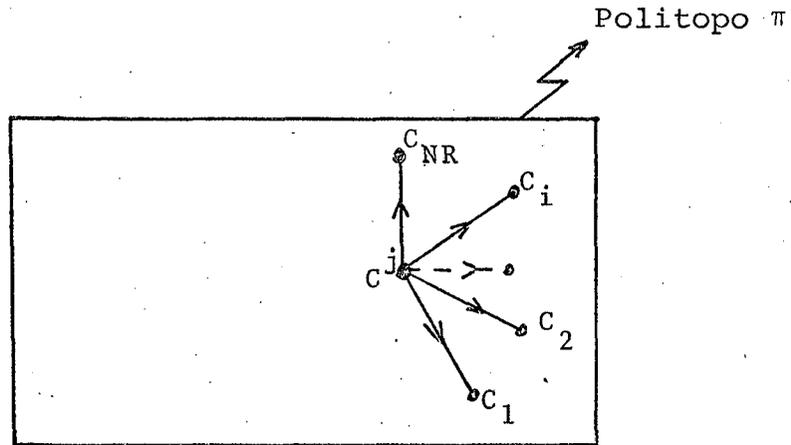


Figura 4: Sistema seguro

Onde  $C^j$ , representa a configuração final segura.

### 3.4 - Expansão do sistema de transmissão através do ponto mais afastado do politopo

É formulado a seguir um algoritmo para a expansão do sistema de transmissão, o qual é uma variante do que foi descrito anteriormente. O índice de sobrecarga, obtido através deste algoritmo, é mais significativo, pois leva em consideração o sistema como um todo e não apenas o efeito de uma linha.

Outra vantagem, é a possibilidade da expansão através da criação de novos ramos, levando o sistema a estratégias diferentes de reforço.

São necessárias ligeiras modificações nas formulações, e não seria de real necessidade o aproveitamento da matriz das contingências, a qual será mantida apenas por coerência.

Assim, são considerados os dois casos seguintes:

- ponto dentro do politopo
- ponto fora do politopo

### 3.4.1 - Análise e formulações para ponto dentro do politopo

Com o ponto de operação do sistema original dentro do politopo, o teste de contingência é efetuado, e a formação da matriz das contingências é idêntica à do item 3.2. Não é necessário o uso do vetor das defasagens máximas da configuração, mas apenas a do vetor de sobrecarregamento. Neste caso, as suas componentes definem o sobrecarregamento do sistema relativo ao efeito da respectiva contingência. Ou seja, cada contingência, define uma componente no vetor  $[\phi_{sc}]$ , conforme a seguir,

#### 3.4.1.1 - Definição do vetor de sobrecarregamento

O vetor de sobrecarregamento ( $\phi_{sc} \in R^{NR}$ ) é um vetor cujas componentes  $\phi_{sci}$  representam a correspondente contingência  $C_i^0$ , efetuada sobre a configuração original, cujos valores são dados de acordo com os seguintes casos:

- Sob contingência  $C_i^0$ , com o ponto dentro do politopo, seu valor é:

$$\phi_{sci} = 0 \quad (3.4.33)$$

- Sob contingência  $C_i^0$ , com ponto fora do politopo, o cálculo é feito como mostrado a seguir. De  $C_i^0$ , define-se o vetor de carregamento relativo  $[\phi_{cr}^i]$ , tal que suas componentes são dadas por:

$$\phi_{crj}^i = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } \psi_j \leq \psi_{Mj} \\ \frac{\psi_j}{\psi_{Mj}} - 1 & \text{se } \psi_j > \psi_{Mj} \end{array} \right\} \quad j=1, \dots, NR \quad (3.4.34)$$

Este vetor e o vetor  $[\phi_{MC}^0]$  de 3.3.1, têm relativa semelhança, porém significados distintos.

A menor distância do ponto de operação sob contingência  $i$  ao politopo é dada por uma função  $f: R^{NR} \rightarrow R$ , onde,

$$\phi_{sci} = \sqrt{\sum_{j=1}^{NR} \phi_{crj}^i{}^2} \quad (3.4.35)$$

Assim, a componente  $\phi_{sci}$  é uma função do vetor  $[\phi_{cr}^i]$ , ou seja, é o valor do raio da hiperesfera no  $R^{NR}$ , com centro no ponto de operação e tangente externamente ao politopo.

As componentes do vetor de sobrecarregamento  $[\phi_{sc}]$  representam o estado da segurança das configurações em contingência, de modo que, a componente com valor zero representa uma configuração em contingência viável, e com valor diferente de zero uma configuração em contingência insegura, sendo que neste caso o va

lor da componente indica o grau de insegurança do sistema.

As distâncias normalizadas neste espaço, podem ser comparadas e usadas para decisões, já que seus valores representam uma medida do carregamento no sistema devido a contingência.

### 3.4.1.2 - Índice de sobrecarga

O índice de sobrecarga será uma medida relativa à contingência que fornece o ponto de operação mais afastado do politopo  $\pi$ . Ou seja, é uma medida da contingência que causa o maior problema no sistema.

Assim, índice de sobrecarga, neste caso, é o valor  $I_{sc}^2$  dado por:

$$I_{sc}^2 = \text{máx} \{ \phi_{sci} , e \quad i=1, \dots, NR \} \quad (3.4.36)$$

As componentes do vetor  $[\phi_{sc}]$ , indicam os efeitos de cada contingência e o índice de sobrecarga é o pior destes efeitos.

Ele representa o raio da maior hiperefera com centro no ponto de operação do sistema em contingência e tangente ao politopo.

Este índice leva em consideração o efeito da contingência sobre o sistema, enquanto que o obtido pelo método anterior usa apenas o efeito sobre uma linha, o que produz características diferentes na evolução do sistema. Assim, o índice aqui proposto virá corrigir o sistema como um todo, enquanto o definido

em 3.3.3, visa corrigir apenas a sobrecarga da linha correspondente.

#### 3.4.1.3 - Configuração debilitada

Define-se configuração debilitada  $C_d^0$ , como sendo a configuração em contingência associada ao índice de sobrecarga.

Observa-se que a configuração debilitada, representa a configuração em contingência mais insegura do sistema.

#### 3.4.1.4 - Índice de penetração

O índice de penetração é definido como sendo o raio da maior hiperesfera contida no politopo da configuração debilitada expandida com o ponto de operação dentro do politopo. Se todos os pontos de operação da  $C_{di}^0$ , não pertencem ao politopo, então o índice de penetração é definido como sendo o raio de menor hiperesfera com centro no seu ponto de operação e tangente ao politopo.

Obtida a configuração debilitada, procede-se a um teste para a seleção da configuração que produz a maior hiperesfera contida no politopo, a qual fornecerá o índice de penetração. Este corresponderá ao máximo raio da hiperesfera característica do  $R^{NR}$  contida no politopo, é função do ponto de operação de maior penetração. Seu cálculo é efetuado construindo-se hiperesferas com centro no ponto de operação e raio crescente até à primeira tangência interna a face do politopo. Isto é feito para todos os pontos de operação obtidos através da expansão, sendo então selecionado o de maior valor.

Para calcular o índice de penetração e facilitar o processo, inicialmente é formulado o vetor de raios de hiperesfera  $[R_h]$  e  $R^{NR}$ , cujas componentes representam os raios das hiperesferas de cada ponto da expansão da configuração debilitada tangente ao politopo.

Para o cálculo de  $R_{hi}$ , leva-se em consideração os seguintes casos da expansão:

a) Ponto dentro do politopo

Com o ponto dentro do politopo, calcula-se o raio da hiperesfera com centro no ponto de operação e tangente ao politopo, obtendo-se assim o valor de  $R_{hi}$ , correspondente ao vetor  $[R_h]$ , que fornece o valor da penetração no politopo.

Ou seja:

$$R_{hi} = \min \quad || [\psi] - [\psi]_{c_{di}} || \quad (3.4.37)$$

Onde  $[\psi]$  pertence à fronteira do politopo  $\pi$  e  $[\psi]_{c_{di}}^o$  é o ponto de operação da  $i$ -ésima expansão da configuração debilitada  $C_{di}^o$ .

Considerando a definição do politopo  $\pi$ , observa-se que as faces são hiperplanos característicos perpendiculares aos eixos coordenados, base do espaço  $R^{NR}$ . Assim a distância entre o ponto de operação e a  $i$ -ésima face do politopo, pode ser feita simplesmente utilizando-se o módulo da diferença entre a  $i$ -ésima coordenada do ponto de operação e a  $i$ -ésima coordenada do ponto onde o  $i$ -ésimo eixo coordenado intercepta a  $i$ -ésima face.

Assim, para o cálculo de  $R_{hi}$ , faz-se uso do vetor de penetração  $[V_p]$  e  $R^{NR}$ , onde então, suas componentes  $V_{pi}$ , são dadas por:

$$V_{pj} = 1 - \frac{\psi_j}{\psi_{Mj}}, \quad j=1, \dots, NR \quad \text{da } C_{di}^0 \quad (3.4.38)$$

Onde  $\psi_j$  é relativo a  $C_{di}^0$  e  $\psi_{Mj}$  é a defasagem máxima do ramo  $j$ , conforme definido antes.

Então,  $R_{hi}$  é dado pelo valor mínimo das componentes de  $[V_p]$ .

$$R_{hi} = \min \{V_{pj}, \quad j=1, \dots, NR\} \quad (3.4.39)$$

#### b) Ponto fora do politopo

Quando o ponto de operação está fora do politopo, procede-se o cálculo do raio da hiperesfera com centro no ponto e tangente ao politopo, de forma semelhante a do item 3.3.2. É então, definido, o vetor aproximação relativa  $[V_{ar}]$  e  $R^{NR}$ , cujas componentes são:

$$V_{arj} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } \psi_j \leq \psi_{Mj} \\ \frac{\psi_j}{\psi_{Mj}} - 1 & \text{se } \psi_j > \psi_{Mj} \end{array} \right\} \quad \text{da } C_{di}^0, \text{ com} \quad (3.4.40)$$

$$j=1, \dots, NR$$

Assim, a componente  $R_{hi}$  do vetor  $[R_h]$  é uma função

$$f: R^{NR} \rightarrow R$$

$$[V_{ar}] \rightarrow R_{hi}$$

onde,

$$R_{hi} = -\sqrt{\sum_{j=1}^{NR} V_{arj}^2} \quad (3.4.41)$$

Note-se que  $R_{hi}$  representa a menor distância do ponto de operação da  $C_{di}^0$  ao polítopo  $\pi$ .

A implantação do sinal (-), é fator indicativo de ponto fora do polítopo, e é útil para harmonizar a condição de maximização do índice de penetração. Assim, no vetor  $[V_h]$ , as componentes com sinais (+) e (-) indicam respectivamente, ponto dentro e fora do polítopo.

Com as considerações efetuadas nos dois itens acima, o cálculo do índice de penetração ( $I_p$ ) é da seguinte forma:

$$I_p = \max\{R_{hi}, i=1, \dots, NR\} \quad (3.4.42)$$

Uma vez obtido o índice de penetração, expande-se a configuração original.

### 3.4.2 - Análise para ponto fora do polítopo

Quando o sistema original, devido ao crescimento da

demanda, tem o ponto de operação fora do politopo, a evolução do sistema é diferente, não se processa a matriz das contingências, mas sim efetua-se o teste de expansão, com o objetivo de determinar o índice de penetração, o qual seleciona a linha conveniente para o reforço.

Assim, podem ser previsto as duas situações para o ponto de operação. A primeira trata da operação com o ponto fora do politopo e algum ponto obtido através da expansão situado no interior do politopo. A segunda, quando nenhum ponto entra no politopo. Assim, calcula-se o índice de penetração, usando o mesmo procedimento descrito em 3.4.1.4, bastando apenas trocar a configuração debilitada pela configuração original. O processo é repetido até a real penetração do ponto de operação no politopo.

### 3.4.3 - Interpretação

Identicamente ao item 3.3.6., é feita uma ilustração da sequência do processo.

O caso do ponto de operação fora do politopo, com alguns pontos da expansão situados no interior, é mostrado na figura 5.

O caso de nenhuma penetração, pode ser observado na figura 6.

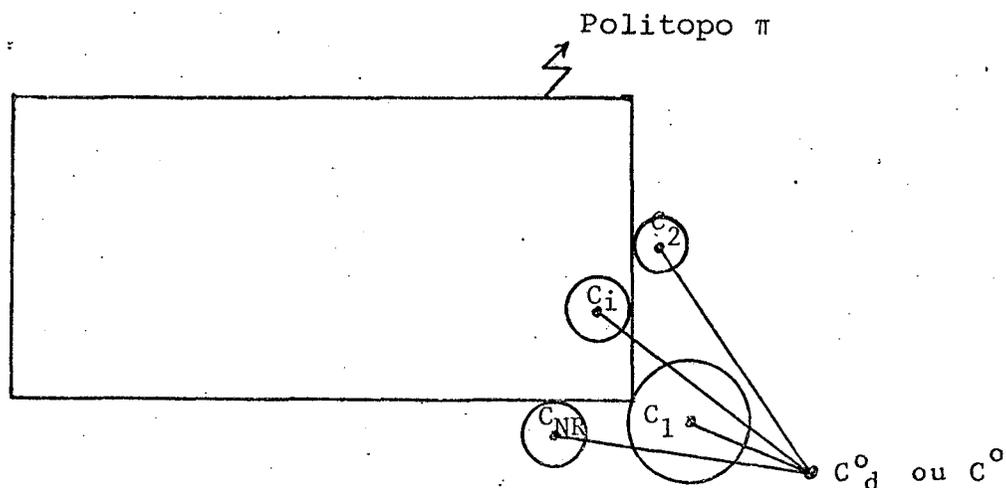


Figura 5: Expansão da  $C^o_d$  ou  $C^o$  com alguns pontos dentro do polítopo.

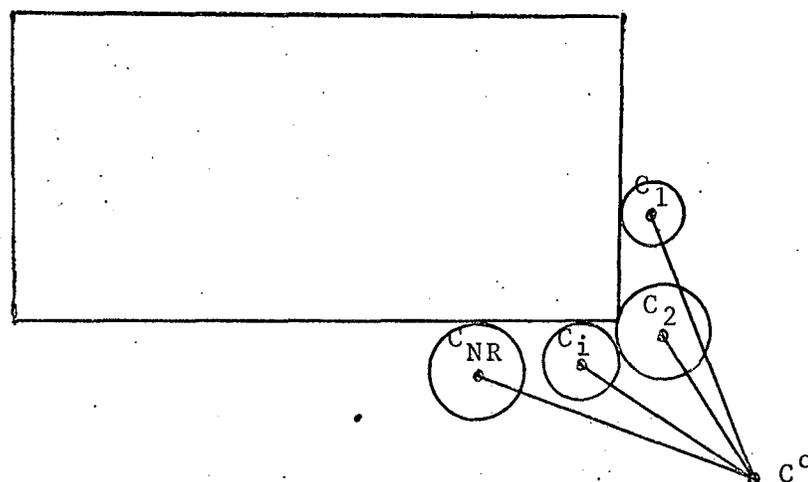


Figura 6: Todos pontos fora do politopo.

### 3.4.4 - Diagrama de bloco

Na figura 7, apresenta-se o fluxograma da expansão do sistema de transmissão através do ponto mais afastado do polítopo. A aplicação deste algoritmo a qualquer sistema permite a obtenção de uma configuração segura.

O algoritmo proposto não restringe a possibilidade de se criar novos ramos, durante o processo de reforços.

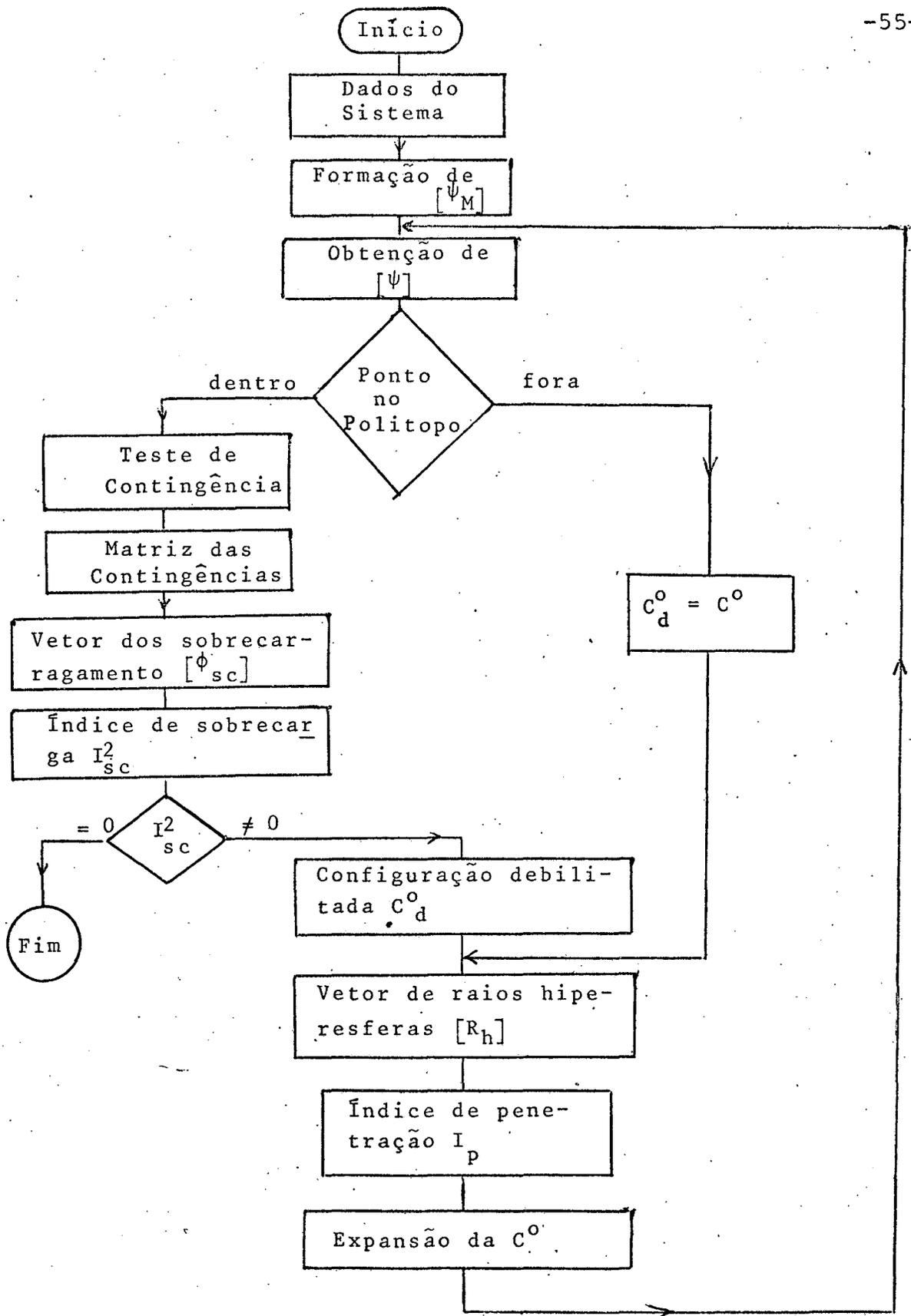


Figura 7: Fluxograma do algoritmo proposto em 3.4.

### 3.5 - Conclusão

Apresentaram neste capítulo as formulações de dois algoritmos distintos, que propõem procedimentos de reforço no sistema de transmissão, de modo a buscar a segurança do sistema original.

São definidos índices de sobrecarga, de penetração e configuração debilitada, que são úteis na seleção da situação mais crítica e na seleção do melhor reforço. Na formulação deste problema aproveita-se a forma do politopo  $\pi$ , de modo a simplificar os cálculos dos índices.

No capítulo V, vários exemplos ilustram a aplicação dos algoritmos propostos, com suas respectivas sequências de linhas de reforço indicadas.

No capítulo seguinte o problema da segurança é colocado sob o ponto de vista da operação, onde a melhoria da segurança é feita redespachando-se a geração.

## C A P Í T U L O   I V

### REMANEJAMENTO DA GERAÇÃO

#### 4.1 - Introdução

O remanejamento da geração, para alívio de sobrecarga de um sistema em estado de alerta, e uma ferramenta útil no controle da segurança da operação de um sistema elétrico.

A manutenção preventiva da segurança, é de vital importância para garantia no atendimento dos consumidores e aumentando a chance da não interrupção de fornecimentos por perda de sincronismo entre máquinas.

Com a operação do sistema em condições seguras, outras medidas podem ser tomadas sem grandes riscos, tal como a operação econômica.

As condições de segurança do sistema neste capítulo seguem as formulações do capítulo II.

Propõe-se um esquema de remanejamento da geração, de modo a tornar o sistema seguro e de tal maneira que os novos pontos de geração das configurações sob contingência, possuam uma folga, isto é, com os pontos pertencentes ao interior do politopo.

O remanejamento é feito através de técnicas de programação linear, utilizando-se um politopo contrátil, que buscará soluções dentro do politopo  $\pi$ .

Se o remanejamento da geração, não conduzir o sistema a uma operação segura, busca-se através do algoritmo um ponto de operação dentro do politopo em estado de alerta. Neste caso, é possível prever que contingências produziriam um sistema inseguro, ficando a operação em prontidão para que outras medidas, tais como alívio de carga e/ou novo remanejamento sobre o sistema inseguro em contingência, sejam tomadas. Procedendo-se desta forma as sobrecargas seriam aliviadas, atendendo-se a demanda em condições de riscos, até a restauração do sistema.

Com o sistema em alerta, procura-se sempre fazer o controle preventivo, de modo que o mesmo opere em segurança. Isto pode ser conseguido com a maior penetração no politopo, do ponto de operação da configuração debilitada, selecionada pelo teste de contingência do sistema original, na qual produz-se uma equidistribuição de fluxos pelas linhas, deixando-as com o mesmo nível de folga para que possam suportar perturbações que eventualmente venham a ocorrer. Usa-se este novo ponto de operação no sistema original. A sequência é feita no sentido de se penetrar com o ponto de operação no politopo, trazendo juntamente para dentro, todos os pontos de operação das contingências. Isto é feito através de um processo de otimização por objetivos.

Devido à característica física do sistema e do procedimento na formulação do problema, não é possível determinar uma função objetivo analítica em coerência com o politopo. Procurou-se então contornar o problema, formulando-o em termos de otimização por objetivo e não através de uma função objetivo comum aos processos clássicos de otimização.

No caso em que o ponto de operação do sistema está

fora do politopo, caracterizando um sistema sobrecarregado, e com o remanejamento não conseguindo colocar o ponto no interior do politopo, a correção da situação poderá ser feita através das seguintes alternativas:

- expansão do sistema, caso haja disponibilidade e/ou tempo para isto.
- corte de carga, com atuação em tempo real.

Em ambos os casos, a decisão é tomada, após o remanejamento, com a colocação do ponto de operação o mais próximo possível do politopo.

#### 4.2 - Programação Linear com função objetiva modificada

De um modo geral, o objetivo do remanejamento da geração para melhorar a segurança, pode ser alcançado através da maior penetração possível com o ponto de operação no politopo.

Devido a característica do problema não é possível conseguir uma função objetivo analítica. É feita então uma variação, proposta neste trabalho, da técnica da programação linear. Uma das dificuldades do problema, é que o processo do remanejamento da geração só é realizado, quando o ponto de operação está fora do politopo, sendo este um ponto não viável face às restrições da programação linear. Esta ainda fornece soluções ótimas localizadas no vértice do conjunto das restrições. Por outro lado, o objetivo a ser alcançado neste trabalho, é efetuar o remanejamento para a determinação do ponto de operação mais interior possível

no politopo. Outras dificuldades também são oriundas da irregularidade do politopo.

O aprofundamento do ponto de operação no politopo é medido pelo raio da hiperesfera com centro no ponto e tangente as faces do politopo. Portanto, o objetivo é fazer o remanejamento da geração de modo a obter o ponto de operação que produz a maior hiperesfera contida no politopo. Isto será possível com a formulação do politopo contrátil, definido no item seguinte, com o uso de programação linear com restrições e função objetivo modificada a partir das variáveis adicionais de busca da solução viável.

A programação linear clássica é caracterizada por uma função objetiva linear, sujeita a restrições lineares. Sendo que a função objetiva linear, representa uma família de hiperplanos paralelos, no qual o ótimo é encontrado no valor máximo ou mínimo de sua intersecção com o conjunto de restrições. Sua forma padrão é:

$$f.O. = \text{m\AA{x}} [h] \cdot [x] \quad (4.2.43)$$

sujeita

$$[A] [x] \leq [d]$$

$$[B] [x] \geq [c]$$

$$[C] [x] = [f]$$

$$[x] \geq [0]$$

Onde, [h] vetor linha dos coeficientes da função

objetivo

$[A], [B], [C]$  são as matrizes dos coeficientes.

$[d], [c], [f]$  vetores colunas das constantes positivas.

$[x]$  vetor coluna das variáveis.

Efetua-se modificações nas restrições de desigualdades, tornando-as restrições de igualdades através de adicionais variáveis de folgas, para a consequente adaptação do processo da programação linear.

Assim, a forma fica:

$$\text{f.o.} = \text{máx } [h] \cdot [x]$$

sujeita:

$$[A] [x] + [y] = [d] \quad (4.2.44)$$

$$[B] [x] - [z] = [c]$$

$$[C] [x] = [f]$$

$$[x], [y], [z] \geq [0]$$

Onde,  $[y]$  e  $[z]$  são as adicionais variáveis de folgas correspondentes a igualdades.

Devido ao ponto de operação inicial, não ser um ponto viável ao conjunto de restrições, e a forma das restrições em relação às suas variáveis de folga não formarem uma base inicial

viável, a programação linear não pode ser efetuada. Usa-se então, um artifício no sentido, de obter-se através da programação linear um ponto viável. Isto é conseguido, acrescentando novas variáveis às restrições correspondentes a desigualdades  $\geq$  e usando uma função objetivo modificada em termos destas variáveis, como mostrado abaixo

$$f.O. = \min \sum (w_i + D_i)$$

sujeita:

$$[A] [x] + [y] = [d]$$

$$[B] [x] - [z] + [w] = [e]$$

(4.2.45)

$$[C] [x] + [D] = [f]$$

$$[x], [y], [z], [w], [D] \geq [0]$$

Desta forma o conjunto das variáveis  $|y|$ ,  $|w|$  e  $|D|$  formam inicialmente uma base compatível à iniciação da programação linear, no qual a solução ótima sobre as variáveis  $|x|$ , produzirá uma solução viável no conjunto de restrições da forma padrão.

#### 4.3 - Politopo Contráctil

É definido como sendo a contração contínua do politopo  $\pi$ .

A penetração do ponto de operação no interior do po

litopo pode ser conseguida com a utilização do politopo contráctil em conjunção com a programação linear modificada proposta no ítem anterior.

Assim, inicialmente, procura-se uma solução viável, e então contrai-se o politopo sucessivamente, fazendo o aprofundamento do ponto no politopo  $\pi$ , até a inviabilidade, sendo a solução imediatamente anterior à solução procurada.

Todas as soluções viáveis encontradas pelo politopo contráctil, fornecem a direção do caminho do remanejamento da geração até a máxima penetração no politopo original  $\pi$ .

A figura 8, dá uma interpretação do proposto acima.

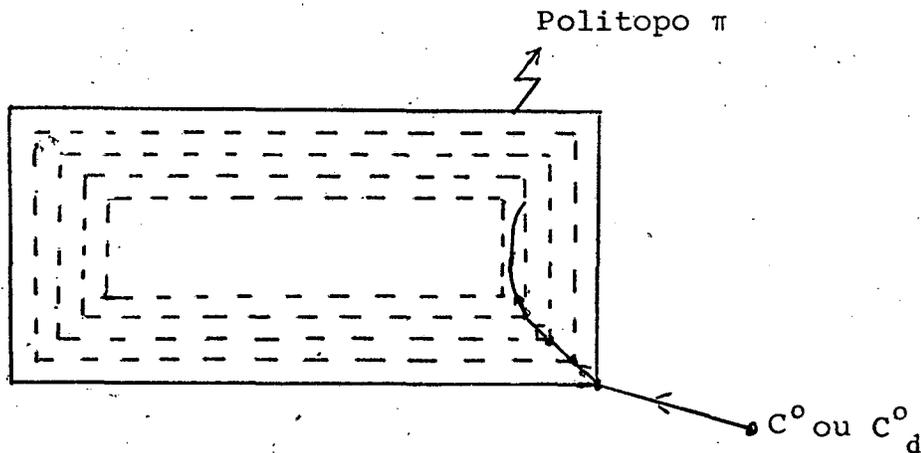


Figura 8: Politopo Contráctil.

#### 4.4 - Índice de penetração

O índice de penetração ( $I_p$ ) é semelhante ao proposto no ítem 3.4.1.4, o seu valor é o do raio da maior hiperesfera contida no politopo, cujo centro é o ponto de operação. Portanto, maximizar o índice de penetração é o objetivo desejado. O ponto de operação final é então usado no sistema original.

#### 4.5 - Politopo normalizado ( $\pi_N$ )

O politopo definido em 2.13, é geometricamente irregular, prejudicando sensivelmente o processo proposto, então, para alcançar o objetivo do remanejamento através da programação linear de maneira mais eficiente, usa-se normalizar o politopo.

Para modificar o politopo  $\pi$  no politopo normalizado  $\pi_N$ , é necessário apenas usar como base cada valor  $\psi_{Mi}$  correspondente ao seu eixo.

Assim, então, o politopo normalizado é regular, com centro na origem, de modo que todas as faces estão unitariamente distanciadas da origem. Tal procedimento é feito também no politopo contráctil.

A mesma sequência de normalização é feita nas equações 2.10.14., no qual será apresentada a seguir.

#### 4.6 - Matriz capacidade dos ramos

É uma matriz diagonal, onde seus elementos são respectivamente as capacidade máxima angulares de ramo. Sua ordem é NRXNR e os elementos da diagonal são:

$$C_{\psi_i} = \psi_{Mi} \quad , \quad i=1, \dots, NR \quad (4.6.46)$$

#### 4.7 - Equações normalizadas

Em sequência a normalização do politopo  $\pi$ , a equa-

ção 2.10.14, é então normalizada em relação a mesma base. Desta maneira, o índice de penetração será o mesmo, e a programação linear é facilitada.

Então, pré-multiplica-se a equação referida pela matriz  $[C_\psi]^{-1}$  e obtém-se:

$$[C_\psi]^{-1} \cdot [\psi] = [C_\psi]^{-1} ([A]^t \cdot [Z_G] [P_G] - [A]^t \cdot [Z_b] [P_c])$$

fazendo,

$$[\psi_N] = [C_\psi]^{-1} [\psi]$$

onde  $[\psi_N]$  é o  $[\psi]$  normalizado, então,

$$[\psi_N] = [C_\psi]^{-1} \cdot [A]^t [Z_G] [P_G] - [C_\psi]^{-1} [A]^t \cdot [Z_b] [P_c] \quad (4.7.47)$$

#### 4.8 - Mudança de variáveis de geração

Com o politopo de geração  $\pi_G$  (2.15), o qual não contém a origem, faz-se uma mudança de referência de modo a colocar a nova origem no vértice do politopo de geração mínima  $[P_{GMIN}]$ .

Assim,

$$[P_{GMIN}] \leq [P_G] \leq [P_{GMAX}]$$

A mudança da origem para o vértice  $[p_{GMIN}]$  do polítopo é dada por:

$$[p_{GMIN}] - [p_{GMIN}] \leq [p_G] - [p_{GMIN}] \leq [p_{GMAX}] - [p_{GMIN}]$$

$$[0] \leq [p_G] - [p_{GMIN}] \leq [p_{GMAX}] - [p_{GMIN}] \quad (4.8.48)$$

Usando, então a nova variável:

$$[p_{G*}] = [p_G] - [p_{GMIN}] \quad (4.8.49)$$

Fica:

$$[0] \leq [p_{G*}] \leq [p_{GMAX}] - [p_{GMIN}] \quad (4.8.50)$$

Assim, tem-se o mesmo politopo de geração, controlado por uma nova variável, na qual a sua referência é o vértice  $[p_{GMIN}]$ .

Este deslocamento de referência é importante pela diminuição de NG-1 restrições do número total de restrições a serem usadas na programação linear. Tal variação não foi explorada em [17].

#### 4.9 - Gerador de referência

A variável do gerador de referência é usado com o dos demais geradores, apenas levando em considerações nas limitações.

Para o gerador de referência, tem-se:

$$P_{GMINr} \leq P_{Gr} \leq P_{GMAXr}$$

Pela equação da demanda (2.11.15):

$$P_{Gr} + \sum_{i=2}^{NG} P_{Gi} = \sum_{j=1}^{NB} P_{cj}$$

$$P_{Gr} = \sum_{j=1}^{NB} P_{cj} - \sum_{i=2}^{NG} P_{Gi} \quad (4.9.51)$$

Observando que  $P_{Gr} = f([p_G])$ , para colocar em função das novas variáveis  $[p_{G^*}]$ , tem-se o procedimento abaixo:

$$P_{GMINr} \leq \sum_{j=1}^{NB} P_{cj} - \sum_{i=2}^{NG} P_{Gi} \leq P_{GMAXr}$$

Sendo que:

$$P_{Gi} = P_{Gi}^* + P_{GMINi},$$

Tem-se

$$P_{GMINr} \leq \sum_{j=1}^{NB} p_{cj} - \sum_{i=2}^{NG} (p_{Gi}^* + P_{GMINi}) \leq P_{GMAXr}$$

Assim, chega-se:

$$-P_{GMAXr} + \sum_{j=1}^{NB} p_{cj} - \sum_{k=2}^{NG} P_{GMINk} \leq \sum_{i=2}^{NG} P_{Gi}^* \leq -P_{GMINr} + \sum_{j=1}^{NB} p_{cj} - \sum_{k=2}^{NG} P_{GMINk} \quad (4.9.52)$$

Em relação a variável  $[p_G^*]$  a (4.9.52) representa uma família de hiperplanos paralelos, limitados por dois hiperplanos à direita e à esquerda.

4.10 - Equacionamento de  $[\psi_N]$  em função de  $[p_G^*]$

Sendo a função  $[\psi_N] = f([p_G])$  dada pela equação (4.7.47), procede-se então a mudança de variáveis, de modo a obter-se  $[\psi_N] = f([p_G^*])$ .

Todas as mudanças são necessárias, devido ao processamento da programação linear, que é feita em termos de  $[p_G^*]$ .

Usando as equações (4.7.47) e (4.8.49), tem-se:

$$[\psi_N] = [C_\psi]^{-1} \cdot [A]^t [Z_G] ([p_G^*] + [p_{GMIN}]) - [C_\psi][A]^{-1}[Z_b][p_c]$$

$$[\psi_N] = [C]^{-1}[A]^t [Z_G] [p_G^*] + [C_\psi]^{-1} \cdot [A]^t [Z_G] [p_{GMIN}] - [Z_b][p_c] \quad (4.10.53)$$

#### 4.11 - Diagrama de bloco do remanejamento da geração

Com as formulações propostas, esquematiza-se um diagrama de bloco específico da parte relacionada com o remanejamento da geração.

A entrada neste diagrama, é efetuada quando o ponto de operação estiver fora do politopo  $\pi$ .

As equações são preparadas para a programação linear, buscando viabilidade no politopo contráctil, até a obtenção do índice de penetração.

O diagrama é apresentado na figura 9.

#### 4.12 - Fluxograma do algoritmo do remanejamento da geração

Procura-se, para o sistema elétrico de potência em alerta, a operação em segurança.

Obtida a segurança, pode-se então, buscar a operação econômica, mantendo a segurança a níveis aceitáveis. Isto pode ser resolvido, desde que a função objetivo traduz o estado econômico do sistema, e sejam usadas de maneira global todas as restrições, as explícitas do sistema original e as implícitas das configurações sob contingência parametrizadas e controladas pela variável do sistema original. Este procedimento resolveria de modo geral o problema, porém, o número de restrições é muito grande e da ordem de  $N_G + 1 + 2NR(1 + NR)$ , mesmo que sejam exploradas to-

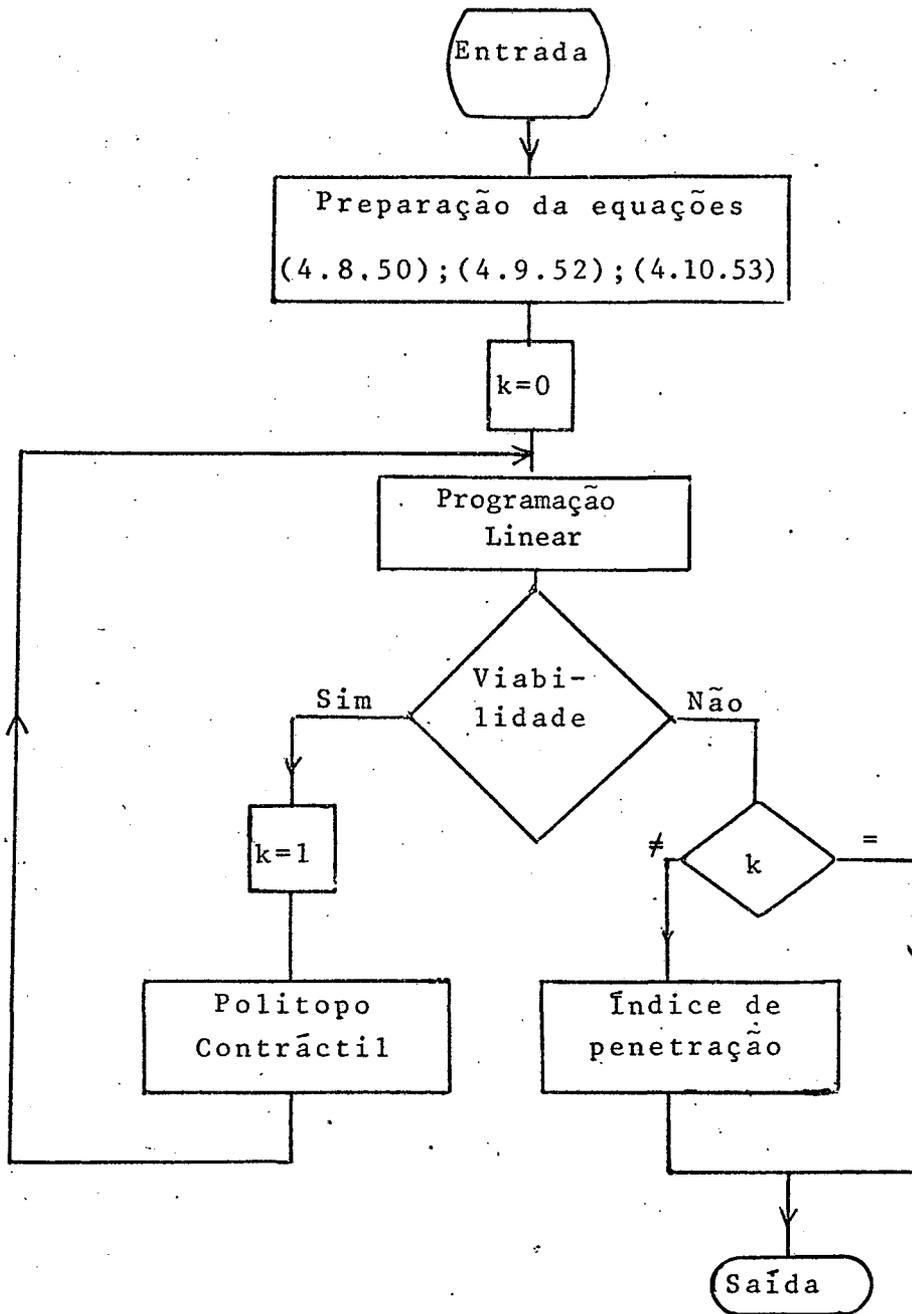


Figura 9: Diagrama de bloco do remanejamento da geração.

das as simplificações.

Dentro das formulações propostas neste capítulo, o procedimento do remanejamento da geração dentro do sistema elétrico, é apresentado pelo fluxograma da figura 10, onde a primeira etapa é semelhante aos algoritmos descritos no capítulo III.

No procedimento do algoritmo, procurou-se, tendo em vista as características do sistema elétrico e dos elementos de controle de maior expressão e acesso, fazer o remanejamento da geração, para a obtenção de operação segura.

Pode-se truncar parte deste algoritmo, quando se deseja apenas encontrar um ponto de operação do sistema, mesmo em condição de alerta, devido a segurança não ser possível. Isto é caracterizado pela mensagem indicativa do programa, sobre a configuração debilitada. Se dentro do sistema original a viabilidade não é alcançada, outras ações deverão ser tomadas.

#### 4.13 - Conclusão

Apresentaram neste capítulo, as formulações básicas necessárias ao remanejamento da geração, visando um ponto de operação seguro, de modo que os pontos de operação do sistema sob contingência tenham relativa folga.

Conseguem-se resultados explorando-se a programação linear em conjunção com o politopo contráctil, no qual soluções no interior do politopo  $\pi$  foram possíveis, atingindo o objetivo proposto.

Devido a perda ou manutenção de algum equipamento

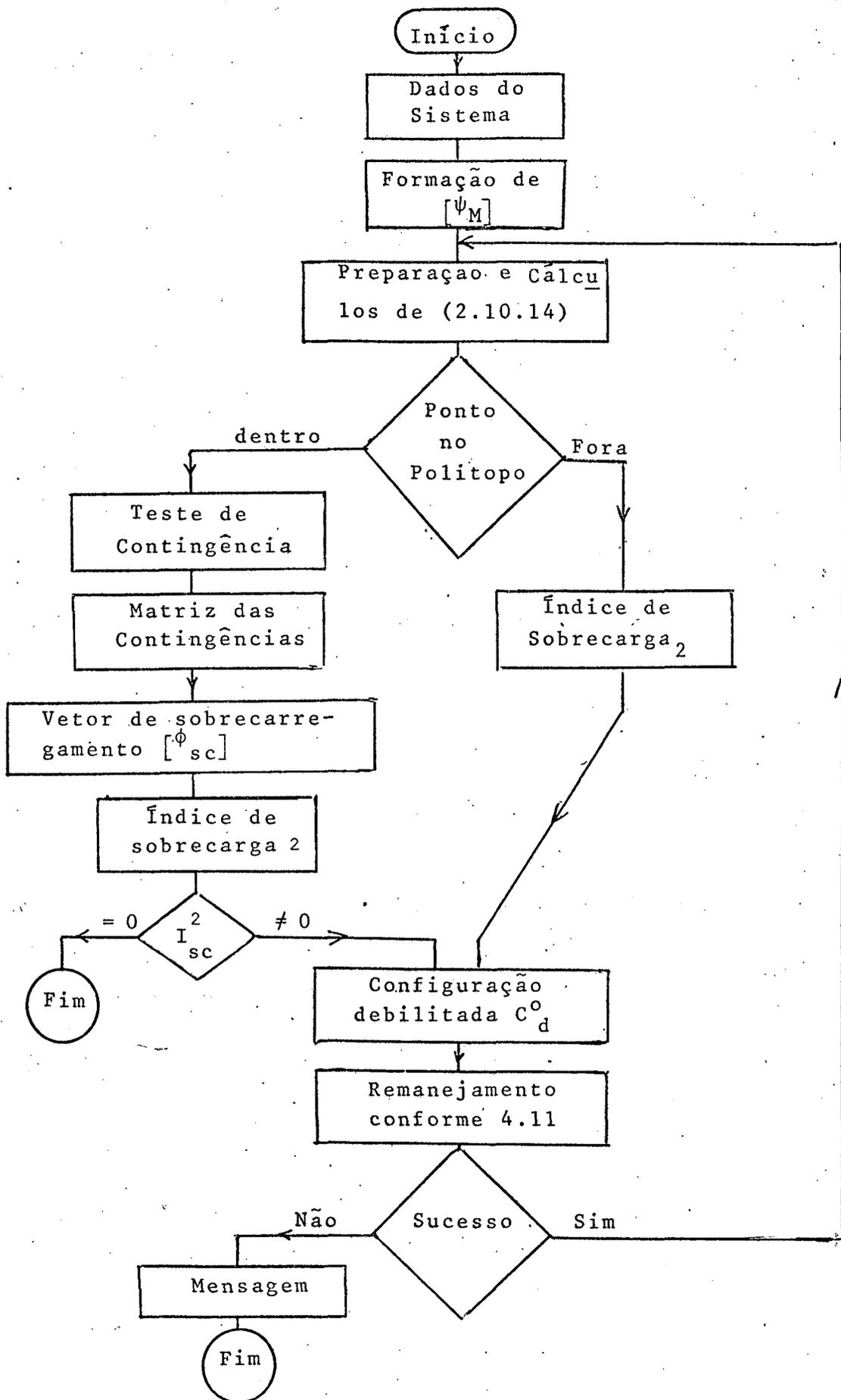


Figura 10: Fluxograma do algoritmo do remanejamento da geração do sistema.

importante no sistema, o novo ponto de operação pode ficar alocado no politopo de maneira a deixar o sistema em alerta, operando em risco, pois pode advir aleatoriamente qualquer nova perda da linha ou equipamento, com risco de perda do sistema. Assim, apresentou-se então, um algoritmo que através do remanejamento da geração, faz o controle preventivo do sistema, de modo a buscar um novo ponto de operação sob condições seguras. Semelhante situação ocorre, quando a entrada prevista de nova usina ou linha no sistema, fica adiada devido a várias situações não previstas, comprometendo assim a segurança do sistema.

Pode-se operar com o sistema em alerta, quando em situação de emergência deseja-se transferir grande quantidade de energia para outra região, no qual busca-se a operacionalidade limite com a máxima transferência possível.

É previsto, o fator imperativo e indicativo do corte de carga, quando o remanejamento não viabiliza a solução do problema.

No capítulo seguinte, são apresentados vários exemplos completos dos processamentos dos algoritmos propostos.

## C A P Í T U L O V

### EXEMPLOS

#### 5.1 - Introdução

Com base nas proposições dos capítulos III e IV apresentam-se vários exemplos de aplicação em sistemas elétricos de potência.

Serão aplicados os mesmos algoritmos, de modo a buscar condições de operação segura, dentro das formulações propostas. Apresentam-se vários sistemas aos quais foram aplicados os algoritmos obtendo-se solução desejada, no qual fornece a operação segura do sistema.

#### 5.2 - Exemplos de reforços do sistema de transmissão pelos algoritmos propostos

Apresentam-se então, os sistemas elétricos de potência, no qual os valores físicos topológicos e resultados são mostrados.

- Exemplo 1

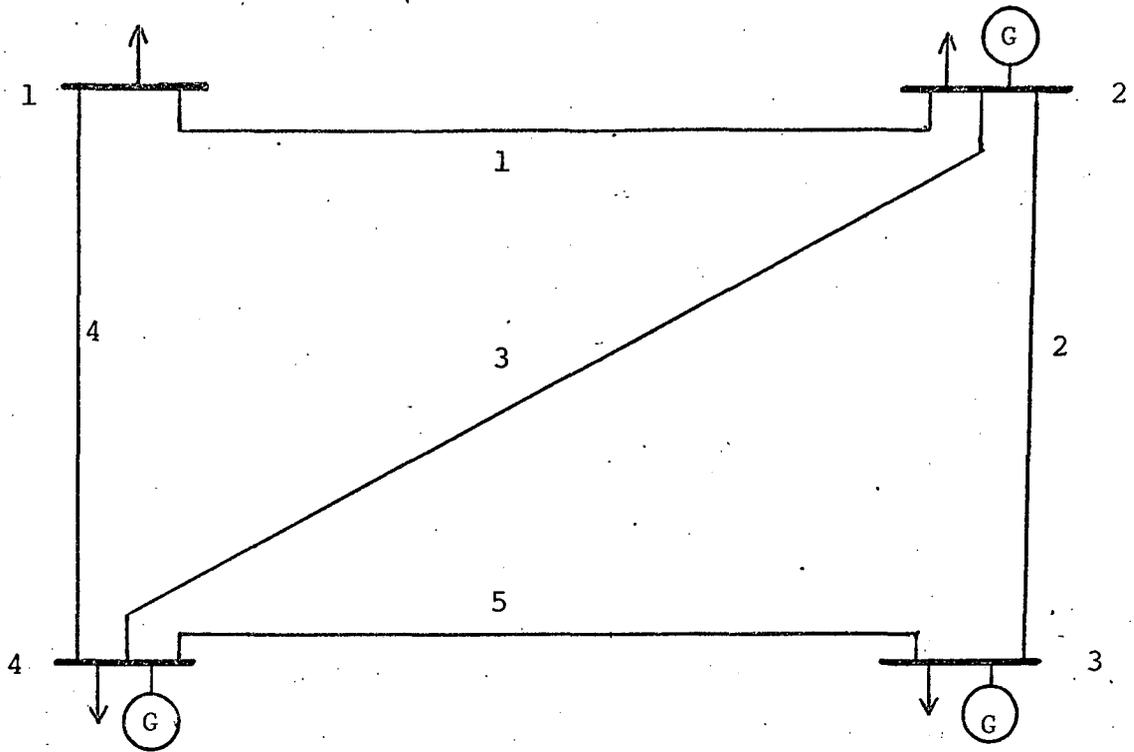


Figura 11: Topologia do exemplo 1.

| Ramo | Início | Fim | Estado | Reatância série | Limite de potência |
|------|--------|-----|--------|-----------------|--------------------|
| 1    | 1      | 2   | 1      | 0,6             | 0,7                |
| 2    | 2      | 3   | 2      | 1,0             | 1,1                |
| 3    | 2      | 4   | 1      | 1,0             | 0,8                |
| 4    | 1      | 4   | 1      | 0,8             | 1,0                |
| 5    | 3      | 4   | 1      | 0,8             | 0,7                |

Tabela 1: Dados da rede do sistema

| Barra | Potência gerada | Carga |
|-------|-----------------|-------|
| 1     | 0,0             | 0,5   |
| 2     | 1,0             | 0,5   |
| 3     | 0,3             | 0,5   |
| 4     | 1,2             | 1,0   |

Tabela 2: Dados de geração e carga

Na figura 11 é apresentada a topologia inicial do sistema elétrico de potência do exemplo 1, todas as especificações físicas características do sistema são dados na Tabela 1, enquanto que a geração e cargas respectivas são fornecidas pela Tabela 2.

O processamento dos dois algoritmos sobre este sistema, não indicou nenhum reforço, devido ao fato de que o sistema, dentro das condições iniciais já está em situação segura.

- Exemplo 2:

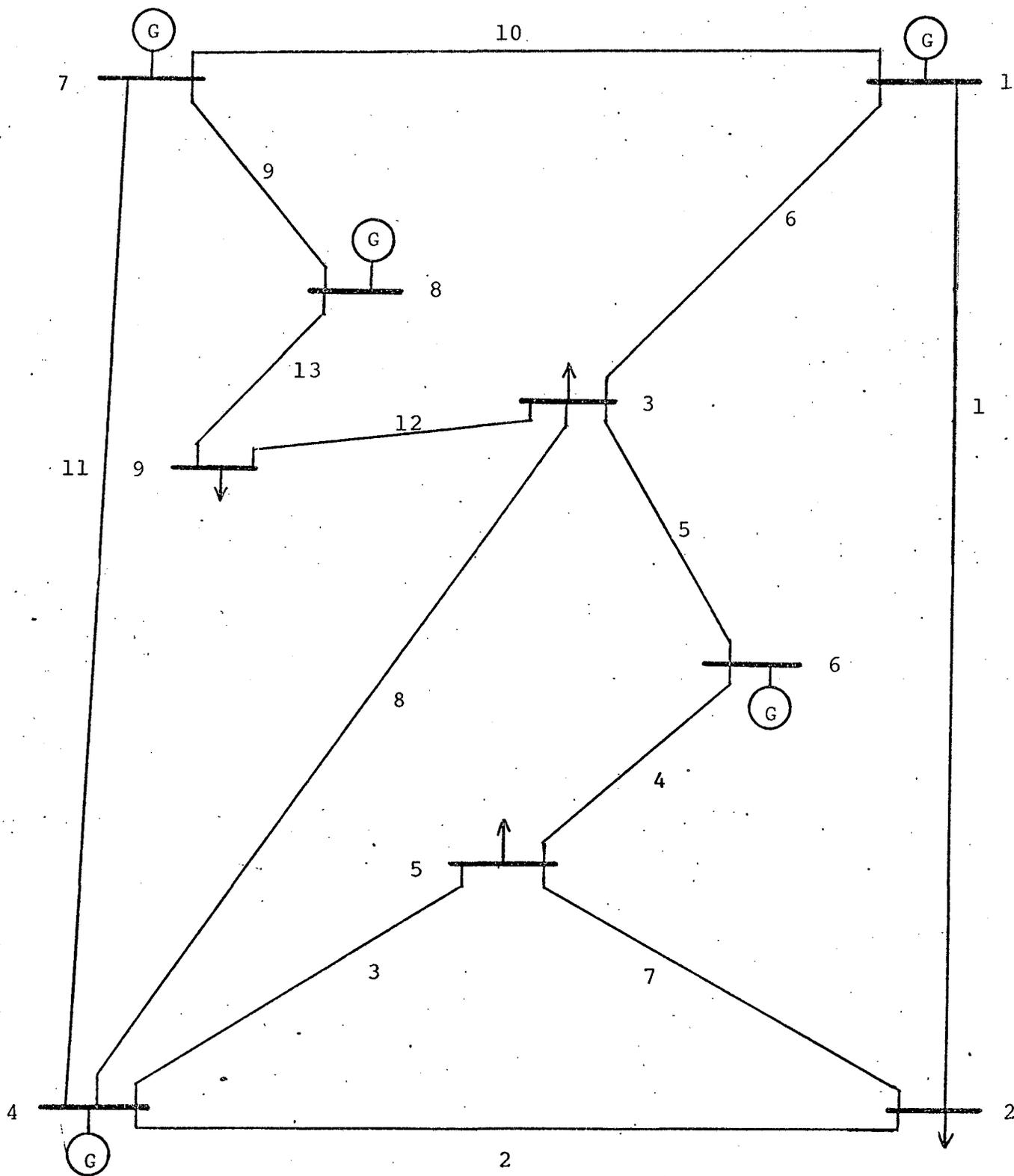


Figura 12: Topologia inicial do exemplo 2.

| Ramo | Início | Fim | Estado | Reatância Série | Limite de potência |
|------|--------|-----|--------|-----------------|--------------------|
| 1    | 1      | 2   | 1      | 0,121           | 2,70               |
| 2    | 2      | 4   | 1      | 0,230           | 2,30               |
| 3    | 4      | 5   | 1      | 0,102           | 2,70               |
| 4    | 5      | 6   | 1      | 0,286           | 2,10               |
| 5    | 3      | 6   | 2      | 0,285           | 2,10               |
| 6    | 1      | 3   | 1      | 0,131           | 2,65               |
| 7    | 2      | 5   | 1      | 0,230           | 2,30               |
| 8    | 3      | 4   | 1      | 0,242           | 2,25               |
| 9    | 7      | 8   | 1      | 0,714           | 1,45               |
| 10   | 1      | 7   | 1      | 1,000           | 1,50               |
| 11   | 4      | 7   | 1      | 0,128           | 2,65               |
| 12   | 3      | 9   | 2      | 0,285           | 2,10               |
| 13   | 8      | 9   | 2      | 0,285           | 2,10               |

Tabela 4: Dados da rede do exemplo 2

| Barra | Potência gerada | Carga |
|-------|-----------------|-------|
| 1     | 0,50            | -     |
| 2     | -               | 2,30  |
| 3     | -               | 2,00  |
| 4     | 2,00            | -     |
| 5     | -               | 2,00  |
| 6     | 1,50            | -     |
| 7     | 1,00            | -     |
| 8     | 2,80            | -     |
| 9     | -               | 1,50  |

Tabela 5: Dados de geração e carga

A figura 12, mostra a situação topológica de configuração inicial, a Tabela 3 mostra os elementos com seus valores físicos. Tabela 4 mostra a geração e a demanda nos barramentos respectivos.

Os dois algoritmos apresentaram o reforço da linha 13 no sistema, sob as mesmas considerações indicativas, no qual o ponto de operação está alocado em 41,04% no interior do polígono, obtendo-se um sistema seguro.

- Exemplo 3

Este exemplo foi feito sobre a mesma topologia do exemplo 2, apenas com mudança nos valores físicos dos elementos do sistema.

| Ramo | Início | Fim | Estado | Reatância Série | Limite térmico |
|------|--------|-----|--------|-----------------|----------------|
| 1    | 1      | 2   | 1      | 0,121           | 1,00           |
| 2    | 2      | 4   | 1      | 0,230           | 1,10           |
| 3    | 4      | 5   | 1      | 0,102           | 1,20           |
| 4    | 5      | 6   | 1      | 0,286           | 1,50           |
| 5    | 3      | 6   | 2      | 0,285           | 2,10           |
| 6    | 1      | 3   | 1      | 0,131           | 1,10           |
| 7    | 2      | 5   | 1      | 0,230           | 1,20           |
| 8    | 3      | 4   | 1      | 0,242           | 1,20           |
| 9    | 7      | 8   | 1      | 0,714           | 1,45           |
| 10   | 1      | 7   | 1      | 1,000           | 1,50           |
| 11   | 4      | 7   | 1      | 0,128           | 2,65           |
| 12   | 3      | 9   | 2      | 0,285           | 2,10           |
| 13   | 8      | 9   | 2      | 0,285           | 2,10           |

Tabela 6: Dados da rede do exemplo 3.

O sistema elétrico de potência do exemplo 3, fica especificado pela configuração da figura 12, e pelas Tabelas 5 e 6.

Este exemplo, mostra o caso em que a operação do sistema inicial está com o ponto fora do politopo em 37,09%.

Os dois algoritmos deram soluções idênticas e a sequência das 4 linhas são dadas a seguir.

Conexão da linha 3 no sistema inseguro, ficando o sistema em estado de alerta. As linhas 1,3 e 13, são conectadas, obtendo-se uma configuração segura com o ponto 30,61% dentro do politopo. A configuração mais frágil em contingência permanece com folga de 7,52%.

Assim, o ponto passou de 37,09% fora do politopo para 30,61% dentro do politopo em condições seguras. Esta grande sequência de linhas, caracteriza que o sistema inicial é muito fraco.

- Exemplo 4

| Ramo | Início | Fim | Estado | Reatância Série | Lim.de potência |
|------|--------|-----|--------|-----------------|-----------------|
| 1    | 1      | 2   | 1      | 0,010           | 1,00            |
| 2    | 1      | 3   | 1      | 0,015           | 0,75            |
| 3    | 2      | 3   | 1      | 0,084           | 1,25            |
| 4    | 1      | 4   | 1      | 0,005           | 0,50            |
| 5    | 3      | 4   | 1      | 0,122           | 0,70            |
| 6    | 3      | 5   | 1      | 0,084           | 0,90            |
| 7    | 4      | 6   | 1      | 0,037           | 1,00            |
| 8    | 2      | 7   | 1      | 0,126           | 1,20            |
| 9    | 7      | 8   | 1      | 0,168           | 0,80            |
| 10   | 5      | 8   | 1      | 0,084           | 0,50            |
| 11   | 6      | 9   | 1      | 0,037           | 0,40            |
| 12   | 8      | 9   | 1      | 0,140           | 0,40            |

Tabela 7: Dados do sistema

| Barra | Potência gerada | Carga |
|-------|-----------------|-------|
| 1     | 1,50            | 0,40  |
| 2     | 0,60            | 0,40  |
| 3     | 0,90            | 1,20  |
| 4     | 0,80            | 0,90  |
| 5     | 0,20            | 0,90  |
| 6     | 0,40            | 0,80  |
| 7     | 0,80            | 1,20  |
| 8     | 1,00            | 0,20  |
| 9     | 0,70            | 0,70  |

Tabela 8: Valores de geração e carga

No exemplo 4, a figura 13 mostra a topologia do sistema elétrico, sendo que os dados físicos respectivos a topologia são dados na Tabela 7 e 8.

Inicialmente, o ponto de operação do sistema original está em 11,09% fora do politopo. A sequência de linhas indicadas pelos dois algoritmos é dada a seguir.

O primeiro algoritmo, reforçou inicialmente o sistema acrescentando uma linha no ramo 4, levando o ponto de operação para 14,2% dentro do politopo e ficando assim o sistema em situação de alerta, dado ao resultado da análise de contingência. Para eliminar o estado de alerta, foi então necessário reforçar o sistema com as linhas 12, 10, 4 e 11, obtendo-se com isso um sistema seguro, com o ponto de geração a 43,94% dentro do politopo. A pior contingência deixa a operação com folga de 12,25%. Foi portanto necessário o reforço de 5 linhas, para a consequente obtenção da segurança do sistema.

- Exemplo 4:

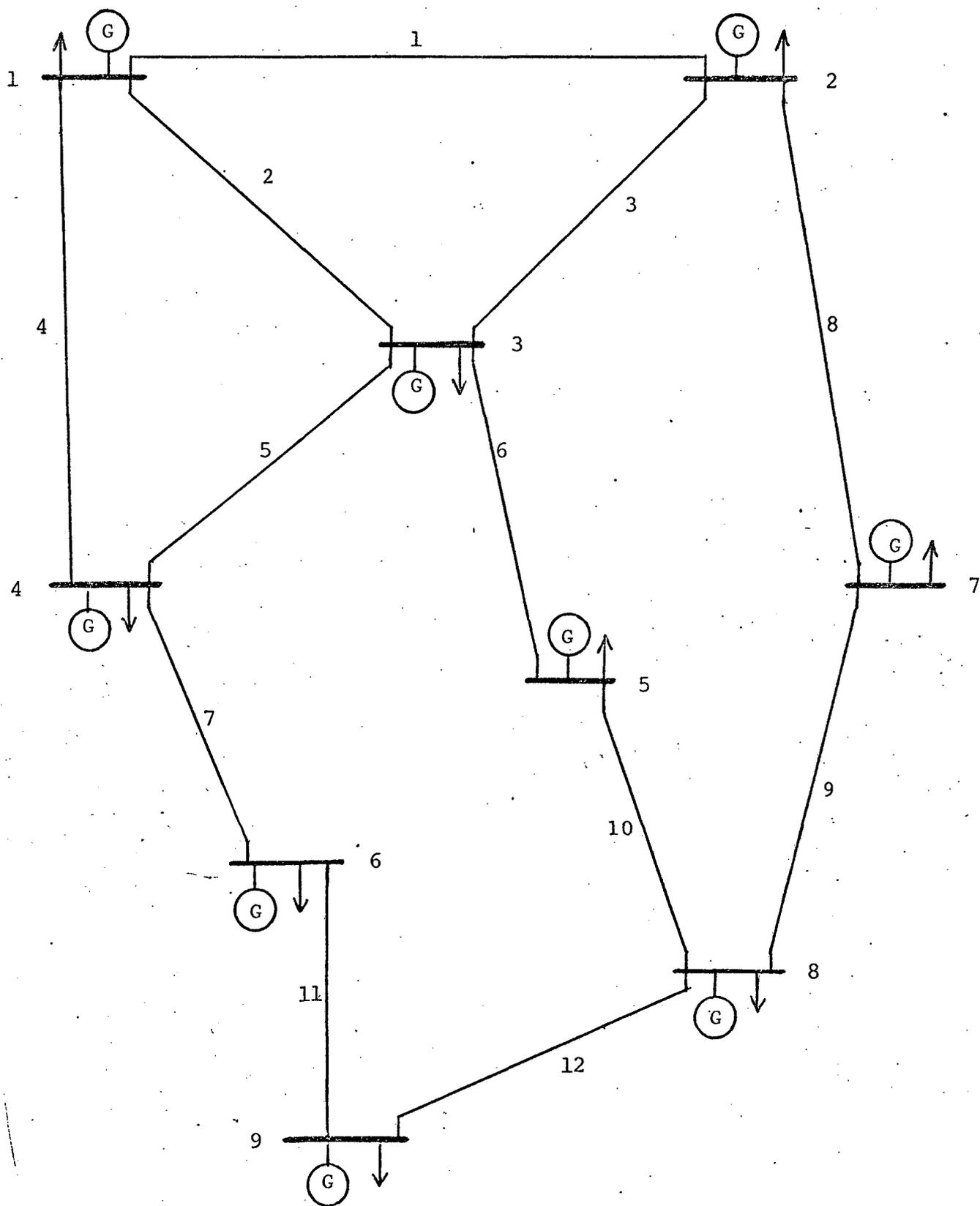


Figura 13: Configuração do Exemplo 4.

O segundo algoritmo, reforçou identicamente o sistema com a linha 4, no qual o ponto de operação deslocou-se a 14,2% no interior do politopo. Foram necessários, então, os reforços das linhas 7, 10 e 4, obtendo-se assim a segurança do sistema com o ponto de operação alocado a 48,12% dentro do politopo, com folga de 10,00% na pior contingência. Houve, então a necessidade de reforço de 4 linhas, para a obtenção da segurança do sistema.

### 5.3 - Exemplo do remanejamento da geração

São apresentados vários exemplos de sistema Elétricos de potência em situação insegura e em alerta, de modo que o remanejamento da geração aplicado, possibilitou a obtenção de operação segura do sistema. A contração do politopo usado é de 2%.

- Exemplo 5:

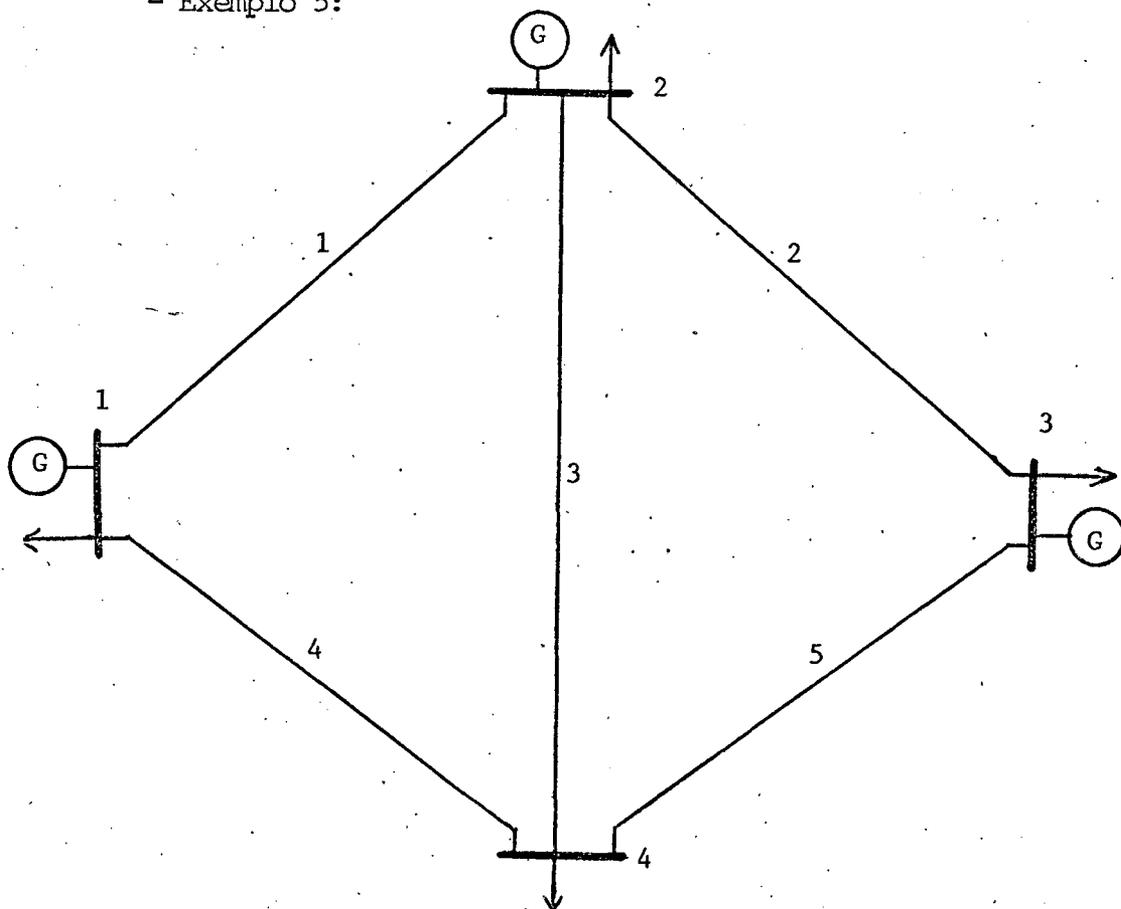


Figura 14: Configuração do Sistema Elétrico.

| Ramo | Início | Fim | Estado | Reatância Série | Lim.de potência |
|------|--------|-----|--------|-----------------|-----------------|
| 1    | 1      | 2   | 1      | 0,60            | 0,40            |
| 2    | 2      | 3   | 2      | 0,40            | 0,80            |
| 3    | 2      | 4   | 1      | 0,70            | 0,70            |
| 4    | 1      | 4   | 1      | 0,70            | 0,70            |
| 5    | 3      | 4   | 1      | 0,80            | 0,70            |

Tabela 9: Dados da rede do sistema

| Barra | Geração |        |        | Carga |
|-------|---------|--------|--------|-------|
|       | Inicial | Mínima | Máxima |       |
| 1     | 1,00    | 0,20   | 1,30   | 0,50  |
| 2     | 0,30    | 0,20   | 2,00   | 0,50  |
| 3     | 1,20    | 0,40   | 2,00   | 1,00  |
| 4     | -       | -      | -      | 0,50  |

Tabela 10: Limitações dos geradores e cargas.

A operação normal do sistema elétrico, com os respectivos dados do sistema da figura 14, tabela 9 e 10, apresenta uma profundidade de 46,47% no politopo, onde os testes de contingência caracterizam um sistema em alerta com um índice de sobrecarga de 25% fornecido pela contingência da linha 4.

O remanejamento de geração efetuado na configuração debilitada, forneceu um índice de penetração de 64%, onde os valores de geração são apresentados na tabela 11, no qual desloca o ponto de operação no sistema original para 51,26% dentro do politopo. Este novo ponto de operação levou o sistema a uma con

| Barra | Geração |
|-------|---------|
| 1     | 0,35599 |
| 2     | 0,75199 |
| 3     | 1,39202 |

Tabela 11: Solução do remanejamento

dição segura, produzindo uma folga de 27,56% na pior contingência.

Assim, o remanejamento da geração, atuou de maneira preventiva, colocando o sistema em operação segura.

- Exemplo 6:

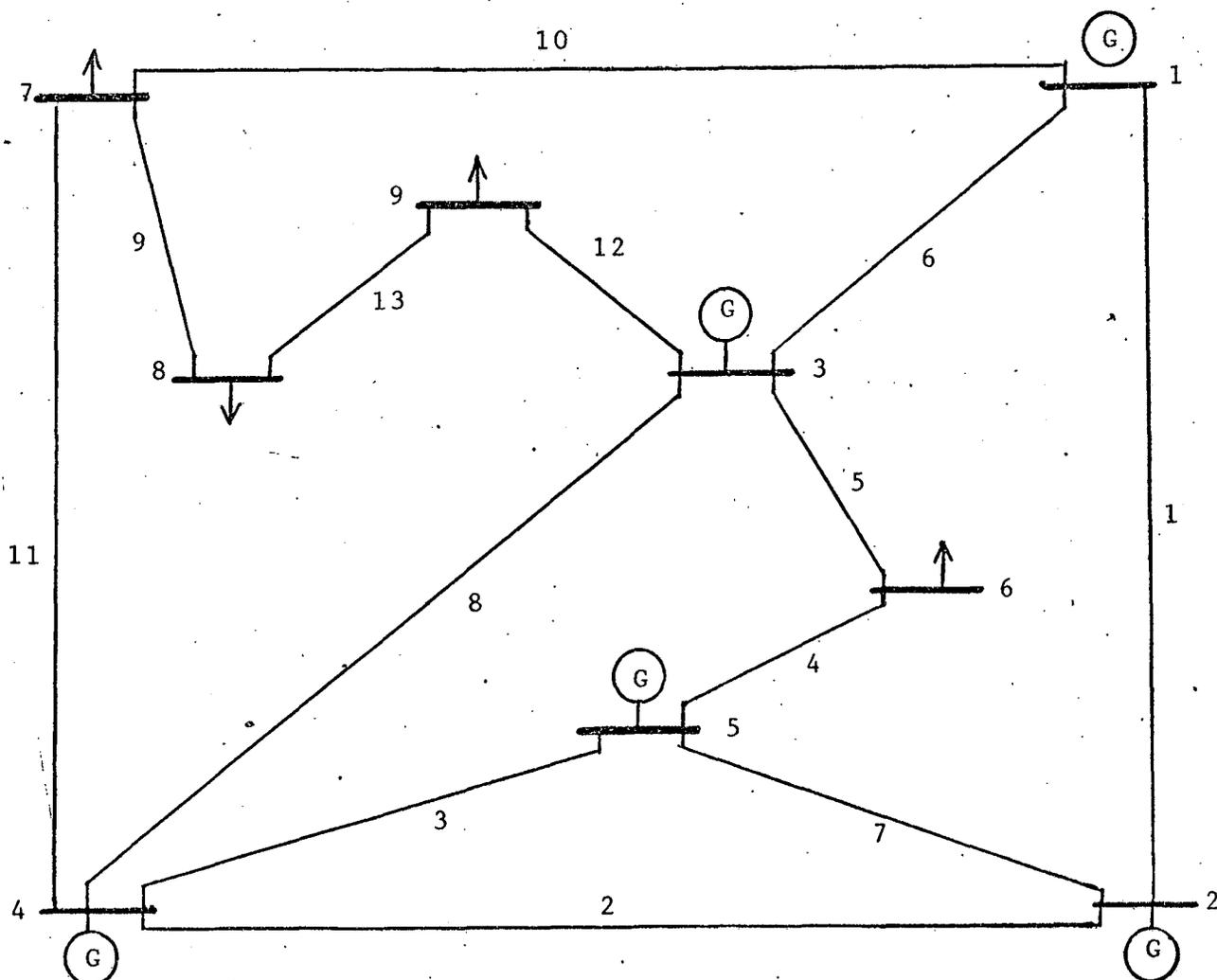


Figura 15: Configuração do sistema elétrico.

| Ramo | Início | Fim | Estado | Reatância Série | Lim.de potência |
|------|--------|-----|--------|-----------------|-----------------|
| 1    | 1      | 2   | 1      | 0,121           | 2,70            |
| 2    | 2      | 4   | 1      | 0,230           | 2,30            |
| 3    | 4      | 5   | 1      | 0,102           | 2,75            |
| 4    | 5      | 6   | 1      | 0,286           | 2,10            |
| 5    | 3      | 6   | 2      | 0,285           | 2,10            |
| 6    | 1      | 3   | 1      | 0,131           | 2,65            |
| 7    | 2      | 5   | 1      | 0,230           | 2,30            |
| 8    | 3      | 4   | 1      | 0,242           | 2,25            |
| 9    | 7      | 8   | 1      | 0,714           | 1,45            |
| 10   | 1      | 7   | 1      | 1,000           | 1,50            |
| 11   | 4      | 7   | 1      | 0,128           | 2,65            |
| 12   | 3      | 9   | 2      | 0,285           | 2,60            |
| 13   | 8      | 9   | 2      | 0,285           | 2,10            |

Tabela 12: Dados da configuração

| Barra | Geração |        |        | Carga |
|-------|---------|--------|--------|-------|
|       | Inicial | Mínima | Máxima |       |
| 1     | 0,50    | 0,30   | 1,00   | -     |
| 2     | 2,00    | 0,70   | 2,00   | -     |
| 3     | 1,50    | 0,70   | 1,80   | -     |
| 4     | 1,00    | 0,40   | 1,30   | -     |
| 5     | 2,80    | 1,00   | 3,00   | -     |
| 6     | -       | -      | -      | 2,30  |
| 7     | -       | -      | -      | 2,00  |
| 8     | -       | -      | -      | 2,00  |
| 9     | -       | -      | -      | 1,50  |

Tabela 13: Limitações dos geradores e cargos

Para os dados apresentados o sistema de potência in

dica um sistema em alerta, com o ponto de geração a 11,40% dentro do politopo, e com índice de sobrecarga de 0,56% fornecido pela contingência na linha 1.

Com a aplicação do algoritmo sobre a configuração debilitada, consegue-se uma penetração de 6% no politopo, no qual as potências fornecidas pelo remanejamento, são apresentadas na tabela 14.

| Barra | Geração |
|-------|---------|
| 1     | 1,00    |
| 2     | 1,60    |
| 3     | 1,80    |
| 4     | 0,40    |
| 5     | 3,00    |

Tabela 14: Solução do remanejamento

Com este reajustamento de geração, o ponto de operação do sistema original deslocou-se para 14,89% dentro do politopo, obtendo-se uma operação segura, sendo que para a pior contingência a folga é de 0,7%.

Então, com o novo ponto de operação, obtido pelo controle da geração dada pela Tabela 14, consegue-se trazer o sistema para operação segura, fazendo o controle preventivo.

- Exemplo 7:

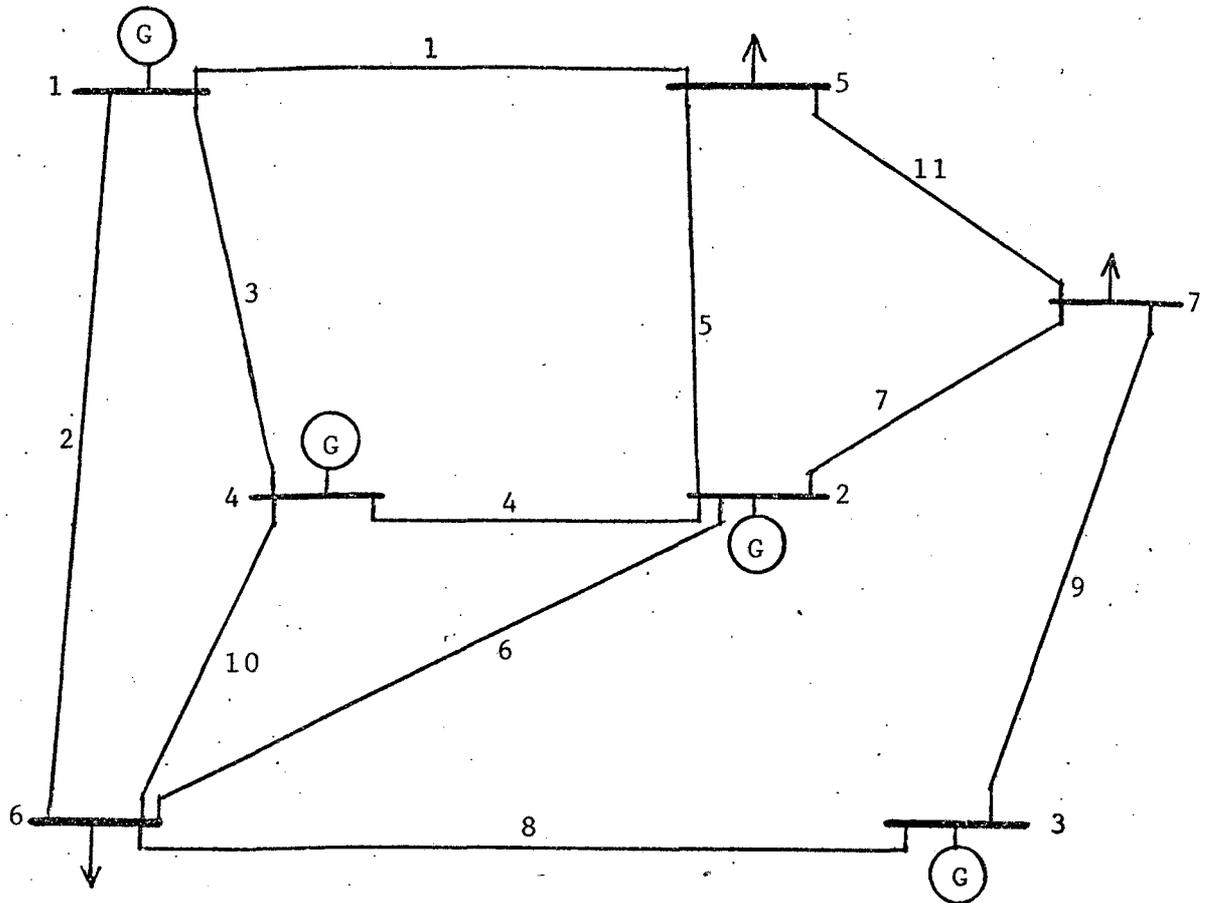


Figura 16: Configuração do sistema de Potência.

| Ramo | Início | Fim | Estado | Reatância Série | Lim.de potência |
|------|--------|-----|--------|-----------------|-----------------|
| 1    | 1      | 5   | 1      | 0,425           | 2,00            |
| 2    | 1      | 6   | 1      | 0,460           | 1,90            |
| 3    | 1      | 4   | 1      | 3,500           | 1,00            |
| 4    | 2      | 4   | 1      | 0,450           | 1,00            |
| 5    | 2      | 5   | 1      | 0,805           | 1,70            |
| 6    | 2      | 6   | 1      | 0,805           | 1,65            |
| 7    | 2      | 7   | 1      | 0,360           | 2,20            |
| 8    | 3      | 6   | 2      | 1,000           | 1,45            |
| 9    | 3      | 7   | 2      | 1,008           | 1,50            |
| 10   | 4      | 6   | 1      | 1,000           | 1,45            |
| 11   | 5      | 7   | 1      | 0,805           | 1,70            |

Tabela 15: Dados da rede

| Barra | Geração |        |        | Carga |
|-------|---------|--------|--------|-------|
|       | Inicial | Mínimo | Máxima |       |
| 1     | 0,88    | 0,50   | 1,50   | -     |
| 2     | 2,00    | 1,00   | 3,00   | -     |
| 3     | 1,50    | 1,00   | 2,30   | -     |
| 4     | 1,57    | 1,00   | 2,60   | -     |
| 5     | -       | -      | -      | 1,850 |
| 6     | -       | -      | -      | 2,00  |
| 7     | -       | -      | -      | 2,10  |

Tabela 16: Limitações dos geradores e cargas

O sistema elétrico mostrado neste exemplo, está com o ponto de operação dentro do politopo em 30,06%, o qual representa uma configuração viável. O teste de contingência caracterizou o sistema em alerta, tendo um índice de sobrecarga de 28,39% com a saída de linha 10.

O remanejamento da geração trouxe o sistema para a segurança, através da configuração debilitada com índice de penetração de 26% no politopo, no qual o ponto de operação do sistema original passou a 33,18%, produzindo para a pior contingência uma folga de 8,8%.

Os valores das novas potências geradas, são apresentadas na tabela 17.

| Barra | Potência gerada |
|-------|-----------------|
| 1     | 0,500           |
| 2     | 2,745           |
| 3     | 1,705           |
| 4     | 1,000           |

Tabela 17: solução do remanejamento

Exemplo 8:

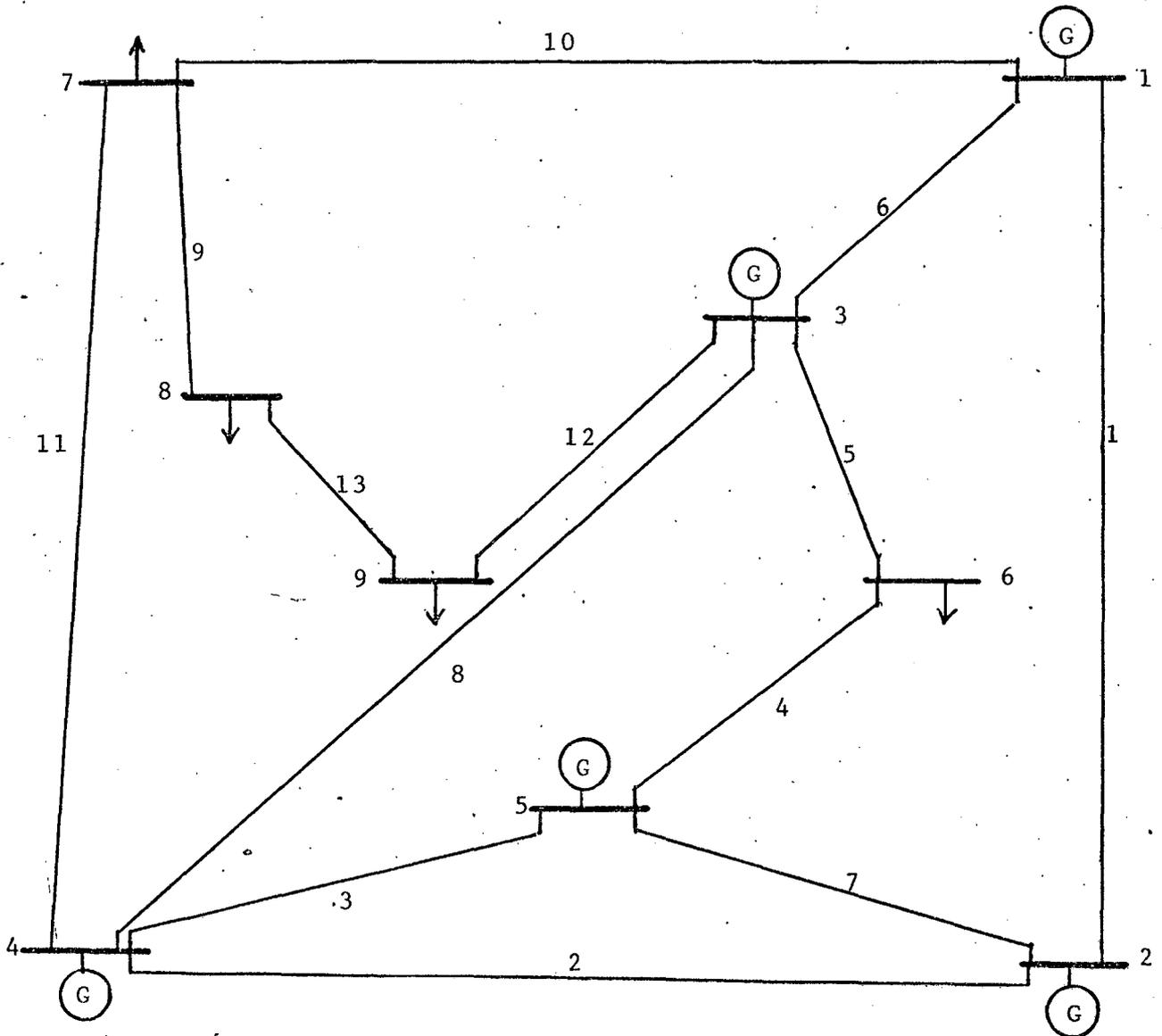


Figura 17: Configuração do sistema

| Ramo | Início | Fim | Estado | Reatância Série | Lim.de Potência |
|------|--------|-----|--------|-----------------|-----------------|
| 1    | 1      | 2   | 1      | 0,121           | 2,700           |
| 2    | 2      | 4   | 1      | 0,230           | 0,680           |
| 3    | 4      | 5   | 1      | 0,102           | 2,750           |
| 4    | 5      | 6   | 1      | 0,286           | 2,100           |
| 5    | 3      | 6   | 2      | 0,285           | 2,100           |
| 6    | 1      | 3   | 1      | 0,131           | 2,650           |
| 7    | 2      | 5   | 1      | 0,230           | 2,300           |
| 8    | 3      | 4   | 1      | 0,242           | 0,649           |
| 9    | 7      | 8   | 1      | 0,714           | 1,450           |
| 10   | 1      | 7   | 1      | 1,000           | 1,500           |
| 11   | 4      | 7   | 1      | 0,128           | 2,650           |
| 12   | 3      | 9   | 2      | 0,285           | 2,100           |
| 13   | 8      | 9   | 2      | 0,285           | 2,100           |

Tabela 18: Dados da rede

| Barra | Geração |        |        | Carga |
|-------|---------|--------|--------|-------|
|       | Inicial | Mínima | Máxima |       |
| 1     | 0,50    | 0,30   | 1,00   | -     |
| 2     | 2,00    | 0,70   | 2,00   | -     |
| 3     | 1,50    | 0,70   | 1,80   | -     |
| 4     | 1,00    | 0,40   | 1,30   | -     |
| 5     | 2,80    | 1,00   | 3,00   | -     |
| 6     | -       | -      | -      | 2,30  |
| 7     | -       | -      | -      | 2,00  |
| 8     | -       | -      | -      | 2,00  |
| 9     | -       | -      | -      | 1,50  |

Tabela 19: Dados dos geradores e cargas

A configuração do sistema elétrico de potência do exemplo 8, é dada na figura 18, seus respectivos valores físicos são dados nas tabelas 18 e 19.

Para a situação inicial do problema, o ponto de operação do sistema, está alocado fora do politopo com um índice de sobrecarga de 11,41%, caracterizando um sistema em operação insegura. O algoritmo do remanejamento, através do seu processamento deslocou o ponto de operação para o interior do politopo em 12%, obtendo-se assim uma operação viável.

A potência de geração, do novo ponto de operação é dada na tabela 20.

| Barra | Geração |
|-------|---------|
| 1     | 1,000   |
| 2     | 1,265   |
| 3     | 1,800   |
| 4     | 0,735   |
| 5     | 3,000   |

Tabela 20: Resultado do remanejamento da geração.

## C A P Í T U L O VI

### CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

#### 6.1 - Conclusões e comentários finais

De acordo com o objetivo proposto, pretendeu-se reunir informações e conceitos básicos que permitissem a formulação do problema da melhoria da segurança. Com este objetivo, considerou-se o problema do planejamento da expansão do sistema de transmissão e o problema da operação de um sistema de energia elétrica.

A partir dos dados característicos do sistema e considerando os limites de utilização das linhas e geradores, definiu-se uma região de pontos de operações viáveis chamada polítopo. Utilizando-se esta definição, foram apresentadas índices, a partir dos quais caracterizou-se um sistema seguro.

O problema do planejamento da expansão do sistema de transmissão, onde sobrecarga é função da evolução do mercado, é eliminada pelo reforço do sistema de transmissão. Para isto, foram apresentados dois algoritmos. O primeiro deles, é baseado no maior sobrecarregamento da linha sob contingência e o segundo é baseado no ponto de operação sob contingência mais afastado do polítopo.

O problema do remanejamento da geração, tem o objetivo eliminar sobrecarga no sistema, através do redespacho da ge

ração. Este problema é solucionado fazendo-se uso do índice de penetração no politopo, sendo então um problema da operação em tempo real, para o controle da segurança.

Devido às restrições operativas do sistema, o remanejamento da geração pode não eliminar a sobrecarga. Neste caso, tem-se como recurso adicional o alívio de carga.

As proposições apresentadas no capítulo III, relativas ao reforço do sistema de transmissão para a obtenção da configuração segura, mostraram através dos exemplos do capítulo V, a sequência de linha a serem conectadas, fornecidas pelos dois algoritmos.

Procurou-se nos exemplos, apresentar os sistemas em sequência decrescente da segurança e os resultados obtidos pelos algoritmos para a respectiva solução.

O último algoritmo apresenta-se mais eficiente, produzindo uma sequência de reforços com menor número de linhas.

A utilização dos algoritmos propostos, baseados nos índices definidos, indicam uma sequência de reforços que levam a um sistema seguro.

O índice de sobrecarga do segundo algoritmo é mais significativo, devido do seu efeito ser exercido sobre o sistema inteiro, acarretando uma convergência à segurança mais robusta.

E sendo que, dentro da segunda política de expansão do sistema de transmissão, se desejável, pode-se dar liberdade de expansão explorando novos ramos, o que produziria novos caminhos à convergência.

O uso da configuração debilitada, é promissor e produz a indicação do caminho a seguir, de modo a levar para dentro do politopo todos os pontos de operação sob contingência. Devido a esta orientação produzida, a configuração debilitada foi também usada na política do remanejamento da geração, para a obtenção da segurança do sistema de potência.

O remanejamento da geração, apresentado no capítulo IV, na qual a programação linear com função objetiva modificada sobre as variáveis de folga, operando com a configuração debilitada, processada pelo politopo contráctil, produziu convergência à segurança do sistema. Novamente, bons resultados foram obtidos empregando a configuração debilitada.

A dificuldade para a solução do problema da obtenção da segurança, está na convergência do controle da geração no sistema original, de modo a garantir a segurança do sistema sob contingência.

O uso do politopo contráctil junto com a função objetiva modificada, possibilitou a obtenção de soluções no interior do politopo.

No capítulo V, apresentam-se vários exemplos de sistemas, no qual o remanejamento da geração, com mudanças convenientes das potências geradas, possibilitaram a operação do sistema em segurança. O último exemplo, mostra a obtenção de operação viável do sistema com a máxima penetração no politopo.

O remanejamento da geração, para a obtenção da segurança de maneira preventiva, eliminando-se os estados de alerta, dá plenas condições de real segurança da operação do sistema, diminuindo os riscos do mesmo.

## 6.2 - Aplicações

Apresentam-se aqui, várias ocorrências onde o assunto de trabalho é aplicável e útil.

Existem no dia a dia da operação do sistema, muitas perturbações que colocam o sistema em novas situações de enfraquecimento da segurança, com riscos de possíveis e sérios danos.

Mostram-se então, sugestões para a solução de problemas frequentes em que a operação fica submetida.

6.2.1 - Supondo-se que o sistema elétrico de potência está operando normalmente, ocorrendo a perda de um equipamento importante ou devendo o mesmo ser submetido a uma manutenção prevista, isto desloca o ponto de operação dentro do politopo, podendo o sistema ficar em alerta. Neste caso, efetua-se o controle preventivo remanejando a geração, para tirar o sistema do estado de alerta e levá-lo ao estado de segurança.

6.2.2 - Quando uma carga grande for conectada ao sistema de maneira não prevista (por exemplo, um inesperado intercâmbio de energia, para atender em emergência uma outra região, o ponto de operação será alocado em outra posição, podendo o sistema ficar em alerta. O remanejamento da geração, então poderá resolver o problema, obtendo-se um ponto de operação seguro, para prevenir possíveis riscos de perda.

6.2.3 - A entrada de uma usina ou linha de transmissão foi adiada,

por algum motivo. Sendo este fato não previsto pelo planejamento. Mesmo assim o crescimento da demanda processa-se normalmente, deslocando o ponto de operação no politopo, deixando o sistema em alerta. Para tirar o sistema do estado de alerta, processa-se o remanejamento da geração na perspectiva de obter um novo ponto de operação seguro.

6.2.4 - Quando o nível de segurança desejável do sistema não se mantiver frente à demanda solicitada, pode-se remanejar a geração, de modo a buscar um ponto de operação, que sobrecarregaria o sistema a uma dada contingência de pequena probabilidade de ocorrência.

Assim, opera-se o sistema em estado de alerta, mais salvaguardado pela confiabilidade de pequeno risco de perda de uma respectiva contingência.

6.2.5 - Dentro das formulações e condições estipuladas, obtém-se a segurança do sistema através do reforço de linhas de transmissão conectadas ao sistema.

Os próprios algoritmos darão a sequência da evolução da expansão do sistema, objetivando a segurança.

### 6.3 - Sugestões

Apresentam-se aqui, algumas sugestões para futuros trabalhos dentro da filosofia apresentada e dando continuidade ao mesmo.

6.3.1 - Quando um sistema elétrico de potência esta em estado inseguro e o remanejamento da geração não consegue colocar o ponto de operação dentro do politopo. Busca-se então, a situação de operação  $[p_G]$  que tenha o ponto mais próximo possível do politopo. Pode-se, então a partir deste ponto processar o menor corte de carga para levar o ponto de operação sobre a fronteira do politopo, ou se desejar, até a obtenção de segurança.

6.3.2 - Transferir o politopo do sistema original isto é do  $R^{NR}$ , para o politopo do  $R^{NG}$  relativo ao sistema equivalente às barras de máquinas.

Efetua-se assim, o remanejamento da geração sobre o sistema equivalente, buscando a operação mais interna no politopo, tal que as defasagens entre as barras de máquina sejam as menores e mais uniformes possíveis.

Consegue-se assim, uma relaxação entre os ângulos, aumentando-se o domínio de estabilidade transitória do sistema, o qual terá maiores condições de suportar anomalias e perturbações transitórias.

6.3.3 - Conciliar a segurança X custos para a solução de alternativas de configurações sob o ponto de vista do planejamento.

6.3.4 - Demarcação ou âbacos de regiões de segurança dentro do politopo.

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

- 1 - MONTICELLI, Alcir J. "Análise Estática de Contingências em sistemas de Energia Elétrica". Tese de livre docência - Universidade Estadual de Campinas - 1980
- 2 - EWART, D.N. "Whys and Wherefores of power System blackouts" IEEE Spectrum - April 1978.
- 3 - LIACCO, T.E.D. "System Security: The Computer's role" IEEE - Spectrum - June - 1978.
- 4\* - SIROUX, J.G; Pouget J. and Merlin A. "The Economic Load Dispatch - State of the Problem and Developments at Electricité de France" - Electricité de France, Clamart, France.
- 5\* - TINNEY, W.F. and Peterson N.M. "Steady State Security Monitoring".
- 6 - STOTT B. and Marinho J.L. "Linear Programming for power System Network Security Applications" IEEE - PES - Summer Meeting, Los Angeles, C.A. July, 16-21-1978
- 7 - SACHDEV M.S. and Ibrahim S.A. "A fast Approximate Technique for outage studies in power System Planning and Operation" IEEE - PES Summer Meeting & EHV/UHV Conference, Vancouver, B.C. Canada - July 15-20, 1973.
- 8 - TINNEY W.F and Peschon J. "On the use of Power Flow Models for System Planning and Operations" Proceedings of the American Power Conference, Vol. 31, pp 955 - 1969.

- 9 - ALSAC O. and Stott B. "Optimal Load Flow With Steady - State Security" IEEE - PES Summer Meeting & EHV/UHV conference, Vancouver, B.C., Canadá, July 15-20 - 1973.
- 10 - CHAN S.M. and Yip E. "A Solution of the Transmission Limited Dispatch problem by sparse Linear programming" IEEE -TPAS, Vol PAS-98 Nº 3 May/Junho 1979.
- 11 - PODMORE R. "Economic Power Dispatch With line Security Limits" IEEE - PES - Summer Meeting & EHV/UHV conference, Vancouver, B.C., Canadá July 15-20, 1973.
- 12 - FONSECA, L.G.S e Borenstein, C.R. "Uso de Domínios de Estabilidade na análise de segurança "On-Line" de Sistemas de Potência. III Congresso Chileno de Ingenieria Eléctrica Concepción - Chile, Mayo 1979.
- 13 - L.P. Hajdu (Editor) "Power System Security Monitoring" Report on Contract 14-03 - 79968, prepared for the Bonneville Power Administration, December 1969.
- 14 - MIKOLINNAS, T.A. and Wollenberg B.F "An advanced Contingency Selection Algorithm". IEEE TPAS, Vol. PAS-98, pp. 97-109 Jan/Feb - 1974
- 15 - SACHDEV, M.S. and Ibrahim, S.A., "An Approach for Preventing system Insecurities arising from line and Transformer outages" IEEE - TPAS, Vol.-PAS-94, nº 6 Nov/Dec 1975.
- 16 - PESCHON, J; Piercy, D.S. and Tinney W.F. and Tveit O.J. "Sensitivity in Power Systems" IEEE Trans. Vol.-PAS-87 - pp. 1687, 1968

- 17 - STOTT B. and Hobson E. "Power system Security Control calculations Using Linear Programming" Part I and Part II IEEE-TPAS, Vol.-PAS-97, No 5, Sept/oct - 1978.
- 18 - KALTENBACH J.C. and Peschon J. "A mathematical optimization Technique for the Expansion of Electric Power Transmission Systems" IEEE - TPAS, Vol.PAS-89, pp. 113-119 - January, 1970.
- 19 - PESCHON J.; Kaltenbach Jc; Henault P.; Siddigee N. W. and Hajdu L.P. "Power System planning and reliability" Stanford Res. Inst., Menlo Park, Calif., Project 6619, contract 14-03-72910 prepared for Bonneville Power Admin, Final Rept., June 1968.
- 20 - CASH P.W. and Scott E.C. "Security of supply in planning and operation of European Power Systems, p.t. II - IEEE-TPAS, Vol. PAS-88, pp. 13-21 Janeiro 1969.
- 21 - STOTT B. and Marinho J.L. "linear Programming for Power System Network Security Applications" IEEE-TPAS, Vol.-PAS-98, No 3, May/June 1979.
- 22 - IRISARRI G.D. and Sasson A.M. "An Automatic Contingency Selection Method for on-line security Analysis" IEEE - PES-Summer Meeting, Minneapolis, Minnesota July 13-18, 1980.
- 23 - IRISARRI G.D. and Levner D., and Sasson A.M. "Automatic Contingency Selection for on-line Security Analysis - Real Time Tests" IEEE - TPAS - Vol.-PAS-98 - pp. 1552 - 1559. Sep/Oct 1979.

- 24 - BAUGHMAN M.L. and Schweppe F.C. "Contingency Evaluation - Real Power flow from a Linear Model" IEEE Summer Power Meeting & EHV conference, Los Angeles Calif., July 12-17, 1970
- 25 - RUDNICK H. and Brameller A "Transient Security Assessment Methods" Proc IEE, Vol. 125, Nº 2, February, 1978
- 26 - CHAN S.M. and Schweppe F.C. "A Generation Reallocation and Load Shedding Algorithm" IEEE - TPAS-Vol.-PAS-98, Nº 1, Jan/Feb 1979
- 27 - Kirchmayer L.K. "Economic Operation of Power Systems" Wiley, New York, 1952.
- 28 - Gonzaga, C.C. "Estudo de algoritmos de busca em grafos e sua aplicação a problema de Planejamento" Tese D.Sc, Coppe, R.J. 1973.
- 29 - WHYSONG, Uram, Brown, Kung, De Salvo "Computer Program for Automatic Transmission Planning" IEEE - PAS 81, pp. 774-81, 1963.
- 30 - BORENSTEIN, C.R "Planejamento a curto prazo do Sistema de Transmissão de energia elétrica com restrição de estabilidade Transitória" Dissertação de mestrado - UFSC -1977
- 31 - SHIPLEY R.B. and Coleman D. "A new direct matrix inversion method" Trans. AIEEC & E, Vol. 78, Nov-1959 - pp.568 -572
- 32 - BROWN H.E. "Contingencies Evaluated by a Z matrix Method" IEEE - Trans., Vol.-PAS-88, p 409, April 1969.

- 33 - BROWN H.E "Interchange Capability and Contingency Evaluation by a Z matrix Method" IEEE - Trans. Vol.-91, pp. 1827, Sept/oct - 1972.
- 34 - LIMMER H.D. "Security Applications of on-line digital Computers" presented at the Second Power System Computation Conf, Stockholm, Sweden June 27-July 1, 1966.
- 35 - HADLEY G. "Linear Programming" Addison-Wesley Publishing Company.