

OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE INTERCÂMBIO EM SISTEMAS INTERLIGADOS

ÁLVARO AUGUSTO DA COSTA SILVA

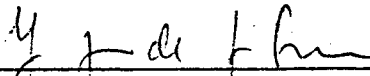
ESTA TESE FOI JULGADA ADÉQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"MESTRE EM CIÊNCIAS"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA  
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.

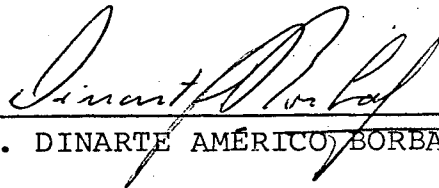
BANCA EXAMINADORA:



PROF. HANS HELMUT ZÜRN, Ph.D.  
ORIENTADOR



PROF. LUIZ GONZAGA DE S. FONSECA, D.Sc.



PROF. DINARTE AMÉRICO BORBA, M.Sc.



PROF. HANS HELMUT ZÜRN, Ph.D.

COORDENADOR DO CURSO DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE INTERCÂMBIO EM  
SISTEMAS INTERLIGADOS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE "MESTRE EM CIÊNCIAS".

ÁLVARO AUGUSTO DA COSTA SILVA

FLORIANÓPOLIS  
SANTA CATARINA - BRASIL  
DEZEMBRO - 1976

A meus pais

A minha esposa

A meu filho

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Hans Helmut Zörn, pela orientação prestada na realização deste trabalho.

À CAPES, BNDE e à FINEP, pela ajuda financeira.

S U M Á R I O

SIMBOLOGIA .....	viii
<u>CAPÍTULO I</u> - INTRODUÇÃO .....	1
<u>CAPÍTULO II</u> - MODELAGEM MATEMÁTICA .....	5
2.1 - Introdução .....	5
2.2 - Modelo de fluxo .....	5
2.3 - Modelo de acoplamento .....	6
2.3.1 - Fator de acoplamento entre linha e barra .....	7
2.3.2 - Fator de acoplamentos entre li nhas .....	8
2.4 - Modelo do problema de otimização do fluxo de intercâmbio .....	10
<u>CAPÍTULO III</u> - CRITÉRIOS DE PLANEJAMENTO ADOTADOS .....	14
3.1 - Introdução .....	14
3.2 - Configurações iniciais da rede de transmissão .....	14
3.3 - Critérios de planejamento adotados ...	14
3.4 - Matrizes <u>A</u> , <u>P</u> para os critérios ado- tados .....	15
3.4.1 - Critério da configuração inicial normal sem desligamentos .....	15
3.4.2 - Critério da configuração inicial normal com desligamento simples	16
3.4.3 - Critério da configuração inicial normal com desligamento duplo ..	16
3.4.4 - Critério da configuração de con tingência inicial .....	17

<u>CAPÍTULO IV</u>	- SELEÇÃO DE LINHAS PARA O ESTUDO .....	18
4.1	- Introdução .....	18
4.2	- Procedimento para seleção de linhas..	18
4.2.1	- Linhas selecionadas para o critério da configuração inicial normal sem desligamento .....	18
4.2.2	- Linhas selecionadas para o critério da configuração inicial normal com desligamento simples	20
4.2.3	- Linhas selecionadas para o critério da configuração inicial normal com desligamento duplo..	21
4.2.4	- Linhas selecionadas para o critério da configuração de contingência inicial .....	22
<u>CAPÍTULO V</u>	- SIMULAÇÃO DIGITAL E APLICAÇÃO A UM SISTEMA EXEMPLO .....	23
5.1	- Introdução .....	23
5.2	- Simulação digital .....	23
5.2.1	- Simplificações assumidas na simulação .....	25
5.2.2	- Limitações do programa .....	25
5.2.3	- Recursos do programa .....	25
5.3	- Aplicação a um sistema exemplo .....	26
<u>CAPÍTULO VI</u>	- RESULTADOS OBTIDOS .....	29
6.1	- Introdução .....	29
6.2	- Procedimento para comparação de resultados .....	29
6.3	- Apresentação e discussão dos resultados .....	30

<u>CAPÍTULO VII</u> - CONCLUSÕES .....	38
<u>APÊNDICE I</u> - PROGRAMA DIGITAL .....	41
REFERÊNCIAS .....	53
BIBLIOGRAFIA .....	55

## S I M B O L O G I A

- $\underline{A} = |a_{ij}|$  : Matriz de coeficientes de incremento de fluxo.
- $\alpha_{kj}$  : Fator de acoplamento entre linhas e barras: é o incremento no fluxo de potência ativa na linha  $k$ , devido a uma transferência  $I_j$  de potência unitária entre as barras  $p$ - $q$ .
- $\underline{B} = |b_{ij}|$  : Matriz de susceptâncias de barra.
- $\beta_{kl}$  : Fator de acoplamento entre linhas: é o incremento no fluxo de potência ativa da linha  $k$ , devido a interrupção de um fluxo unitário em  $l$ .
- $\beta'_{kl}$  : Fator de acoplamento entre linhas modificado para considerar um desligamento duplo.
- $\delta_p, \delta_q$  : Ângulo das tensões nas barras  $p$ - $q$ .
- $F_k^0$  : Fluxo inicial de potência ativa na linha  $k$ .
- $F_k^n$  : Fluxo limite nominal normal da linha  $k$ .
- $F_k^e$  : Fluxo limite de emergência de curta duração da linha  $k$ .
- $\underline{G} = |G_i|$  : Vetor de reserva girante disponível. A  $i$ ésima componente é a reserva girante disponível para intercâmbio na  $i$ ésima companhia vizinha.
- $\underline{I} = |I_i|$  : Vetor de intercâmbios. A  $i$ ésima componente é o intercâmbio da  $i$ ésima companhia vizinha.
- $\mathcal{E}$  : Conjunto das linhas da rede de transmissão.
- $k, l, m$  : Designação genérica de linhas da rede de transmissão.
- $M$  : Número de linhas da rede de transmissão envolvidas no estudo.



- $N$  : Número de companhias adjacentes interligadas àquela em estudo.
- $\underline{O} = |O_i|$  : Vetor nulo.
- $\underline{P} = |P_i|$  : Vetor limite de incremento de fluxo em linha.
- $p, q, r, s$  : Designação genérica de barras do sistema.
- $r_k$  : Resistência da linha  $k$ .
- $\underline{S} = |S_i|$  : Vetor de potência ativa injetada nas barras do sistema.
- $\underline{U} = |U_i|$  : Vetor de componentes unitárias.
- $V_p, V_q$  : Módulo das tensões nas barras  $p$ - $q$ .
- $x_k$  : Reatância série da linha  $k$ .
- $\underline{X} = |X_{ij}|$  : Matriz de reatâncias de barra.
- $\Delta$  : Quando colocado a esquerda de um símbolo, representa variação na grandeza representada por este símbolo.
- $\circ \downarrow$  : Barra de referência.

## R E S U M O

O trabalho é dirigido à área de planejamento de sistemas interligados. Apresenta uma abordagem ao problema de otimização do fluxo de intercâmbio em sistemas interligados.

Foram determinados: a máxima importação simultânea admissível para uma companhia de suas vizinhas para várias configurações da rede de transmissão, a divisão ótima dessas importações entre as companhias vizinhas e os elementos da rede de transmissão que restringem a importação a este máximo.

Para tal utilizou-se como ferramentas: um modelo linearizado de fluxo de potência, fatores de acoplamento de uma rede obtidos da matriz de reatância de barras, e a técnica de otimização por programação linear.

Considerando-se as suposições de linearidade que foram assumidas, a abordagem produziu resultados com uma aproximação plenamente tolerável para a área de aplicação do trabalho, assim como propicia uma economia em termos de tempo de giro em computador.

## A B S T R A C T

This work deals with the area of planning of interconnected power systems. It presents an approach to the problem of optimization of interchange flow in interconnected power systems.

The following elements are computed: the maximum admissible simultaneous import into a company for several configurations of transmission network; the optimal combination of scheduled transfers with the neighbors and the elements of the transmission network constraining the import to this maximum.

For this one uses a linear model of power flow, coupling factors of a network obtained from the bus reactance matrix and the optimizing technique of linear programming.

If one considers the linearity suppositions, the results of approach are a very good approximation for the area of application of this work.

The computer time reduction is another advantage derived from this approach.

## C A P Í T U L O    I

### INTRODUÇÃO

A interligação e operação em paralelo de companhias de energia elétrica adjacentes, vêm contribuindo sobremaneira para um melhor desempenho dos sistemas de energia elétrica dos pontos de vista técnico e econômico. Dentre as inúmeras vantagens advindas das interligações podem ser citadas:

- Nos períodos de emergência que podem advir de qualquer contingência como a perda de uma unidade geradora ou o desligamento de uma linha, companhias interligadas podem obter reservas de potência de suas vizinhas, crescendo assim a confiabilidade da operação do sistema e contribuindo para a continuidade do atendimento aos consumidores.

- Nos períodos normais de operação companhias vizinhas interligadas podem estabelecer contratos de transferência de potência para suprir variações na carga, ou deficiência de geração dentro de sua própria área, tirando vantagem do custo diferencial da energia nas respectivas áreas.

Engenheiros de planejamento de sistemas interligados vêm se empenhando na tarefa de estimar a máxima transferência simultânea de potência para uma companhia de suas vizinhas interligadas, capaz de ser conduzida pela rede de transmissão com segurança, tanto para um fornecimento contínuo como em situações de emergência. Existem fatores que vêm restringir tal transferência a um valor máximo admissível e dentre estes podem ser e numerados:

1. As reservas girantes disponíveis para transferência entre as companhias adjacentes interligadas.
2. A capacidade máxima da rede de transmissão, devido as máximas capacidades de carregamento de seus componentes.

Otimizar as transferências simultâneas de potência pa

ra uma companhia, portanto, é uma tarefa que vem a algum tempo despertando o interesse de engenheiros de planejamento e operação de sistemas elétricos interligados, empenhados numa melhor utilização dos recursos de geração disponíveis e no aumento da confiabilidade da operação do sistema.

Num sistema simples composto de duas companhias interligadas através de uma rede radial de transmissão, a quantidade máxima de potência a ser transferida pode ser facilmente avaliada fazendo-se a análise da capacidade da linha de interligação.

A atual expansão das redes de transmissão para abranger várias companhias adjacentes vem tornando esta tarefa muito mais complexa. Várias abordagens foram desenvolvidas. Em [1] é sugerido um método para cálculo dos níveis máximos de intercâmbio sujeito as limitações da rede de transmissão, fazendo a superposição do fluxo sobre um caso básico de fluxo de potência em c.a., através de fatores de distribuição. A obtenção destes fatores foi feita utilizando uma adaptação de um programa de curto-circuito. O inconveniente do método sugerido está em que, para cada linha ou barra de geração a ser testada, o processo utilizado na obtenção dos fatores requer um novo giro do programa de curto-circuito.

Em [2] é analisada inicialmente a aplicação de fatores de distribuição obtidos com a utilização de um programa de fluxo de carga em c.a., ao estudo da capacidade máxima de intercâmbio da rede de transmissão. Concluindo pela impraticabilidade do método, devido aos múltiplos casos de fluxo de carga em c.a. e ao trabalho manual de cálculo envolvido na determinação dos fatores de distribuição, ainda em [2] é sugerido a aplicação de uma extensão da técnica de simulação de contingências através da matriz de impedâncias de barra desenvolvida em [3] ao estudo da capacidade de intercâmbio. Aqui, os fatores de distribuição são obtidos de uma matriz reduzida de impedâncias de barra. Através do método, foi possível reduzir o tempo de computação requerido para o estudo, e uma precisão de 5% foi obtida nos resultados quando comparados com aqueles determinados pelo método de múltiplos fluxos de potência em c.a. mas, para cada contingência testada torna-se necessária uma modificação da ma

triz de impedâncias reduzida do sistema.

Em |4| é também feita uma extensão da técnica de avaliação de contingências através da matriz de impedâncias de barra desenvolvida em |3|, ao estudo da capacidade de intercâmbio do sistema de transmissão.

Em |5|, é apresentada uma técnica para avaliação da capacidade máxima de importação simultânea num sistema, onde são utilizados fatores de distribuição, obtidos da matriz de impedâncias reduzida do sistema e a técnica de otimização por programação linear. O procedimento desenvolvido, ao contrário daqueles apresentados em |2, 4| propiciou a determinação da capacidade máxima de intercâmbio simultâneo quando não somente duas mas várias companhias estão intercambiando potência.

No presente trabalho, a otimização do fluxo de intercâmbio em um sistema interligado é desenvolvida, utilizando-se na determinação do estado inicial de fluxos na rede de transmissão um modelo linearizado de fluxo de potência |6|.

Efeitos de contingências nas linhas da rede de transmissão são simulados usando-se os fatores de acoplamento de uma rede obtidos da matriz de reatância de barras |6, 7| e sem que se torne necessário sua modificação para simulação de contingências.

No processo de otimização a técnica usada foi a programação linear |8|. Em decorrência do procedimento seguido são obtidas importantes informações para a área de planejamento e operação de sistemas interligados, tais como:

- O máximo fluxo de intercâmbio admissível para importação em uma companhia de suas vizinhas interligadas que a rede de transmissão conduzirá com segurança, para várias configurações da rede.

- A distribuição ótima deste fluxo de importação entre as companhias vizinhas para atingir este máximo.

- Os elementos da rede de transmissão que restringem o fluxo de importação a este máximo admissível.

O Capítulo II apresenta a modelagem matemática utili

zada no trabalho. O Capítulo III é uma descrição dos critérios de planejamento adotados na pesquisa do máximo fluxo de intercâmbio. No Capítulo IV é apresentado um procedimento para a seleção das linhas que devem ser consideradas no estudo em cada critério de planejamento adotado. O Capítulo V apresenta a simulação digital do modelo do problema e aplicação desta a um sistema exemplo. No Capítulo VI é feita a apresentação, comparação e discussão dos resultados obtidos da aplicação da simulação ao sistema exemplo. No Capítulo VII estão colocadas as conclusões do trabalho.

## C A P Í T U L O    I I

### MODELAGEM MATEMÁTICA

#### 2.1 - Introdução

O presente capítulo apresenta a modelagem matemática adotada neste trabalho. O modelo de fluxo de potência é suposto linear e as variações nas transferências de potência entre linhas, bem como entre barras e linhas da rede de transmissão foram calculadas utilizando-se os fatores de acoplamento de uma rede. O modelo do problema de otimização do fluxo de intercâmbio foi formulado como um problema de programação linear com limites superiores nas variáveis.

#### 2.2 - Modelo de fluxo |6|

O fluxo de potência numa linha  $k$  entre as barras  $p$ - $q$  para a qual  $r_k \ll x_k$  pode ser aproximado conforme eq. (2-1):

$$F_k = \frac{V_p \cdot V_q}{x_k} \text{ sen } (\delta_p - \delta_q) \quad (2-1)$$

Supondo-se que  $V_p = V_q \sim 1$  pu e que a diferença angular  $(\delta_p - \delta_q)$  é pequena, o fluxo em  $k$  será dado pela Eq. (2-2):

$$F_k = (\delta_p - \delta_q) / x_k \quad (2-2)$$

A potência injetada numa barra  $p$  da Figura 2.1 será dada conforme Eq. (2-3):

$$S_p = \frac{1}{x_1} (\delta_p - \delta_1) + \frac{1}{x_k} (\delta_p - \delta_q) + \dots + \frac{1}{x_m} \delta_p + \frac{1}{x_l} (\delta_p - \delta_r) \quad (2-3)$$



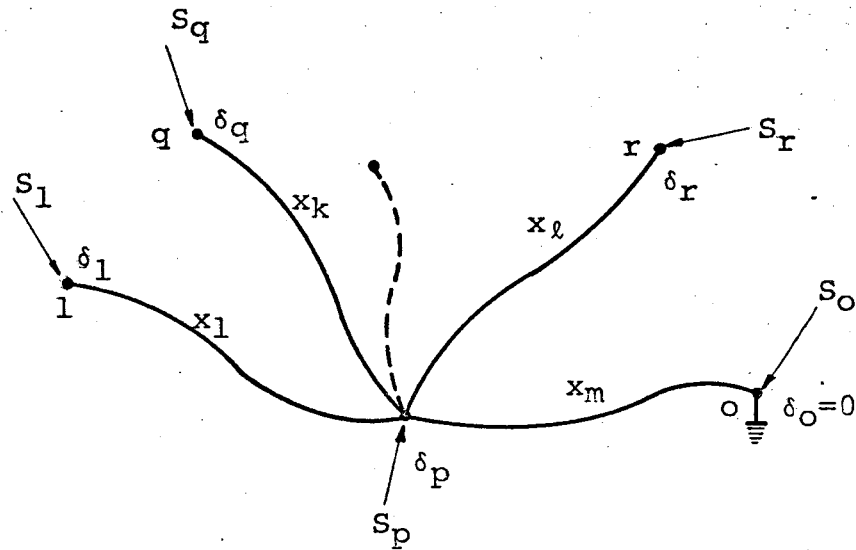


Figura 2.1 - Injeções  $S_i$  nas barras da rede de transmissão.

ou na forma matricial,

$$\underline{S} = \underline{B} \cdot \underline{\delta} \quad (2-4)$$

Portanto,

$$\underline{\delta} = \underline{B}^{-1} \underline{S} = \underline{X} \underline{S} \quad (2-5)$$

As equações (2-5), (2-2) são usadas na estimativa linear do fluxo de potência nas linhas da rede de transmissão da Figura 2.1.

### 2.3 - Modelo de acoplamento |6, 7|

Variações nas transferências de potência entre linhas e entre barras e linhas foram calculadas utilizando-se os fatores de acoplamento de uma rede, obtidos da matriz de reatância de barras. São de dois tipos estes fatores:

### 2.3.1 - Fator de acoplamento entre linha e barra

Se uma transferência unitária de potência é efetuada entre a barra  $p$  e a referência (Figura 2.2), a variação no ângulo entre duas outras barras  $r - s$  pode ser obtida com a aplicação da Eq. (2-5) e será dada pela Eq. (2-6):

$$\Delta\delta_{rs} = (X_{pr} - X_{ps}) \quad (2-6)$$

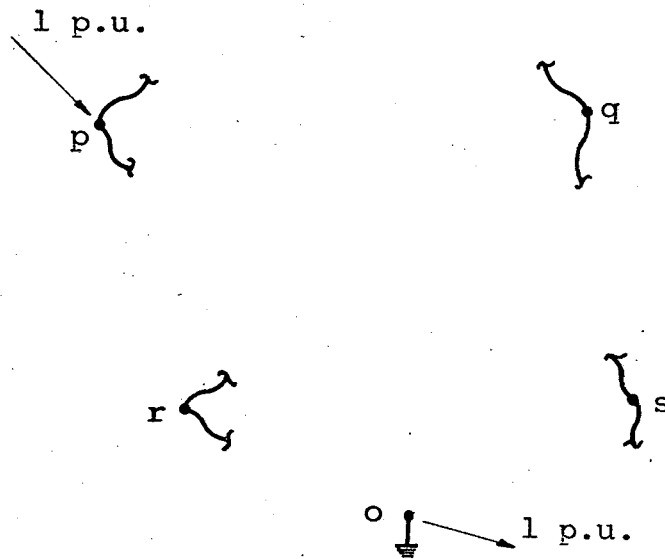


Figura 2.2 - Transferência unitária entre a barra  $p$  e a referência.

O incremento de fluxo numa linha  $k$  entre as barras  $r - s$  será dado conforme Eq. (2-7):

$$\Delta F_k = \Delta\delta_{rs}/x_k = (X_{pr} - X_{ps})/x_k \quad (2-7)$$

Se uma transferência  $I_j$  de potência unitária é efetuada entre as barras  $p-q$  (Figura 2.3), a variação no ângulo entre duas outras barras  $r-s$  será agora dado pela Eq. (2-8):

$$\Delta\delta_{rs} = (X_{pr} - X_{ps} - X_{qr} + X_{qs}) \quad (2-8)$$

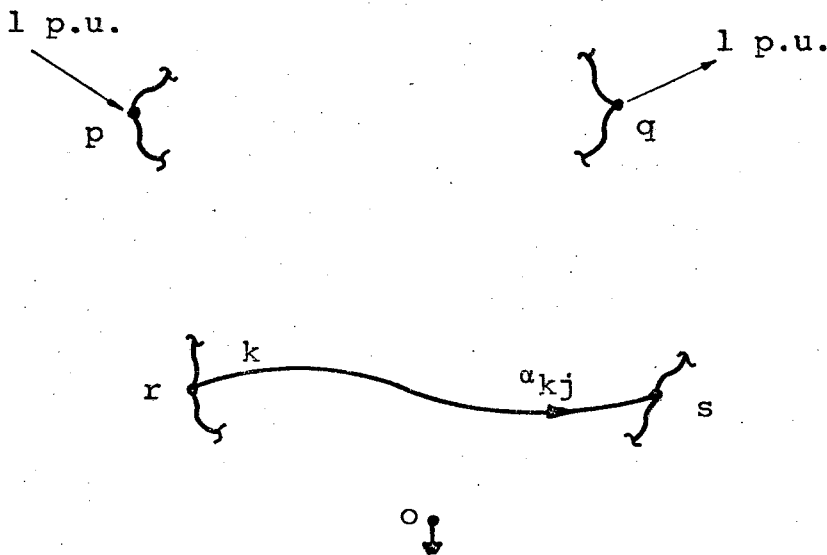


Figura 2.3 - Acoplamento entre a linha k e as barras p-q .

Se uma linha k conecta as barras r-s, seu incremento de fluxo devido à transferência  $I_j = 1$  pu entre as barras p-q será o fator de acoplamento da linha k entre as barras r-s, para a transferência j entre p-q, dado pela Eq. (2-9):

$$\alpha_{kj} = \Delta\delta_{rs}/x_k = (X_{pr} - X_{ps} - X_{qr} + X_{qs}) / x_k \quad (2-9)$$

Se a linha k conduz inicialmente um fluxo  $F_k^0$ , e uma transferência  $I_j$  de potência é efetuada entre as barras p-q, o fluxo em k será conforme a Eq. (2-10):

$$F_k = F_k^0 + \alpha_{kj} \cdot I_j \quad (2-10)$$

### 2.3.2 - Fator de acoplamento entre linhas

A interrupção de um fluxo unitário de potência numa linha l entre as barras p-q, ocasionará uma potência unitária fluindo de p para q através da rede resultante após a interrupção em l. Se uma transferência unitária  $I_j$  é efetuada

entre as barras p-q (Figura 2.4), o incremento no fluxo de potência em  $l$  será o fator  $\alpha_{lj}$ . No restante da rede o fluxo a ser distribuído será  $(1 - \alpha_{lj})$ .

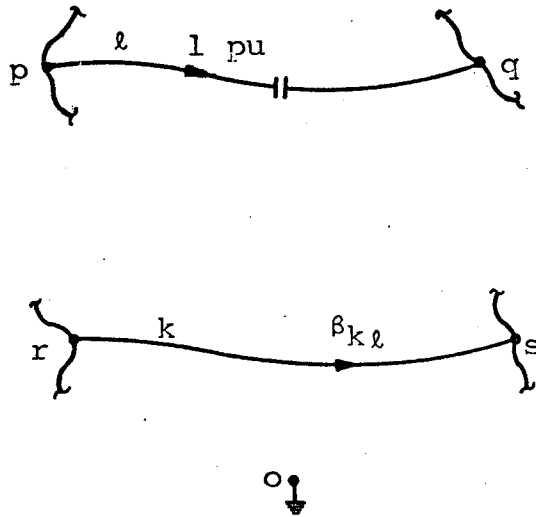


Figura 2.4 - Acoplamento entre as linhas  $k$ ,  $l$ .

A fim de que no restante da rede seja distribuído um fluxo unitário de potência, torna-se necessária uma transferência entre p-q com injeção em p dada por  $1/(1 - \alpha_{lj})$ . O incremento de fluxo numa linha  $k$  entre as barras r-s após a interrupção de um fluxo unitário em  $l$  entre p-q será o fator de acoplamento entre  $k$  e  $l$  e será dado conforme a Eq. (2-11):

$$\beta_{kl} = \frac{\alpha_{kj}}{(1 - \alpha_{lj})} = \frac{X_{pr} - X_{ps} - X_{qr} + X_{qs}}{x_k (1 - (X_{pp} + X_{qq} - 2X_{pq})/x_l)} \quad (2-11)$$

Se as linhas  $k$  e  $l$  conduzem inicialmente  $F_k^0$  e  $F_l^0$ , o fluxo em  $k$  após o desligamento de  $l$  será dado pela Eq. (2-12):

$$F_k = F_k^0 + \beta_{kl} F_l^0 \quad (2-12)$$

O fluxo numa linha  $k$  que conduz inicialmente  $F_k^0$  após o desligamento das linhas  $l$  e  $m$  com fluxos iniciais  $F_l^0$ ,  $F_m^0$  será dado conforme Eq. (2-13):

$$F_k = F_k^0 + \beta'_{kl} F_l^0 + \beta'_{km} F_m^0 \quad (2-13)$$

onde,

$$\beta'_k = \frac{\beta_{kl} + \beta_{kl} \beta_{lm}}{1 - \beta_{ml} \beta_{lm}} \quad (2-14)$$

$$\beta'_{km} = \frac{\beta_{km} + \beta_{kl} \beta_{lm}}{1 - \beta_{ml} \beta_{lm}} \quad (2-15)$$

#### 2.4 - Modelo do problema de otimização do fluxo de intercâmbio

A Figura 2.5 representa um sistema interligado no qual  $N$  companhias adjacentes estão intercambiando potência com a companhia  $(N+1)$  através da rede  $R$  de transmissão.

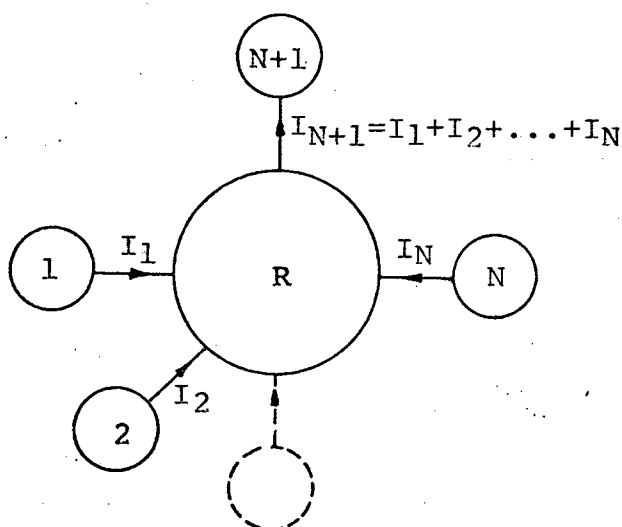


Figura 2.5 - Sistema de  $(N+1)$  companhias interligadas através da rede  $R$  de transmissão.

Estabeleçamos dois limites possíveis para carregamento das linhas da rede, quais sejam:

1. Limite nominal normal, sendo o valor limite da potência real que a linha conduz com segurança sem restrição de duração.
2. Limite de emergência de curta duração, sendo o valor limite de potência real que a linha conduz com segurança durante um intervalo de curta duração.

Estando a rede em seu estado normal de operação, isto é, com todos os seus componentes em serviço, o fluxo numa linha  $k$  responsável pelo transporte de uma parcela da potência total transferida, será restrito ao seu limite nominal normal de operação e será dado conforme inequação (2-16):

$$F_k^O + \sum_{j=1}^N \alpha_{kj} I_j \leq F_k^n \quad (2-16)$$

Portanto

$$\sum_{j=1}^N \alpha_{kj} I_j \leq F_k^n - F_k^O \quad (2-17)$$

Supondo-se agora que a linha  $\ell$ , também responsável pela condução de uma parcela da potência superposta, desligará, e que o fluxo da linha  $k$  deve ficar restrito ao seu limite nominal de emergência de curta duração, o fluxo na linha  $k$  será conforme inequação (2-18):

$$F_k^O + \sum_{j=1}^N \alpha_{kj} I_j + \beta_{k\ell} \left| F_\ell^O + \sum_{j=1}^N \alpha_{\ell j} I_j \right| \leq F_k^e \quad ; \quad (2-18)$$

Logo,

$$\sum_{j=1}^N (\alpha_{kj} + \beta_{k\ell} \alpha_{\ell j}) I_j \leq F_k^e - F_k^O - \beta_{k\ell} F_\ell^O \quad (2-19)$$

Supondo-se ainda que um próximo elemento  $m$  da rede

de transmissão será desligado, e impondo-se também que o fluxo em  $k$  não exceda seu limite de emergência de curta duração, o fluxo na linha  $k$  será restringido conforme inequação (2-20):

$$\sum_{j=1}^N (\alpha_{kj} + \beta'_{k\ell} \alpha_{\ell j} + \beta'_{km} \alpha_{mj}) I_j \leq \quad (2-20)$$

$$\leq F_k^e - F_k^o - \beta'_{k\ell} F_\ell^o - \beta'_{km} F_m^o .$$

Se considerarmos que as injeções  $I_j$  feitas pelas  $N$  companhias vizinhas não poderão exceder as suas reservas girantes disponíveis para transferência, e que nosso interesse é de maximizar a transferência para a companhia  $(N+1)$  da Figura 2.5, isto é,

$$\text{Max} \quad \sum_{i=1}^N I_i \quad , \quad (2-21)$$

temos o problema de otimização do fluxo de intercâmbio na forma dada pelas Equações (2-22) a (2-24):

$$\text{Maximizar} \quad \underline{U}^t \underline{I} \quad (2-22)$$

Sujeito a

$$\underline{A} \underline{I} \leq \underline{P} \quad (2-23)$$

e a

$$\underline{0} \leq \underline{I} \leq \underline{G} \quad (2-24)$$

Equações (2-22) a (2-24) constituem um problema de programação linear com limites superiores nas variáveis |8|.

Os elementos de  $\underline{A}$  e  $\underline{P}$  são formados conforme o critério de planejamento adotado. Se nenhum desligamento for imposto e os fluxos nas linhas da rede de transmissão estiverem restritos aos seus limites nominais normais, os elementos de  $\underline{A}$ ,  $\underline{P}$  assumirão a forma dada pela inequação (2-17). Se impusermos um desligamento simples e restringirmos os fluxos nas linhas aos seus limites de emergência de curta duração, os elementos de  $\underline{A}$  e  $\underline{P}$  serão conforme inequação (2-19). Para a imposição

de um desligamento duplo e restrição dos fluxos nas linhas aos seus limites de emergência de curta duração, A e P serão como na inequação (2-20).



### C A P Í T U L O    I I I

#### CRITÉRIOS DE PLANEJAMENTO ADOTADOS

##### 3.1 - Introdução

No presente capítulo, quatro diferentes critérios de planejamento são adotados na determinação do máximo fluxo de intercâmbio superposto na rede, partindo-se de duas configurações iniciais desta. São também colocados os elementos das matrizes A, P para cada critério de planejamento adotado.

##### 3.2 - Configurações iniciais da rede de transmissão

A otimização do fluxo de intercâmbio superposto na rede foi desenvolvida considerando-se duas configurações iniciais possíveis para esta:

1. Configuração normal
2. Configuração de contingência inicial.

Para a configuração normal a rede foi considerada operando em seu estado normal, isto é, com todas as linhas em serviço. Sob contingência inicial a rede foi suposta operando com alguma linha fora de serviço, como, por exemplo, sob manutenção.

##### 3.3 - Critérios de planejamento adotados

Como um primeiro critério adotado para pesquisa do máximo fluxo de intercâmbio superposto na rede, esta foi considerada operando em sua configuração inicial normal, e nenhum desligamento posterior foi imposto. Estabeleceu-se então que as linhas da rede podem ser carregadas no máximo até seus limites

nominais normais de operação.

No segundo critério adotado, a rede é considerada operando em sua configuração inicial normal, e impõe-se um desligamento simples. Estabeleceu-se então que os limites de carga para as linhas são agora os seus limites de emergência de curta duração.

O terceiro critério adotado considera a rede operando em sua configuração inicial normal, e impõe-se um desligamento duplo. Considerou-se também que os limites de carga das linhas são os seus limites de emergência de curta duração.

O quarto critério de planejamento adotado considera a rede operando em sua configuração de contingência inicial. Os limites de carga considerados para as linhas da rede são seus nominais normais de operação. Na Tabela 3.1 estão resumidos os critérios de planejamento adotados com os respectivos limites de carga estabelecidos para as linhas da rede de transmissão.

Tabela 3.1 - Limites de carga das linhas para os critérios de planejamento adotados.

CRITÉRIO DE PLANEJAMENTO	LIMITE DE CARGA DAS LINHAS DA REDE
Config. inicial normal s/desligamentos	$F_k^n$
Config. inicial normal c/deslig. simples	$F_k^e$
Config. inicial normal c/deslig. duplo	$F_k^e$
Config. de contingência inicial	$F_k^n$

### 3.4 - Matrizes $A$ , $P$ para os critérios adotados

#### 3.4.1 - Critério da configuração inicial normal sem desligamentos

Para este critério de planejamento, o limite de carregamento das linhas da rede (Tabela 3.1) está restrito aos seus

nominais normais de operação. Os elementos das matrizes  $\underline{A}$  e  $\underline{P}$  são obtidos da Eq. (2-17), e tem a forma dada pelas equações (3-1) e (3-2):

$$a_{ij} = \alpha_{kj} \quad (3-1)$$

$$P_i = F_k^n - F_k^o, \quad (3-2)$$

onde

$$i = 1, M$$

$$j = 1, N$$

$$k \in \mathcal{E}.$$

#### 3.4.2 - Critério da configuração inicial normal com desligamento simples

Supondo-se que uma linha  $l$  da rede será desligada, o limite de carga das linhas (Tabela 3.1) sendo restrito aos nominais de emergência de curta duração, os elementos de  $\underline{A}$  e  $\underline{P}$  são obtidos da Eq. (2-19) e são conforme Eqs. (3-3) e (3-4):

$$a_{ij} = \alpha_{kj} + \beta_{kl} \alpha_{lj} \quad (3-3)$$

$$P_i = F_k^e - F_k^o - \beta_{kl} F_l^o, \quad (3-4)$$

onde

$$i = 1, M$$

$$j = 1, N$$

$$k, l \in \mathcal{E} \text{ com } l \text{ fixo } \neq k.$$

#### 3.4.3 - Critério da configuração inicial normal com desligamento duplo.

Supondo-se o desligamento das linhas  $l$  e  $m$  e considerando o limite de carga das linhas da rede (Tabela 3.1) restrito aos seus nominais de emergência de curta duração, os ele

mentos de  $\underline{A}$ ,  $\underline{P}$  serão obtidos da Eq. (2-21) e terão a forma dada pelas Eqs. (3-5) e (3-6):

$$a_{ij} = \alpha_{kj} + \beta'_{kl} \alpha_{lj} + \beta'_{km} \alpha_{mj} \quad (3-5)$$

$$P_i = F_k^e - F_k^o - \beta'_{kl} F_\ell^o - \beta'_{km} F_m^o, \quad (3-6)$$

onde

$$\beta'_{kl} = \frac{\beta_{kl} + \beta_{kl} \beta_{lm}}{1 - \beta_{ml} \beta_{lm}} \quad (3-7)$$

$$\beta'_{km} = \frac{\beta_{km} + \beta_{kl} \beta_{lm}}{1 - \beta_{ml} \beta_{lm}} \quad (3-8)$$

$$i = 1, M$$

$$j = 1, N$$

$$k, \ell, m \in \mathcal{E}; \quad \ell, m \text{ fixos } \neq k.$$

#### 3.4.4 - Critério da configuração de contingência inicial

Supondo-se que alguma linha  $\ell$  já está inicialmente fora de serviço e que o limite de carga das linhas da rede é como na Tabela 3.1, restrito aos nominais normais de operação, os elementos de  $\underline{A}$ ,  $\underline{P}$  são obtidos da Eq. (2-19) com a troca de  $F_k^e$  por  $F_k^n$  conforme indicam as Eqs. (3-9) e (3-10):

$$a_{ij} = \alpha_{kj} + \beta_{kl} \alpha_{lj} \quad (3-9)$$

$$P_i = F_k^n - F_k^o - \beta_{kl} F_\ell^o, \quad (3-10)$$

onde

$$i = 1, M$$

$$j = 1, N$$

$$k, \ell \in \mathcal{E}; \quad \ell \text{ fixo } \neq k.$$

## C A P Í T U L O    I V

### SELEÇÃO DE LINHAS PARA O ESTUDO

#### 4.1 - Introdução

No Capítulo II, o modelo do problema de otimização do fluxo de intercâmbio num sistema interligado foi considerado como um problema de programação linear cuja dimensão é função do número de linhas da rede e do número de companhias interligadas àquela em estudo. A redução da dimensão do problema traz como consequência uma economia na utilização de tempo e memória do computador. Uma maneira de se efetuar esta redução seria utilizar as informações sobre o dia a dia passado do sistema, isto é, um operador experiente relacionaria previamente as linhas que seriam consideradas em cada critério de planejamento a ser pesquisado. Na ausência de tais informações, será desenvolvido no presente capítulo um procedimento para a seleção das linhas da rede consideradas no estudo, para cada critério de planejamento adotado.

#### 4.2 - Procedimento para a seleção de linhas

Para cada critério de planejamento adotado foi possível selecionar um certo número  $M$  de linhas da rede, as quais são mais restritivas ao aumento do fluxo de intercâmbio superposto, isto é, foi possível ordenar as linhas da rede de um modo tal que as primeiras  $M$  da ordenação tendam mais facilmente a violar os seus limites nominais de operação, quando o fluxo de intercâmbio superposto na rede crescer.

##### 4.2.1 - Linhas para o critério da configuração inicial normal sem desligamentos

Se cada companhia vizinha estiver injetando uma parce

la  $I_j$  do intercâmbio superposto na rede, o incremento de fluxo superposto devido as injeções  $I_j$ 's será dado pela Eq. (4-1):

$$\Delta I = \sum_{j=1}^N I_j \quad (4-1)$$

O fluxo em três linhas  $k, \ell, m \in E$  será conforme as Equações (4-2) a (4-4):

$$F_k = F_k^O + \sum_{j=1}^N \alpha_{kj} I_j \quad (4-2)$$

$$F_\ell = F_\ell^O + \sum_{j=1}^N \alpha_{\ell j} I_j \quad (4-3)$$

$$F_m = F_m^O + \sum_{j=1}^N \alpha_{mj} I_j \quad (4-4)$$

Se nenhum desligamento for imposto, o incremento máximo no intercâmbio superposto admissível para uma linha  $k$ , quando cada companhia vizinha estiver injetando 1 pu, pode ser obtido com a ajuda da Figura 4.1 e Eq. (4-5).

$$\Delta I = \frac{C F_k^n - F_k^O}{F_k - F_k^O} = \frac{C F_k^n - F_k^O}{\sum_{j=1}^N \alpha_{kj}} \quad (4-5)$$

onde,

$$C = \begin{cases} 1 & \text{se } F_k > F_k^O \\ -1 & \text{se } F_k < F_k^O \end{cases} .$$

As  $M$  linhas com  $M \in E$  que produzem os  $M$  menores valores para a Eq. (4-5) são aquelas que mais facilmente atingirão seus limites nominais normais, sendo portanto as  $M$  linhas mais restritivas ao aumento do fluxo de intercâmbio superposto na rede, quando nenhum desligamento é imposto.

Estas serão, portanto, as linhas selecionadas para gerar as restrições dadas pela Eq. (2-23) para o critério da configuração inicial normal sem desligamentos.

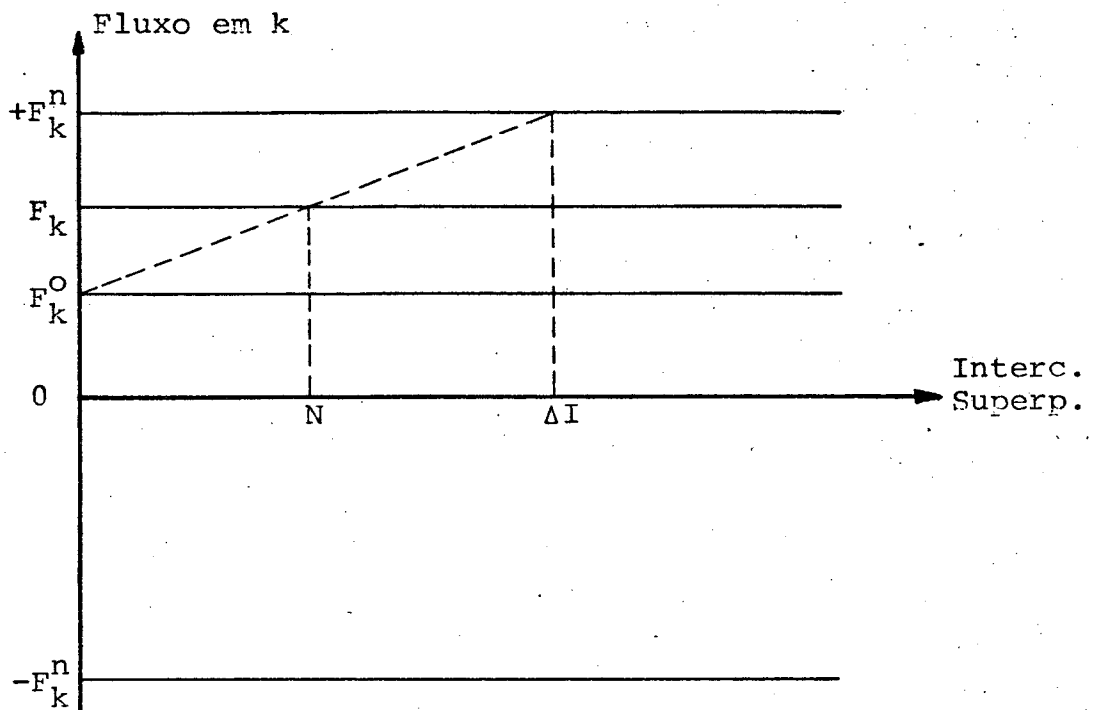


Figura 4.1 - Variação do fluxo na linha  $k$  quando cada companhia vizinha está injetando 1 pu na rede.

#### 4.2.2 - Linhas selecionadas para o critério da configuração inicial normal com desligamento simples

Supondo-se agora o desligamento da linha  $\ell$ , logo o fluxo assumido por  $k$  e  $m$  devido às injeções  $I_j$ 's e ao desligamento de  $\ell$  será dado pelas Eqs. (4-6) e (4.7):

$$F_k = F_k^0 + \beta_{k\ell} F_\ell^0 + \sum_{j=1}^N (\alpha_{kj} + \beta_{k\ell} \alpha_{\ell j}) I_j \quad (4-6)$$

$$F_m = F_m^0 + \beta_{m\ell} F_\ell^0 + \sum_{j=1}^N (\alpha_{mj} + \beta_{m\ell} \alpha_{\ell j}) I_j \quad (4-7)$$

Novamente considerando que cada companhia adjacente está injetando 1 pu, a variação do fluxo em  $k$  após o desligamento de  $\ell$ , devido a variação no fluxo de intercâmbio superposto na rede, pode ser obtido da Figura 4.1. O máximo incremento no fluxo de intercâmbio superposto admitido pela linha  $k$ , quan

do  $\ell$  está desligado é dado pela Eq. (4-8):

$$\Delta I = \frac{C F_k^n - F_k^0}{\beta_{k\ell} F_\ell^0 + \sum_{j=1}^N (\alpha_{kj} + \beta_{k\ell} \alpha_{\ell j})} \quad (4-8)$$

A linha  $\ell$  para a qual a Eq. (4-8) assume o menor valor é aquela cujo desligamento impõe a mais fácil sobrecarga na rede, quando o fluxo de intercâmbio superposto nesta aumentar. Para esta linha  $\ell$  assim selecionada, as M linhas que geram os menores valores da Eq. (4-8) são as mais restritivas ao aumento do fluxo de intercâmbio superposto quando  $\ell$  está desligada, e serão portanto as linhas que gerarão as restrições da Eq. (2-23).

#### 4.2.3 - Linhas selecionadas para o critério da configuração inicial normal com desligamento duplo.

Supondo-se agora o desligamento da linha m, o fluxo assumido por k devido às injeções  $I_j$ 's e aos desligamentos de  $\ell$  e m será dado pela Eq. (4-9):

$$F_k = F_k^0 + \sum_{j=1}^N \alpha_{kj} I_j + \beta_{k\ell} (F_\ell^0 + \sum_{j=1}^N \alpha_{\ell j} I_j) + \beta_{km} (F_m^0 + \sum_{j=1}^N \alpha_{mj} I_j) \quad (4-9)$$

A máxima variação no intercâmbio superposto admissível para uma linha k quando  $\ell$  e m estiverem desligadas e cada companhia vizinha estiver injetando 1 pu será obtido da Figura 4.1 e dada pela Eq. (4-10):

$$\Delta I = \frac{C F_k^n - F_k^0}{\beta_{k\ell} F_\ell^0 + \beta_{km} F_m^0 + \sum_{j=1}^N (\alpha_{kj} + \beta_{k\ell} \alpha_{\ell j} + \beta_{km} \alpha_{mj})} \quad (4-10)$$

A linha m para o qual a Eq. (4-10) assume o menor valor será aquela que, desligada simultaneamente com  $\ell$ , impõe



a mais fácil sobrecarga na rede. Para esta linha  $m$  assim selecionada, as  $M$  linhas que geram os  $M$  menores valores da Eq. (4-10) são as mais restritivas ao aumento do fluxo de intercâmbio superposto na rede quando  $l$  e  $m$  estão desligadas, sendo portanto aquelas que gerarão as restrições dadas pela Eq. (2-23).

#### 4.2.4 - Linhas selecionadas para o critério da configuração de contingência inicial

As linhas que comporão as restrições dadas pela Eq. (2-23) para este critério serão selecionadas conforme o subitem 4.2.2.

## C A P Í T U L O V

### SIMULAÇÃO DIGITAL E APLICAÇÃO A UM SISTEMA EXEMPLO

#### 5.1 - Introdução

Afim de implementar a abordagem proposta no trabalho para a otimização do fluxo de intercâmbio, foi desenvolvida a simulação digital do modelo e feita a sua aplicação a um sistema exemplo no qual é desejado otimizar o fluxo de intercâmbio.

No presente capítulo será dada ênfase a estes dois tópicos.

#### 5.2 - Simulação digital

A listagem do programa desenvolvido em linguagem Fortran para sistema IBM-1130 encontra-se no Apêndice I.

A estrutura geral da simulação é mostrada na Figura 5.1, sendo que o processo de otimização por programação linear utiliza o algoritmo simplex original com modificações para considerar limites superiores nas variáveis e degeneração inicial na base.

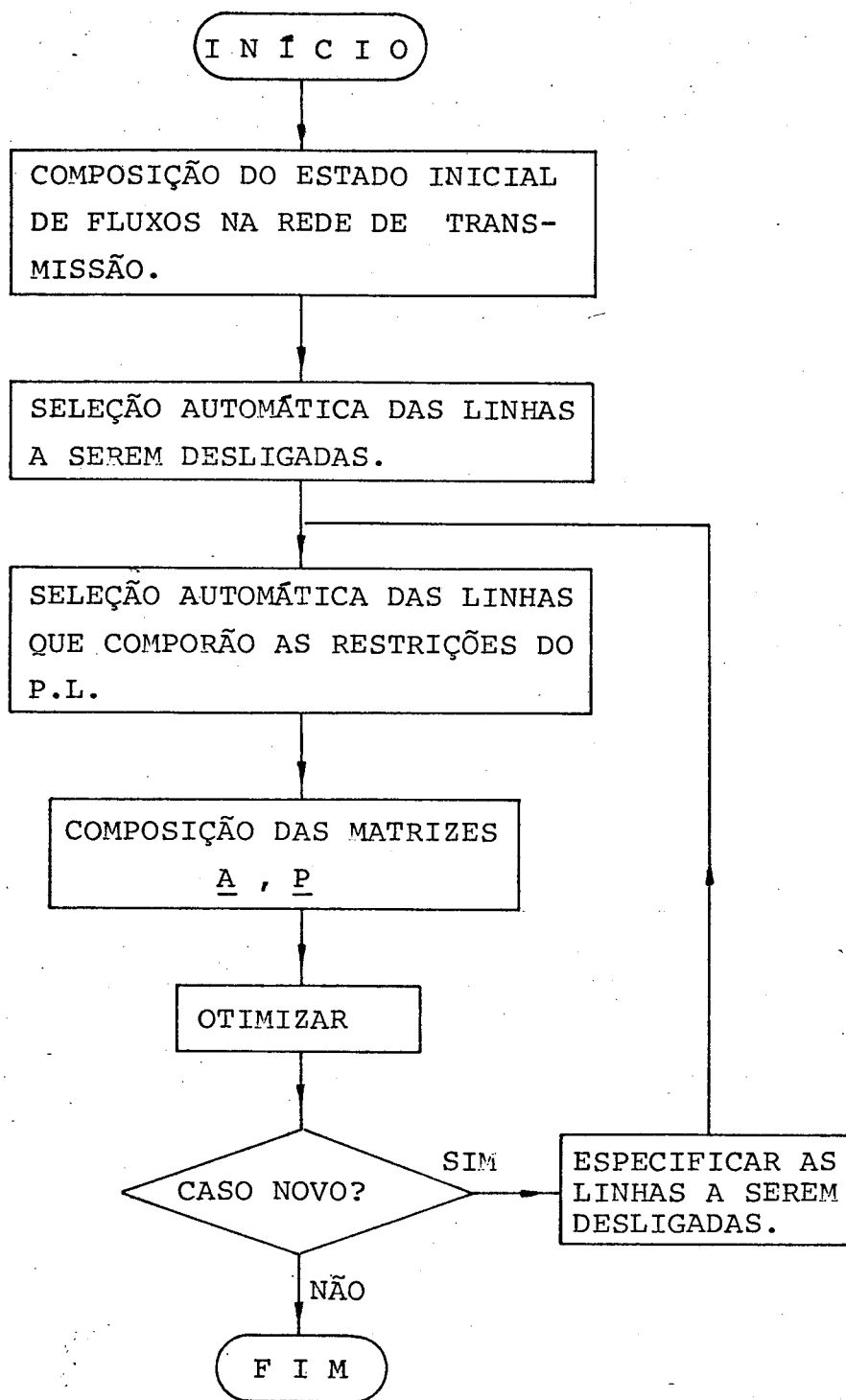


Figura 5.1 - Estrutura geral da simulação digital.

### 5.2.1 - Simplificações assumidas na simulação

Foram as seguintes as simplificações feitas para a simulação digital do modelo do problema de otimização do fluxo de intercâmbio:

1. As linhas da rede de transmissão foram representadas por suas reatâncias série.
2. As tensões nas barras da rede foram supostas constantes e iguais a 1 pu.
3. Cada barra da rede foi representada por sua geração e/ou carga ativa.
4. Transformadores, capacitores, etc., não foram considerados.

### 5.2.2 - Limitações do programa

O programa desenvolvido pode ser girado para um sistema interligado composto de cinco companhias interligadas àquele em estudo, sendo a rede de transmissão composta de no máximo 10 barras e 15 linhas. A barra número 1 será sempre a de referência.

Um máximo de sete linhas da rede podem ser selecionadas para compor as restrições do problema linear, em cada critério de planejamento a pesquisar.

Se em qualquer dos quatro critérios de planejamento, alguma linha da rede de transmissão já estiver inicialmente conduzindo um fluxo que viole o limite de carga imposto pelo critério, o programa não garante que esta linha seja aliviada de sua sobrecarga, isto é, não há garantia de que, quando feita a otimização do fluxo de intercâmbio, a carga da linha iguale o limite de carga admissível para o critério sob pesquisa.

### 5.2.3 - Recursos do programa

Desde que especificado nos dados de entrada, o programa

ma num caso básico otimiza o fluxo de intercâmbio para aqueles critérios de planejamento em que se está interessado, e para as condições mais críticas da rede, isto é, se o critério sob pesquisa considerar desligamento de componentes, serão desligados aqueles que mais facilmente sobrecarregariam a rede quando o fluxo de intercâmbio superposto nesta crescer. Os casos subsequentes podem ser de dois tipos:

- Especificação da linha para o desligamento simples;
- Especificação das linhas para o desligamento duplo.

Se apenas a linha para desligamento simples for especificada, e estivermos interessados em pesquisar o máximo fluxo para o critério que impõe desligamento duplo, o programa selecionará como segunda linha a ser desligada aquela que mais rapidamente sobrecarregaria a rede quando o fluxo superposto nesta crescer.

### 5.3 - Aplicação a um sistema exemplo

O sistema no qual é desejado otimizar-se o fluxo de intercâmbio compõe-se de quatro companhias interligadas através de uma rede de transmissão constituída de cinco barras e sete linhas (Figura 5.2). Para cada critério de planejamento pesquisado, foram selecionadas cinco linhas da rede de transmissão para compor as restrições da Eq. (2-23).

Nas Tabelas 5.1 a 5.3, estão colocados os dados do sistema exemplo.

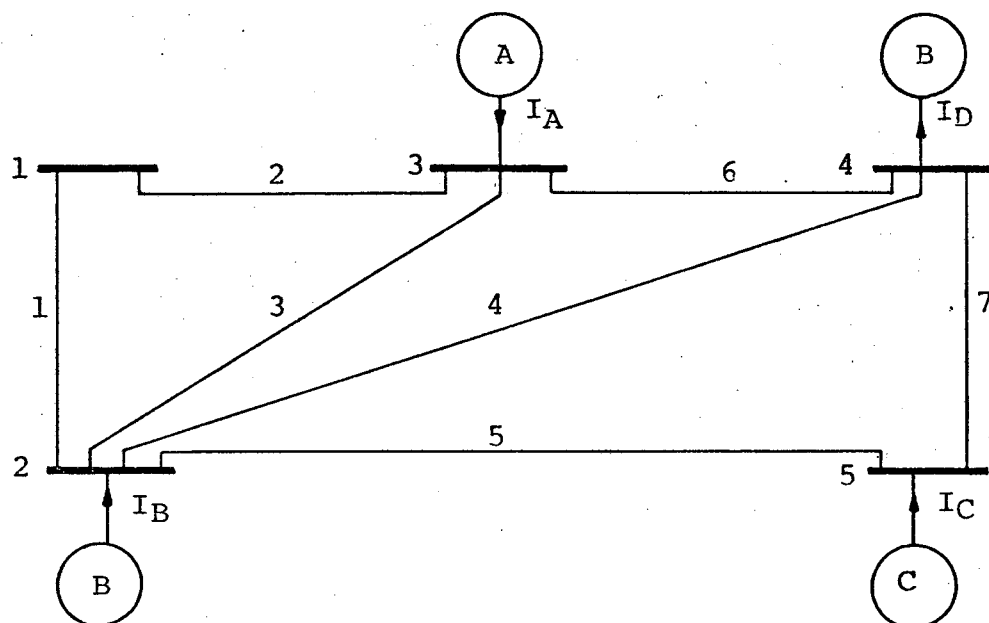


Figura 5.2 - Sistema interligado ABCD.

Tabela 5.1 - Dados das companhias adjacentes interligadas a Cia. D.

COMPANHIA (NOME)	BARRA DE IN- TERLIGAÇÃO	RESERVA GIRANTE DISPONÍ- VEL P/INTERCÂMBIO (MW)
A	3	90.0
B	2	95.0
C	5	100.0

Tabela 5.2 - Dados das barras do sistema exemplo.

NÚMERO	GERAÇÃO (MW)	CARGA (MW)
1	0.0	0.0
2	40.0	20.0
3	0.0	45.0
4	0.0	40.0
5	0.0	60.0

Barra 1 é a referência.

Tabela 5.3 - Dados das linhas da rede de transmissão.

Nº	BARRAS		REATÂNCIA (POR CENTO)	NOMINAL NORMAL (MW)	NOMINAL P/E MERGÊNCIA. (MW)
	INICIAL	FINAL			
1	1	2	6.0	100.0	100.0
2	1	3	24.0	100.0	105.0
3	2	3	18.0	75.0	98.0
4	2	4	18.0	60.0	80.0
5	2	5	12.0	120.0	125.0
6	3	4	3.0	80.0	100.0
7	4	5	24.0	50.0	60.0

## C A P Í T U L O   V I

### RESULTADOS OBTIDOS

#### 6.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação da abordagem ao sistema exemplo da Figura 5.2. Para cada critério de planejamento pesquisado os resultados obtidos são comparados com os valores estabelecidos de um caso básico de fluxo de carga em c.a., bem como é feita a discussão dos resultados.

#### 6.2 - Procedimento para comparação dos resultados

O procedimento adotado para comparação dos resultados obtidos constou do seguinte: Para cada critério de planejamento pesquisado, uma vez obtida a distribuição ótima do fluxo de intercâmbio entre as companhias vizinhas, bem como o novo estado de fluxos nas linhas da rede de transmissão, estabeleceu-se um caso básico de fluxo de carga em c.a. no qual as contribuições ótimas de cada companhia para o máximo fluxo superposto, foram adicionadas como incrementos de geração nas respectivas barras de interligações das companhias. Os valores de fluxos assim obtidos foram tomados como verdadeiros para cálculo dos erros cometidos. Posteriormente, e a fim de se verificar o funcionamento do critério de seleção de linhas apresentado no Capítulo IV, as gerações adicionais nas respectivas barras de interligações das companhias foram incrementadas e novos casos de fluxo de carga em c.a. foram estabelecidos, até que uma sobrecarga ocorresse na rede. Comparou-se então se o elemento em sobrecarga correspondia ao primeiro elemento da ordenação fornecida pelo critério de seleção de linhas. Finalmente, o programa de otimização do fluxo de intercâmbio foi novamente girado, ago















Tabela 6.9 - Fluxo atual nos cinco elementos da rede que são mais restritivos ao máximo fluxo de intercâmbio segundo o critério da configuração inicial normal com desligamento duplo.

LINHA	BARRAS		POTÊNCIA REAL (MW)	CARREGAMENTO ATUAL
	INICIAL	FINAL		
4	2	4	79.9	133.3
7	4	5	-49.9	99.9
3	2	3	-80.0	106.6
2	1	3	125.0	125.0 **
5	2	5	20.0	16.6

Carregamento atual = Percentagem do nominal normal

\*\* Linha carregada além do nominal de emergência

Tabela 6.10 - Distribuição ótima do máximo fluxo de intercâmbio p/Cia. D, segundo o critério da configuração de contingência inicial. Elemento sob contingência inicial Linha 6.

PROCEDÊNCIA (CIA.)	IMPORTAÇÃO (MW)	PERCENTAGEM DA RESERVA GIR. DISP.
A	-	-
B	-	-
C	44.9	44.9
TOTAL ADMISSÍVEL = 44.9 (MW)		

Tabela 6.11 - Fluxo atual nos cinco elementos da rede que são mais restritivos ao máximo fluxo de intercâmbio segundo o critério da configuração de contingência inicial.

LINHA	BARRAS		POTÊNCIA REAL (MW)	CARREGAMENTO ATUAL
	INICIAL	FINAL		
4	2	4	59.9	100.0
1	1	2	92.5	92.5
7	4	5	-24.9	49.9
3	2	3	12.4	16.6
5	2	5	40.0	33.3

Carregamento atual = Percentagem do nominal normal



## C A P Í T U L O VII

### CONCLUSÕES

No presente trabalho, para a abordagem do problema de otimização do fluxo de intercâmbio num sistema interligado, foram estabelecidas as seguintes suposições iniciais:

1. Linearidade na distribuição inicial de fluxos de potência ativa nas linhas da rede de transmissão.
2. Relacionamento linear nas transferências de potência ativa entre barras-linhas e entre linhas-linhas.

Em decorrência destas suposições, era esperada uma aproximação entre os resultados obtidos através da abordagem feita, e aqueles estabelecidos de um estudo de fluxo de carga em c.a., onde tais linearidades não são assumidas. A implementação da abordagem, a aplicação a um sistema exemplo e a posterior comparação dos resultados obtidos, com aqueles determinados por um estudo de fluxo de carga em c.a., mostrou que as aproximações obtidas para os diferentes critérios de planejamento pesquisados estão dentro de uma faixa plenamente tolerável na área de aplicação do trabalho, ou seja, no planejamento de sistemas de potência.

A obtenção do estado inicial de fluxos nas linhas da rede foi feita de uma maneira muito mais rápida, utilizando-se uma estimativa linear de fluxo de carga. Esta rapidez deve-se ao fato de que a estimativa linear, sendo um simples produto matricial, eliminou o processo iterativo do estudo em c.a.

Os efeitos de contingências nas linhas da rede de transmissão foram simulados de um modo mais rápido, usando-se o conceito de fatores de acoplamento de uma rede. Esta rapidez deve-se ao fato de que no procedimento usual, a passagem da rede de um estado de fluxos para outro devido a contingências em suas linhas, envolveria uma rotina de modificação da matriz original da rede. Entretanto, quando o novo estado inicial é calculado

a partir de um estado inicial conhecido, e com a aplicação dos fatores de acoplamento, não há necessidade de modificação na matriz original da rede.

A rotina de seleção de linhas envolvidas no estudo mostrou-se eficaz na obtenção de informações acerca do sistema, quando estas não são conhecidas do dia a dia passado deste. Esta rotina, reduzindo a dimensão do problema de programação linear, propicia uma economia de tempo e memória utilizada do computador.

Os erros absolutos que serão cometidos com a aplicação da abordagem, dependem de características do sistema sob estudo. Eles serão menores quanto mais acentuadas forem as relações  $r_k \ll x_k$  nas linhas da rede, e quanto mais carregadas estiverem as linhas da rede de transmissão.

Alguns possíveis melhoramentos que podem ser feitos numa extensão do trabalho, considerariam por exemplo:

- A inclusão de uma restrição de modo que o fluxo de intercâmbio superposto na rede satisfaça um nível máximo desejado para a importação. Aqui este nível máximo desejado para importação, seria estipulado como sendo o déficit de energia na área da companhia importadora. Com este procedimento o problema de otimização de fluxo de intercâmbio seria abordado de uma maneira mais realística e sua principal aplicação estaria no estabelecimento dos contratos iniciais de compra de energia com as companhias vizinhas.

- A atribuição de diferentes custos aos intercâmbios das companhias vizinhas interligadas. No presente trabalho os intercâmbios das companhias adjacentes tem custos idênticos. Entretanto, numa extensão do trabalho, os custos poderiam ser atribuídos de modo a levar em conta os diferentes preços da energia importada das companhias vizinhas, ou então de uma maneira tal que o fluxo total de intercâmbio fosse repartido em percentagens deste todo entre as companhias vizinhas.

- A inclusão de contingências na geração do sistema. No presente trabalho, somente foram consideradas contingências nas linhas da rede de transmissão. Entretanto, numa possível ex

tensão, poder-se-ia levar em conta contingências na geração do sistema. Isto propiciaria a realização de um estudo para a repartição ótima da demanda de geração do sistema, entre as unidadés geradoras disponíveis após a contingência, considerando-se os efeitos das restrições de carregamento impostas pelos compontes da rede de transmissão.

APÊNDICE I - PROGRAMA DIGITAL

SBR. AA01 (FORMA YBUS)

```

SUBROUTINE AA01 (NL,NB,SB,EB,X,B)
INTEGER SB(15),EB(15)
DIMENSION B(10,10),X(15)
DO 30 I = 1,NB
DO 30 J = 1,NB
B(I,J)=0.
30 CONTINUE
DO 40 I = 1,NL
L=SB(I)
M=EB(I)
B(L,L)=B(L,L)+1./X(I)
B(M,M)=B(M,M)+1./X(I)
B(L,M)=B(L,M)-1./X(I)
B(M,L)=B(M,L)-1./X(I)
40 CONTINUE
DO 50 I = 2,NB
DO 50 J = 2,NB
L=I-1
M=J-1
B(L,M)=B(I,J)
50 CONTINUE
RETURN
END

```

SBR. AA02 (INVERTE MATRIZ)

```

SUBROUTINE AA02 (NB,B)
INTEGER US
DIMENSION B(10,10),INDEX(10)
US=3
N=NB-1
IY1=0
IY2=0
DO 10 J = 1,N
10 INDEX(J)=0
DO 110 J = 1,N
L=N+1-J
IF(INDEX(L))100,20,100
20 IF(B(L,L))20,100,30
30 INDEX(L)=1
IY2=IY2+1
C-----MODIFICACAO DO ELEMENTO PIVOT
35 PIVO=B(L,L)
B(L,L)=-1./B(L,L)
C-----MODIFICACAO DA COLUNA PIVOT
DO 45 I = 1,N
IF(I=L)40,45,40
40 B(I,L)=-B(I,L)/PIVO
45 CONTINUE
C-----MODIFICAR ELEMENTOS FORA DA LINHA E COLUNA PIVO
DO 75 I1 = 1,N
IF(I1=L)50,75,50
50 DO 70 I2 = 1,N
IF(I2=L)60,70,60
60 B(I1,I2)=B(I1,I2)+B(I1,L)*B(L,I2)
70 CONTINUE
75 CONTINUE
C-----MODIFICAR LINHA PIVOT
DO 90 I = 1,N
IF(I=L)80,90,80
80 B(L,I)=-B(L,I)/PIVO
90 CONTINUE
100 IF(IY1)120,110,120
110 CONTINUE
C-----VERIFICAR SE TODOS A(L,L) FORAM PIVOTADOS
120 IF(N-IY2)130,190,130
130 DO 170 I = 1,N
IF(INDEX(I))170,140,170
140 IF(B(I,I))160,170,160
160 IY1=IY1+1
IY2=IY2+1
INDEX(I)=1
L=I
GO TO 35
170 CONTINUE
C-----MATRIZ SEM INVERSA
WRITE(US,180)
180 FORMAT(////,40X,'A MATRIZ E SINGULAR')
GO TO 250
C-----COMPOSICAO DA INVERSA
190 DO 200 I = 1,N
DO 200 J = 1,N
200 B(I,J)=-B(I,J)
C-----COMPOSICAO DA XBUS
DO 210 I = 1,N
L=N+1-I
DO 210 J = 1,N

```

```

M=N+1-J
210 B(L+1,M+1)=B(L,M)
DO 220 I = 1,N
  B(1,I)=0.
  B(I,1)=0.
220 CONTINUE
250 RETURN
END

```

## SBR. AA03 (LFDC)

```

SUBROUTINE AA03 (NL,NB,IB,SB,EB,B,PG,PC,X,P,FP)
INTEGER SB(15),EB(15)
DIMENSION B(10,10),FP(15),PG(10),PC(10),P(10),X(15),DELTA(10)
POT=0.
CAR=0.
DO 60 I = 1,NB
  POT=POT+PG(I)
  CAR=CAR+PC(I)
  P(I)=PG(I)-PC(I)
60 CONTINUE
IF (POT-CAR)70,80,80
70 POT=ABS(POT-CAR)
  P(IB)=-P(IB)-POT
C-----DETERMINACAO DOS ANGULOS DAS BARRAS
80 DO 90 I = 1,NB
  DELTA(I)=0.
  DO 100 I = 1,NB
    SOMA=0.
    DO 95 J = 1,NB
      SOMA=SOMA+B(I,J)*P(J)
95 CONTINUE
    DELTA(I)=SOMA
100 CONTINUE
C-----DETERMINACAO DOS FLUXOS NAS LINHAS
DO 110 I = 1,NL
  IP=SB(I)
  IQ=EB(I)
  FP(I)=(DELTA(IP)-DELTA(IQ))/X(I)
110 CONTINUE
RETURN
END

```

## SBR. AA04 (ACPL. BARRA-LINHA)

```

SUBROUTINE AA04 (EBI,SBI,SB,EB,NINT,NL,B,X,ALFA)
INTEGER SB(15),EB(15),SBI(5),P,S,EBI
DIMENSION ALFA(15,15),B(10,10),X(15)
J=EBI
DO 30 I1 = 1,NINT
  I=SBI(I1)
  DO 20 I2 = 1,NL
    R=SB(I2)
    S=EB(I2)
20 ALFA(I2,I1)=(B(R,I)-B(R,J)-B(S,I)+B(S,J))/X(I2)
30 CONTINUE
RETURN
END

```

## SBR. AA05 (ACPL. LINHA-LINHA)

```

SUBROUTINE AA05 (N1,N2,SB,EB,X,B,L1,L2,BETA)
INTEGER SB(15),EB(15),R,S
DIMENSION B(10,10),X(15),BETA(15,15),L1(15),L2(15)
DO 20 I1 = 1,N1
  K1=L1(I1)
  I=SB(K1)
  J=EB(K1)
  DO 20 I2 = 1,N2
    K2=L2(I2)
    IF (K1-K2)10,20,10
10 R=SB(K2)
  S=EB(K2)
  BB=X(K1)*(B(R,I)-B(R,J)-B(S,I)+B(S,J))
  CC=X(K2)*(X(K1)-(B(I,I)-B(J,I)-B(I,J)+B(J,J)))
  BETA(K2,K1)=BB/CC
20 CONTINUE
RETURN
END

```

## SBR. AA06 (SELECAO DE LINHAS)

```

SUBROUTINE AA06 (LN,NL,SB,EB,X,B,BETA,ALFA,M1C,M1D,
*M2D,M5D,PNOM,PNE,FP,LD,NLR,NINT,IZ1,IZ2,IZ3,IZ4,IY4)
INTEGER SB(15),EB(15),ORD(15)
DIMENSION B(10,10),X(15),FP(15)
DIMENSION M1C(10),M1D(10),M2D(10),M5D(10),BETA(15,15),LN(15)
DIMENSION PNOM(15),PNE(15),VF(15),LD(2),BD(15),ALFA(15,15)
I12=0
GO TO (5,60,140),IY4
5 CALL AA05 (NL,NL,SB,EB,X,B,LN,LN,BETA)
C-----PRIMEIRA LINHA A DESLIGAR
DO 50 J = 1,NL
DO 40 I = 1,NL
S1=0.
S2=0
IF(I-J)20,10,20
10 VF(I)=1.E+20
GO TO 40
20 DO 30 K = 1,NINT
S1=S1+ALFA(I,K)
30 S2=S2+ALFA(J,K)
S3=(BETA(I,J)*(FP(J)+S2)+S1)
IF(S3)33,10,32
32 T1=1
GO TO 35
33 T1=-1
35 VF(I)=(T1*PNOM(I)-FP(I))/S3
40 CONTINUE
CALL AA10 (1,NL,1,VF,ORD)
BD(J)=VF(1)
50 CONTINUE
CALL AA10 (1,NL,1,BD,ORD)
LD(1)=ORD(1)
C-----SEGUNDA LINHA A DESLIGAR
60 K1=LD(1)
DO 130 J = 1,NL
IF(J-K1)80,70,80
70 VF(J)=1.E+20
GO TO 130
80 F1=(1-BETA(K1,J)*BETA(J,K1))
DO 120 I = 1,NL
S1=0.
S2=0.
S3=0.
IF(I-K1)100,90,100
90 VF(I)=1.E+20
GO TO 120
100 DO 110 K2 = 1,NINT
S1=S1+ALFA(I,K2)
S2=S2+ALFA(K1,K2)
110 S3=S3+ALFA(J,K2)
F2=(BETA(I,J)+BETA(I,K1)*BETA(K1,J))/F1
F3=(BETA(I,K1)+BETA(I,J)*BETA(J,K1))/F1
S4=S1+F2*(FP(J)+S3)+F3*(FP(K1)+S2)
IF(S4)113,90,112
112 T1=1
GO TO 115
113 T1=-1
115 VF(I)=(T1*PNOM(I)-FP(I))/S4
120 CONTINUE
CALL AA10 (1,NL,1,VF,ORD)
BD(J)=VF(1)
130 CONTINUE
CALL AA10 (1,NL,1,BD,ORD)
LD(2)=ORD(1)
C-----RESTR. P/O CRIT. DA CONFIG. NOR. S/DESLIG.
140 IF(I21-1)190,150,190
150 DO 170 I = 1,NL
S1=0.
DO 160 J = 1,NINT
160 S1=S1+ALFA(I,J)
IF(S1)164,162,163
162 VF(I)=1.E+20
GO TO 170
163 T1=1
GO TO 165
164 T1=-1
165 VF(I)=(T1*PNOM(I)-FP(I))/S1
170 CONTINUE
CALL AA10 (1,NL,NLR,VF,ORD)
DO 180 I = 1,NLR
180 MSD(I)=ORD(1)
C-----REST. P/O CRIT. DA CONFIG. INIC. NORM. C/DESLG. SIMPLES
190 IF(I22-1)320,220,320
220 K=LD(1)
DO 290 I = 1,NL
S1=0.
S2=0.
IF(I-K)240,230,240
230 VF(I)=1.E+20

```

```

GO TO 290
240 DO 250 J = 1,NINT
S1=S1+ALFA(I,J)
250 S2=S2+ALFA(K,J)
S3=(BETA(I,K)*(FP(K)+S2)+S1)
IF(S3)254,230,252
252 T1=1
GO TO 255
254 T1=-1
255 VF(I)=(T1*PNOM(I)-FP(I))/S3
290 CONTINUE
CALL AA10(I,NL,NLR,VF,ORD)
IF(I)2)420,300,420
300 DO 310 I = 1,NLR
310 MID(I)=ORD(I)
C-----REST. P/O CRIT. DA CONFIG. INIC. NORM. C/DESL. DUPLO
320 IF(I23-1)410,330,410
330 K1=LD(I)
K2=LD(I2)
F1=(1-(BETA(K1,K2)*BETA(K2,K1)))
DO 390 I = 1,NL
IF(I-K1)350,340,350
340 VF(I)=1.E+20
GO TO 390
350 IF(I-K2)370,360,370
360 VF(I)=1.E+20
GO TO 390
370 S1=0.
S2=0
S3=0
F2=(BETA(I,K2)+BETA(I,K1)*BETA(K1,K2))/F1
F3=(BETA(I,K1)+BETA(I,K2)*BETA(K2,K1))/F1
DO 380 J = 1,NINT
S3=S3+ALFA(K2,J)
S2=S2+ALFA(K1,J)
380 S1=S1+ALFA(I,J)
S4=S1+F2*(FP(K2)+S3)+F3*(FP(K1)+S2)
IF(S4)383,340,382
382 T1=1
GO TO 385
383 T1=-1
385 VF(I)=(T1*PNOM(I)-FP(I))/S4
390 CONTINUE
CALL AA10 (I,NL,NLR,VF,ORD)
DO 400 I = 1,NLR
400 M2D(I)=ORD(I)
C-----REST. P/O CRIT. DA CONFIG. DE CONTING. INICIAL
410 IF(I24-1)1000,405,1000
405 I2=1
GO TO 220
420 DO 430 I = 1,NLR
430 M1C(I)=ORD(I)
1000 RETURN
END

```

SBR. AA07 (VARIÁVEL DEIXANDO A BASE)

```

SUBROUTINE AA07 (M,N,A,IVBC,IVBL,IS,ITIP,NIVEL,JCOM,ICOM,IFIM,IYY,
*IR,OUT)
INTEGER ORD(15),OUT
REAL NIVEL(5)
DIMENSION A(11,16),IJ(10),JI(10),Q1(15)
DIMENSION IVBL(10),IVBC(15),JCOM(15),ICOM(10)
K1=0
KK=M+N
IFIM=1
DO 10 I = 1,M
IJ(I)=0
10 JI(I)=0
DO 40 I = 1,M
IF(A(I,IS))40,40,20
20 K1=K1+1
Q1(K1)=A(I,KK+1)/A(I,IS)
JI(K1)=I
IF(Q1(K1))40,30,40
30 IJ(I)=1
40 CONTINUE
J=1
45 K2=0
DO 60 I = 1,M
IF(IJ(I)-1)60,50,60
50 K2=K2+1
IJ(K2)=I
60 CONTINUE
IF(K2)70,100,70
70 IF(K2-1)80,100,80
80 DO 90 I = 1,K2
L1=IJ(I)

```

```

90 Q1(I)=A(L1,J)/A(L1,IS)
   K1=K2
   GO TO 104
100 IF(K1-1)102,101,102
101 IR1=J(I)
   C1=Q1(I)
   GO TO 130
102 DO 103 I = 1,K1
103 IJ(I)=JI(I)
   GO TO 106
104 IF(K1-1)106,105,106
105 IR1=IJ(K1)
   C1=Q1(K1)
   GO TO 130
106 CALL AA10 (1,K1,2,Q1,ORD)
   L1=ORD(1)
   L2=ORD(2)
   IF(Q1(1)-Q1(2))110,120,110
110 C1=Q1(1)
   IR1=IJ(L1)
   GO TO 130
120 J=J+1
   IF(J-KK)80,80,125
125 IR1=0
130 GO TO (135,140),ITIP
135 IF(IR1)136,137,136
136 IYY=2
   IR=IR1
   OUT=IVBL(IR)
   IVBL(IR)=IS
   GO TO 360
137 IFIM=2
   GO TO 360
C-----PROBLEMA C/LIMITE SUPERIOR NAS VARIAVEIS
140 K1=0
   K2=0
   DO 170 I = 1,M
   IF(A(I,IS))150,170,170
150 K=IVBL(I)
   IF(IVBC(K))160,170,160
160 K1=K1+1
   Q1(K1)=(A(I,KK+1)-NIVEL(K))/A(I,IS)
   IJ(K1)=I
   K2=1
170 CONTINUE
   IF(K2)180,190,180
180 CALL AA10 (1,K1,1,Q1,ORD)
   L1=ORD(1)
   C2=Q1(1)
   IR2=IJ(L1)
   GO TO 200
190 IR2=0
C-----TESTE P/EXISTENCIA DA OTIMO
200 K1=0
   IF(IR1)210,220,210
210 K1=K1+1
   Q1(K1)=C1
   IJ(K1)=IR1
220 IF(IR2)230,240,230
230 K1=K1+1
   Q1(K1)=C2
   IJ(K1)=IR2
240 IF(IVBC(IS))250,260,250
250 K1=K1+1
   Q1(K1)=NIVEL(IS)
260 IF(K1)280,270,280
270 IFIM=2
   GO TO 350
280 IF(K1-1)286,285,286
285 ORD(1)=K1
   GO TO 287
286 CALL AA10 (1,K1,1,Q1,ORD)
287 L1=ORD(1)
   GO TO (330,300,290),L1
290 IYY=3
   IF(JCOM(IS))294,292,294
292 JCOM(IS)=1
   GO TO 360
294 JCCM(IS)=0
   GO TO 360
300 IF(IR1)310,290,310
310 IF(IR2)320,290,320
320 IYY=1
   IR=IJ(L1)
   OUT=IVBL(IR)
   IVBL(IR)=IS
   IF(IVBC(OUT))321,323,321
321 IF(JCOM(OUT))323,322,323
322 JCOM(OUT)=1
   GO TO 324

```



```

323 JCOM(OUT)=0
324 IF(IVBC(IS))325,327,325
325 IF(ICOM(IR))327,326,327
326 ICOM(IR)=1
   GO TO 360
327 ICOM(IR)=0
   GO TO 360
330 IF(IR1)340,350,340
340 IYY=2
   IR=IJ(L1)
   OUT=IVBL(IR)
   IVBL(IR)=IS
   IF(JCOM(IS))346,345,346
345 ICOM(IR)=0
   GO TO 360
346 ICOM(IR)=1
   GO TO 360
350 IF(IR2)320,290,320
360 RETURN
   END

```

SBR. AA08 (MATRIZ DA PRG.LINEAR)

```

SUBROUTINE AA08 (IY1,IY2,IY3,A,M,N,NINT,NLR,LR,LD,
*PNOM,PNE,ALFA,BETA,FP,NL,RV,ITR)
INTEGER RV(10)
DIMENSION A(11,16),ALFA(15,15),BETA(15,15)
DIMENSION FP(15),LD(2),LR(10)
DIMENSION PNOM(15),PNE(15)
N=NINT
M=NLR
KK=M+N
GO TO (10,40,70,100),IY2
C-----CRIT. DA CONFIG. INICIAL NORMAL S/DESLIG.
10 DO 30 I = 1,M
   K=LR(I)
   DO 20 J = 1,N
   20 A(I,J)=ALFA(K,J)
   30 A(I,KK+1)=PNOM(K)-FP(K)
   GO TO 160
C-----CRIT. DA CONFIG. INICIAL NORMAL C/DESLIG. SIMPLES
40 L1=LD(1)
   DO 60 I = 1,NLR
   K=LR(I)
   DO 50 J = 1,N
   50 A(I,J)=ALFA(K,J)+BETA(K,L1)*ALFA(L1,J)
   60 A(I,KK+1)=PNE(K)-FP(K)-BETA(K,L1)*FP(L1)
   GO TO 160
C-----CRIT. DA CONFIG. INICIAL NORMAL C/DESLIG. DUPL0
70 L1=LD(1)
   L2=LD(2)
   F1=(1-BETA(L1,L2)*BETA(L2,L1))
   DO 90 I = 1,M
   K=LR(I)
   F2=(BETA(K,L2)+BETA(K,L1)*BETA(L1,L2))/F1
   F3=(BETA(K,L1)+BETA(K,L2)*BETA(L2,L1))/F1
   DO 80 J = 1,N
   80 A(I,J)=ALFA(K,J)+F2*ALFA(L2,J)+F3*ALFA(L1,J)
   90 A(I,KK+1)=PNE(K)-FP(K)-F2*FP(L2)-F3*FP(L1)
   GO TO 160
C-----CRIT. DA CONFIG. DE CONTINGENCIA INICIAL
100 L1=LD(1)
   DO 120 I = 1,NLR
   K=LR(I)
   F1=FP(K)+BETA(K,L1)*FP(L1)
   DO 110 J = 1,N
   110 A(I,J)=ALFA(K,J)+BETA(K,L1)*ALFA(L1,J)
   120 A(I,KK+1)=PNOM(K)-F1
C-----TESTEP/VIOLAR RESTRICOES
160 NRV=0
   DO 270 I = 1,M
   RV(I)=0
   IF(A(I,KK+1))170,270,270
170 A(I,KK+1)=0.
   J1=0
   J2=0
   K1=0
   DO 200 J = 1,N
   IF(A(I,J))180,200,190
180 J1=J1+1
   K1=K1+1
   GO TO 200
190 J2=J2+1
   K1=K1+1

```

```

200 CONTINUE
    IF(J1)220,210,220
210 RV(I)=1
    GO TO 240
220 IF(J2)240,230,240
230 RV(I)=1
C-----RESTRICOES A SEREM VIOLADAS
240 IF(RV(I))250,270,250
250 NRV=NRV+1
270 CONTINUE
C-----TESTE P/SOLUCAO TRIVIAL
    IF(NRV)290,280,290
280 ITR=1
    GO TO 370
290 IF(NRV-M)310,300,310
300 ITR=2
    GO TO 370
C-----SOLUCAO C/RESTRICOES VIOLADAS
310 K1=0
    K2=M-NRV
    K3=K2+N
    DO 360 I = 1,K2
320 IF(RV(K1+1))330,340,330
330 K1=K1+1
    GO TO 320
340 I1=K1+1
    K1=K1+1
    DO 350 J = 1,N
350 A(I,J)=A(I1,J)
    A(I,K3+1)=A(I1,KK+1)
360 CONTINUE
    M=K2
    ITR=1
370 RETURN
    END

```

## SBR: AA09 (MODIFICA MATRIZ DO PGR.LINEAR)

```

SUBROUTINE AA09 (M,N,A,NIVEL,IR,IS,IVBL,IYY,OUT,INT,JCOM,ICOM)
REAL NIVEL(5),INT(15)
INTEGER OUT
DIMENSION A(11,16),IVBL(10),JCOM(15),ICOM(10)
KK=M+N
JJ=KK+1
II=M+1
GO TO (10,40,130),IYY
10 A(IR,KK+1)=NIVEL(OUT)-A(IR,KK+1)
DO 30 J = 1,KK
    IF(J-OUT)20,30,20
20 A(IR,J)=-A(IR,J)
30 CONTINUE
40 PIVO=A(IR,IS)
DO 70 I = 1,II
    L1=II+1-I
    IF(L1-IR)50,70,50
50 DO 60 J = 1,JJ
    L=JJ+1-J
    IF(L-IS)55,60,55
55 A(L,L)=A(L,L)-(A(IR,L)*A(L,IS))/PIVO
60 CONTINUE
70 CONTINUE
DO 80 J = 1,JJ
80 A(IR,J)=A(IR,J)/PIVO
DO 100 I = 1,II
    IF(I-IR)90,100,90
90 A(I,IS)=0.
100 CONTINUE
GO TO 150
130 DO 140 I = 1,II
    A(I,KK+1)=A(I,KK+1)-NIVEL(IS)*A(I,IS)
140 A(I,IS)=-A(I,IS)
C-----ATUALIZACAO DOS VALORES DAS VARIAVEIS
150 DO 240 J = 1,KK
    K1=0
    DO 170 I = 1,M
    IF(IVBL(I)-J)170,160,170
160 K1=1
    I1=1
170 CONTINUE
    IF(K1)210,180,210
180 IF(JCOM(J))200,190,200
190 INT(J)=0.
    GO TO 240
200 INT(J)=NIVEL(J)
    GO TO 240
210 IF(ICOM(I1))230,220,230
220 INT(J)=A(I1,KK+1)
    GO TO 240

```

```

230 INT(J)=NIVEL(J)-A(I1,KK+1)
240 CONTINUE
250 RETURN
END

```

## SBR. AA10 (ORDENA VALORES)

```

SUBROUTINE AA10 (K1,N1,M1,VF,ORD)
INTEGER ORD(15)
DIMENSION VF(15)
DO 5 I = 1,N1
5 ORD(I)=I
10 K=0
M=M1-1
DO 50 I = 1,M
GO TO (20,30),KI
20 IF(VF(I)-VF(I+1))50,50,40
30 IF(VF(I)-VF(I+1))40,40,50
40 A=VF(I)
VF(I)=VF(I+1)
VF(I+1)=A
J=ORD(I)
ORD(I)=ORD(I+1)
ORD(I+1)=J
K=1
50 CONTINUE
IF(K)10,60,10
60 IF(N1-M1)70,150,70
70 N2=N1-1
DO 140 I = M1,N2
J1=0
DO 100 J = 1,M1
L=M1-J+1
GO TO (80,90),KI
80 IF(VF(I+1)-VF(L))95,110,110
90 IF(VF(I+1)-VF(L))110,95,95
95 J1=J1+1
100 CONTINUE
110 IF(J1)120,140,120
120 IF(J1-1)125,135,125
125 N=J1-1
DO 130 I1 = 1,N
M=M1-I1+1
I2=ORD(M-1)
A=VF(M-1)
ORD(M)=I2
130 VF(M)=A
135 M=M1-J1+1
ORD(M)=I+1
VF(M)=VF(I+1)
140 CONTINUE
150 RETURN
END

```

## SBR. AA11 (OTIMIZA POR PGR.LINEAR)

```

SUBROUTINE AA11 (M,N,A,INT,NIVEL,IFIM)
INTEGER GRD(15),OUT
REAL NIVEL(5),INT(15)
DIMENSION A(11,16),IVBC(15),IVBL(10),VF(15),IJ(10)
DIMENSION JCOM(15),ICOM(10)
II=M+1
KK=M+N
JJ=N+1
DO 1210 I = 1,M
ICOM(I)=0
IVBL(I)=N+I
K=IVBL(I)
INT(K)=A(I,KK+1)
DO 1210 J = JJ,KK
IF(I-(J-N))1200,1190,1200
1190 A(I,J)=1.
GO TO 1210
1200 A(I,J)=0.
1210 CONTINUE
C-----LIMITES SUPERIORES DAS VARIAVEIS
K1=0
DO 1240 J = 1,N
INT(J)=0.
A(M+1,J)=-1
IF(NIVEL(J))1230,1220,1230
1220 K1=K1+1
IVBC(J)=0
GO TO 1240
1230 IVBC(J)=1
1240 CONTINUE

```

```

IF(K1-N1)1260,1250,1260
1250 ITIP=1
GO TO 1270
1260 ITIP=2
1270 DO 1280 J = JJ, KK
1280 IVBC(J)=0
C-----CCEF. FUNC. OBJ.
II=KK+1
DO 1290 J = JJ, II.
1290 A(M+1, J)=0.
DO 1300 J = 1, KK
1300 JCOM(J)=0
1310 II=M+1
JJ=KK+1
K1=0
DO 1350 J = 1, KK
K2=0
DO 1330 I = 1, M
IF(IVBL(I)-J)1330,1320,1330
1320 K2=1
1330 CONTINUE
IF(K2)1350,1340,1350
1340 K1=K1+1
VF(K1)=A(II, J)
IJ(K1)=J
1350 CONTINUE
CALL AA10 (1, K1, 1, VF, ORD)
K=ORD(1)
L1=IJ(K)
IF(VF(1))1360,1380,1380
CALL AA07(M, N, A, IVBC, IVBL, IS, ITIP, NIVEL, JCOM, ICOM, IFIM, IYY, IR, OUT)
GO TO (1370, 1380), IFIM
1370 CALL AA09 (M, N, A, NIVEL, IR, IS, IVBL, IYY, OUT, INT, JCOM, ICOM)
GO TO 1310
1380 RETURN
END

```

## SBR. AA12 (ATUALIZA FLUXOS)

```

SUBROUTINE AA12 (ALFA, BETA, FP, LR, INT, NLR, NINT, IY2, LD, FR)
REAL INT(15)
DIMENSION ALFA(15, 15), BETA(15, 15), FP(15), LR(10), FR(10), LD(2)
N=NINT
GO TO (10, 40, 70, 40), IY2
10 DO 30 I = 1, NLR
K=LR(I)
S1=0.
DO 20 J = 1, N
20 S1=S1+ALFA(K, J)*INT(J)
30 FR(I)=FP(K)+S1
GO TO 100
40 L1=LD(1)
DO 60 I = 1, NLR
K=LR(I)
S1=0.
DO 50 J = 1, N
50 S1=S1+(ALFA(K, J)+BETA(K, L1)*ALFA(L1, J))*INT(J)
60 FR(I)=FP(K)+BETA(K, L1)*FP(L1)+S1
GO TO 100
70 L1=LD(1)
L2=LD(2)
F1=(1-BETA(L1, L2)*BETA(L2, L1))
DO 90 I = 1, NLR
K=LR(I)
S1=0.
S2=0.
S3=0.
F2=(BETA(K, L2)+BETA(K, L1)*BETA(L1, L2))/F1
F3=(BETA(K, L1)+BETA(K, L2)*BETA(L2, L1))/F1
DO 80 J = 1, N
S1=S1+ALFA(K, J)*INT(J)
S2=S2+ALFA(L1, J)*INT(J)
80 S3=S3+ALFA(L2, J)*INT(J)
90 FR(I)=FP(K)+S1+F2*(FP(L2)+S3)+F3*(FP(L1)+S2)
100 RETURN
END

```

## PGR. OTFLX (OTIMIZA FLUXO DE INTERC.)

```

INTEGER BN(10),SBI(15),EBI(15),SBI(5),UE,US,EBI,RV(10)
REAL NIVEL(5),NSIST(5,3),INT(15)
DIMENSION B(10,10),FP(15),PG(10),PC(10),PNOM(15),FR(10)
DIMENSION PNE(15),LN(15),X(15),A(11,16),LV(10)
DIMENSION BETA(15,15),ALFA(15,15),P(10),LR(10),LD(2)
DIMENSION XNOM1(5),XNOM2(5),MSD(10),MID(10),M2D(10),MIC(10)
US=3
UE=2
IY3=0
IY4=1
C-----NOME SISTEMA - SLACK-BUS - BARRA DA INTERCAMBIO
READ(UE,1000)IMP,(XNOM1(I),I=1,3),(XNOM2(I),I=1,3),EBI,IB,NLP,NLR
I=1
C-----DADOS DO INTERCAMBIO
10 READ(UE,1002)IF,INT(I),SBI(I),NIVEL(I),(NSIST(I,J),J=1,3)
IF(IF)40,30,40
30 I=I+1
GO TO 10
40 NINT=I
C-----DADOS DA REDE DE TRANSM.
I=1
50 READ(UE,1004)IF,LN(I),SB(I),EB(I),X(I),PNOM(I),PNE(I)
IF(IF)80,70,80
70 I=I+1
GO TO 50
80 NL=I
I=1
90 READ(UE,1006)IF,BN(I),PG(I),PC(I)
IF(IF)120,110,120
110 I=I+1
GO TO 90
120 NB=I
C-----CRITERIOS DE PLANEJAMENTO ADOTADOS
READ(UE,1008)IZ1,IZ2,IZ3,IZ4
IY1=IZ1+IZ2+IZ3+IZ4
WRITE(US,1010)(XNOM1(I),I=1,3),(XNOM2(I),I=1,3)
WRITE(US,1012)
IF(IMP)115,140,115
115 WRITE(US,1014)
DO 125 I = 1,NINT
125 WRITE(US,1016)(NSIST(I,J),J=1,3),SBI(I),NIVEL(I)
WRITE(US,1018)
WRITE(US,1020)
DO 130 I = 1,NB
130 WRITE(US,1022)BN(I),PG(I),PC(I)
WRITE(US,1024)IB
WRITE(US,1026)
WRITE(US,1030)
DO 135 I = 1,NL
135 WRITE(US,1031)LN(I),SB(I),EB(I),X(I),PNOM(I),PNE(I)
WRITE(US,1032)
C-----CONVERSAO PARA VALORES EM PU
140 DO 145 I = 1,NINT
145 NIVEL(I)=NIVEL(I)/100
DO 170 I = 1,NL
X(I)=X(I)/100.
PNOM(I)=PNOM(I)/100
IF(PNE(I))160,150,160
150 PNE(I)=1.3*PNOM(I)
GO TO 170
160 PNE(I)=PNE(I)/100
170 CONTINUE
DO 175 I = 1,NB
PG(I)=PG(I)/100
175 PC(I)=PC(I)/100
C-----CONFIGURACAO INICIAL DO SISTEMA
CALL AA01 (NL,NB,SB,EB,X,B)
CALL AA02 (NB,B)
CALL AA03 (NL,NB,IB,SB,EB,B,PG,PC,X,P,FP)
C-----SELECAO DAS LINHAS PARA O ESTUDO
CALL AA04 (EBI,SBI,SB,EB,NINT,NL,B,X,ALFA)
178 CALL AA06 (LN,NL,SB,EB,X,B,BETA,ALFA,MIC,MID,M2D,MSD,
*PNOM,PNE,FP,LD,NLR,NINT,IZ1,IZ2,IZ3,IZ4,IY4)
C-----IMPRESSAO DO ESTADO INICIAL
IF(IMP)180,210,180
180 WRITE(US,1033)
IT=0
DO 195 I = 1,NL
F1=FP(I)*100
E1=ABS(FP(I))
E2=(1-(PNOM(I)-E1)/PNOM(I))*100
IF(PNE(I)-E1)190,190,185
185 WRITE(US,1034)LN(I),SBI(I),EB(I),F1,E2
GO TO 195
190 IT=1
WRITE(US,1036)LN(I),SB(I),EB(I),F1,E2
195 CONTINUE
WRITE(US,1038)
IF(IT)200,205,200

```

```

200 WRITE(US,1040)
205 E1=P(18)*100
    WRITE(US,1041)E1
210 IF(I21-1)230,220,230
220 IY3=IY3+1
    IY2=1
    DO 225 I = 1,NLR
225 LR(I)=MSD(I)
    GO TO 310
230 IF(I22-1)250,240,250
240 IY3=IY3+1
    IY2=2
    DO 245 I = 1,NLR
245 LR(I)=MID(I)
    GO TO 310
250 IF(I23-1)270,260,270
260 IY3=IY3+1
    IY2=3
    DO 265 I = 1,NLR
265 LR(I)=M2D(I)
    GO TO 310
270 IF(I24-1)550,280,550
280 IY3=IY3+1
    IY2=4
    DO 285 I = 1,NLR
285 LR(I)=M1C(I)
310 CALL AA08 (IY1,IY2,IY3,A,M,N,NINT,NLR,LR,LD,PNOM,PNE,
*ALFA,BETA,FP,NL,RV,ITR)
    GO TO (315,320),ITR
315 CALL AA11 (M,N,A,INT,NIVEL,IFIM)
320 WRITE(US,1042)(XNOM2(I),I=1,3)
    GO TO (340,350,360,370),IY2
340 WRITE(US,1043)
    GO TO 390
350 WRITE(US,1044)LD(1)
    GO TO 390
360 WRITE(US,1046)LD(1),LD(2)
    GO TO 390
370 WRITE(US,1048)LD(1)
390 GO TO (395,480),ITR
395 GO TO (400,490),IFIM
400 WRITE(US,1052)
    DO 430 I = 1,NINT
    E1=INT(I)*100
    F1=E1/NIVEL(I)
    IF(INT(I))410,420,410
410 WRITE(US,1054)(NSIST(I,J),J=1,3),E1,F1
    GO TO 430
420 WRITE(US,1056)(NSIST(I,J),J=1,3)
430 CONTINUE
    KK=M+N
    F1=A(M+1,KK+1)*100
    WRITE(US,1058)F1
    WRITE(US,1060)NLR
    WRITE(US,1061)
    CALL AA12 (ALFA,BETA,FP,LR,INT,NLR,NINT,IY2,LD,FR)
    IT=0
    DO 460 I = 1,NLR
    K=LR(I)
    F1=FR(I)*100
    E1=ABS(FR(I))
    E2=(1-(PNOM(K)-E1)/PNOM(K))*100
    IF(PNE(K)-E1)450,450,440
440 WRITE(US,1034)K,SB(K),EB(K),F1,E2
    GO TO 460
450 IT=1
    WRITE(US,1036)K,SB(K),EB(K),F1,E2
460 CONTINUE
    WRITE(US,1062)
    IF(IT)470,500,470
470 WRITE(US,1040)
    GO TO 500
480 WRITE(US,1064)
    GO TO 550
490 WRITE(US,1066)
    GO TO 550
500 IT=0
    DO 520 I = 1,NLR
    IF(RV(I))510,520,510
510 IT=IT+1
    LV(IT)=LR(I)
520 CONTINUE
    IF(IT)530,550,530
530 WRITE(US,1067)(LV(I),I=1,IT)
550 IF(IY1-IY3)560,570,560
560 GO TO (230,250,270),IY2
C-----CASOS SUBSECUENTES
570 READ(UE,1068)ICASO,I21,I22,I23,I24,LD(1),LD(2)
    IF(ICASO)1070,580,1070
580 IY1=I21+I22+I23+I24
    IMP=0
    IF(LD(2))600,590,600

```

```

590 IY4=2
GO TO 178
600 IY4=3
GO TO 178
1000 FORMAT(11,3A4,3A4,4I5)
1002 FORMAT(15,F5,C,15,F10,5,3A4)
1004 FORMAT(4I5,3F10,5)
1006 FORMAT(2I5,2F10,5)
1008 FORMAT(4I1)
1010 FORMAT(1H1,5(/),22X,76(' '),22X,'I',74X,'I',22X,'I OTIMIZACAO
* DO FLUXO DE INTERCAMBIO NO SISTEMA INTERLIGADO ',3A4,' I',22X,
*'I',74X,'I',22X,'I ESTIMATIVA DA CAPACIDADE MAXIMA DE IMPORTACA
*O SIMULTANEA DE POTENCIA I',22X,'I',74X,'I',22X,'I PARA A
*COMPANHIA ',3A4,43X,'I')
1012 FORMAT(22X,'I',74X,'I',22X,76(' '))
1014 FORMAT(5(/),49X,'DADOS DA INTERLIGACAO',//,32X,56(' '),32X,'I
*COMPANHIA I BARRA DE IN I RESERVA GIRANTE DISPONI I',22X,'I',4X
*,'(NOME)',4X,'I TERLIGACAO I VEL P/INTERCAMBIO (Mw) I',32X,'I'
*,14(' '),I',13(' '),I',25(' '),I')
1016 FORMAT(32X,'I',1X,3A4,1X,'I',4X,I3,6X,'I',8X,F6.1,11X,'I')
1018 FORMAT(32X,56(' '))
1020 FORMAT(5(/),52X,'BARRAS DO SISTEMA',//,32X,56(' '),32X,'I',4X,'N
*UMERO',4X,'I',6X,'GERACAO',6X,'I',6X,'CARGA',8X,'I',32X,'I',14X,
*'I',7X,'(Mw)',8X,'I',7X,'(Mw)',5X,'I',32X,'I',14(' '),I',19(' ')
*,I',19(' '),I')
1022 FORMAT(32X,'I',5X,I3,6X,'I',6X,F6.1,7X,'I',6X,F6.1,7X,'I')
1024 FORMAT(32X,56(' '),//,49X,'BARRA ',12,' E A REFERENCIA')
1026 FORMAT(1H1,5(/),45X,'LINHAS DA REDE DE TRANSM. ',//,20X,80(' '),
//,20X,'I',8X,'I',X,'BARRAS',6X,'I',2X,'REATANCIA',2X,'I',1X,'NOMI
*NAL NORMAL I NOMINAL P/EMER I',20X,'I NUMERO I',19(' '),I',13
*X,'I',2(17X,'I'),20X,'I',8X,'I INICIAL I FINAL I (POR CENTO) I
*,6X,'(Mw)',7X,'I GENCIA (Mw)',4X,'I')
1030 FORMAT(20X,'I',8(' '),I',9(' '),I',9(' '),I',13(' '),I',17(' ')
*,I',17(' '),I')
1031 FORMAT(20X,'I',2X,I3,3X,'I',2X,I3,4X,'I',2X,I3,4X,'I',4X,F4.1,5X,'
*I',5X,F6.1,6X,'I',5X,F6.1,6X,'I')
1032 FORMAT(20X,80(' '))
1033 FORMAT(4(/),50X,'FLUXOS NO SISTEMA',//,24X,72(' '),24X,'I',9X,
*'I',8X,'BARRAS',7X,'I',19X,'I',19X,'I',24X,'I LINHA I',21(' ')
*,I',2X,'POTENCIA REAL I',4X,'CARREGAMENTO',3X,'I',24X,'I',9X,
*'I INICIAL I FINAL I',6X,'(Mw)',8X,'I',5X,'I INICIAL',4X,'I',
//,24X,'I',9(' '),I',10(' '),I',10(' '),I',18(' '),I',19(' '),
*I')
1034 FORMAT(24X,'I',3X,I3,3X,'I',3X,I3,4X,'I',3X,I3,4X,'I',6X,F6.1,6X,
*'I',5X,F6.1,8X,'I')
1036 FORMAT(24X,'I',3X,I3,3X,'I',3X,I3,4X,'I',3X,I3,4X,'I',6X,F6.1,6X,
*'I',5X,F6.1,4X,'** I')
1038 FORMAT(24X,72(' '),//,34X,'CARREGAMENTO INICIAL = PERCENTAGEM DO NO
*MINAL NORMAL')
1040 FORMAT(34X,'** = LINHA CARREGADA ALEM DO NOMINAL DE EMERGENCIA')
1041 FORMAT(34X,'POTENCIA NA BARRA DE REFERENCIA ',F6.1,' Mw')
1042 FORMAT(1H1,10(/),32X,'IMPORTACOES SIMULTANEAS ADMISSIVEIS P/CIA.',
*3A4)
1043 FORMAT(32X,'CRITERIO DA CONFIG. INICIAL NORMAL SEM DESLIGAMENTOS')
1044 FORMAT(32X,'CRITERIO DA CONFIG. INICIAL NORMAL C/DESLG. SIMPLES',//
*,32X,'ELEMENTO DESLIG. - LINHA ',12)
1046 FORMAT(32X,'CRITERIO DA CONFIG. INICIAL NORMAL C/DESLG. DUPLO',//,3
*2X,'ELEMENTOS DESLIG. - LINHAS ',12,' E ',12)
1048 FORMAT(32X,'SEGUNDO O CRITERIO DA CONFIG. DE CONTINGENCIA INICIAL',
//,32X,'ELEMENTO SOB CONTINGENCIA INICIAL - LINHA ',12)
1052 FORMAT(//,29X,61(' '),29X,'I',15X,'I',21X,'I',21X,'I',29X,'I
*PROCEDENCIA I',5X,'IMPORTACAO',6X,'I PERCENTAGEM DA RE I',29
*X,'I',5X,'(CIA)',5X,'I',8X,'(Mw)',9X,'I',2X,'SERVA GIR. DISP.',3X,
*'I',29X,'I',15(' '),I',21(' '),I',21(' '),I')
1054 FORMAT(29X,'I',15X,'I',2(21X,'I'),29X,'I',1X,3A4,2X,'I',7X,F6.1,
*8X,'I',8X,F5.1,8X,'I')
1056 FORMAT(29X,'I',15X,'I',2(21X,'I'),29X,'I',1X,3A4,2X,'I',10X,'-',
*10X,'I',10X,'-',10X,'I')
1058 FORMAT(29X,'I',59(' '),I',29X,'I',59X,'I',29X,'I T O T A L
* A D M I S S I V E L ',F6.1,' (Mw)',13X,'I',29X,'I',59X,'I',2
*9X,61(' '))
1060 FORMAT(5(/),38X,'FLUXO ATUAL NOS ',12,' ELEMENTOS DO SIST. TRANS.'
//,38X,'QUE IMPOE MAIORES RESTRICCOES AC MAXIMO ADMI',//,38X,'SSIVEL
* P/IMPORTACAO SIMULT. P/CRIT. ADOOTADO ',/)
1061 FORMAT(24X,72(' '),24X,'I',9X,
*'I',8X,'BARRAS',7X,'I',19X,'I',19X,'I',24X,'I LINHA I',21(' ')
*,I',2X,'POTENCIA REAL I',4X,'CARREGAMENTO',3X,'I',24X,'I',9X,
*'I INICIAL I FINAL I',6X,'(Mw)',8X,'I',5X,'I ATUAL',4X,'I',
//,24X,'I',9(' '),I',10(' '),I',10(' '),I',18(' '),I',19(' '),
*I')
1062 FORMAT(24X,72(' '),//,34X,'CARREGAMENTO ATUAL = PERCENTAGEM DO NO
*MINAL NORMAL')
1064 FORMAT(//,34X,61(' '),//,34X,'I',60X,'I',34X,'I N E M H U M A I
* M P O R T A C A O A D M I S S I V E L I',34X,'I',60X,'I',34
*X,'I PARA O PRESENTE CRITERIO ADOOTADO O SISTEMA JA SE ENCONTRA I'
//,34X,'I INICIALMENTE EM UM NIVEL DE CARGA QUE NAO ADMITE IMPORT
*A I',34X,'I COES',52X,'I',34X,'I',60X,'I',61(' '))
1066 FORMAT(//,34X,61(' '),//,34X,'I',60X,'I',34X,'I NAO HA IMPORTAC
*AO FINITA - VERIFICAR A CONSISTENCIA',5X,'I',34X,'I',30X,'DOS DAD
*OS P/O CRIT. ADCT',5X,'I',34X,'I',60X,'I',34X,61(' '))
1067 FORMAT(3(/),30X,'NOTA - NA SOLUCAO PARA O PRESENTE CRITERIO FORAM
*VIOLADAS',//,37X,'AS RESTRICCOES IMPOSTAS PELAS LINHAS ',10(12,1X))
1068 FORMAT(511,215)
1070 CALL EXIT
END

```

REFERÊNCIAS

- | 1 | MAC ARTHUR, C.A. (1961)  
"Transmission limitations computed by superposition".  
AIEE - Trans. Power App.  
Nº 57: 827-831, Dez. 1961.
  
- | 2 | LANDGREN, G.L.; TERHUNE, H.L.; ANGEL, R.K. (1972)  
"Transmission Interchange Capability Analysis by  
Computer".  
IEEE - Trans. Power App.  
PAS - 6(91): 2405-2414, Nov./Dez., 1972.
  
- | 3 | BROWN, H.E. (1969)  
"Contingencies Evaluated by a Z-Matrix Method".  
IEEE - Trans. Power App.  
PAS - 4(88): 409-412, Abr. 1969.
  
- | 4 | BROWN, H.E. (1972)  
"Interchange Capability and Contingency Evaluation  
by a Z-Matrix Method".  
IEEE - Trans. Power App.  
PAS - 5(91): 1972-1932, Jan. 1972.
  
- | 5 | LANDGREN, G.L.; ANDERSON, S.W. (1973)  
"Simultaneous Power Interchange Capability Analysis".  
IEEE - Trans. Power App.  
PAS - 6(92): 1973-1985, Nov./Dez., 1973.
  
- | 6 | KINGHT, U.G. (1972)  
"Power Systems Engineering and Mathematics".  
N.Y., Pergamon Press, 1972.



- |7| LIMER, D.H. (1969)  
"Techniques and Applications of Security Calculations  
Applied to Dispatching Computers".  
PSCC.: 1-10, 1969.
- |8| ZIONTS, S. (1974)  
"Linear and Integer Programming"  
N.J., Prentice-Hall Inc., 1974.

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

ELGERD, O.I. (1971)

"Electric Energy Systems Theory: An Introduction".  
N.Y., McGraw-Hill, 1971.

STAGG, G.W. e EL-ABIAD, A. (1968)

"Computer Methods in Power Systems Analysis".  
N.Y., McGraw-Hill, 1968.

BROWN, E. Homer (1975)

"Solution of Large Network by Matrix Methods".  
N.Y., John Wiley & Sons, 1975.

GARVIN, W. Walter (1960)

"Introduction to Linear Programming".  
N.Y., McGraw-Hill, 1960.