TESE
11

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



EFEI

MÉTODO COMPUTACIONAL PARA RESOLUÇÃO
QUAÇÕES PARCIAIS DO DESPACHO
CO DE CARGA ORIGINADAS DA
DO TEOREMA DE KUHN-TUCKER

TESE DE MESTRADO

TATUO NAKANISHI

1978

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão de Exame da Tese de Mestrado "Operação Econômica dos Sistemas Elétricos de Potência, do candidato TATUO NAKANISHI, em Sessão de Decisão realizada após a defesa de Tese em 22 de dezembro de 1972, às 16 horas, decidiu atribuir o conceito 2 à mesma, na forma do artigo 16 do Regulamento de Tese de Mestrado.

EEEI, 22 de dezembro de 1972

Comissão Examinadora:-

José Abel Royo dos Santos

Francisco Rennó Neto

Amadeu Casal Caminha

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - BIBLIOTECA

SUMÁRIO

O cap. I descreve o problema do Despacho Econômico de Carga em um sistema elétrico de potência, de modo bastante simplificado, expondo alguns conceitos fundamentais que serão necessários na apresentação do trabalho. Além disso, é feito ainda um comentário, muito resumido, dos vários trabalhos realizados sôbre o assunto fora do país.

O cap. II descreve a resolução do Despacho Econômico pelo método dos coeficientes B, desde o desenvolvimento da fórmula das perdas, até o comentário das vantagens e desvantagens deste método.

O cap. III consiste na aplicação numérica do método dos coeficientes B, descrito no capítulo anterior, com as equações utilizadas com os programas confeccionados para o computador, e a aplicação destes em sistemas, que foram denominados Sistemas Exemplo.

O cap. IV descreve o desenvolvimento algébrico, para uma solução completamente generalizada do Despacho Econômico pela aplicação do teorema de Kuhn-Tcker. As equações que definem a condição ótima de funcionamento do sistema são as metas finais deste capítulo.

O cap. V consiste na aplicação numérica da teoria desenvolvida no capítulo anterior, através da utilização do teorema de Newton-Raphson. Consta, das equações desenvolvidas de um programa para o computador e de uma aplicação deste programa num sistema exemplo.

No cap. VI estão as conclusões e comentários sobre o trabalho, dando ênfase às etapas de desenvolvimento futuro deste vasto e complexo assunto que é o do Despacho Econômico.

Sendo o objetivo deste trabalho alcançar um primeiro degrau para uma posterior solução completa do assunto, procurou-se realizar um desenvolvimento de modo a facilitar a continuação do mesmo. Trechos, como por exemplo, "Método dos Trânsitos", foram incluídos no trabalho a título de esclarecimento e confronto com o método de Carpentier.

ÍNDICE

DESCRIÇÃO	ITEM	PÁG.
Parecer da Comissão Examinadora.....		
Sumário.....		
CAPÍTULO I		
- Situação do Problema e Conceitos Fundamentais.....		1
- Introdução.....	1.1	1
- Problema do Despacho Econômico de Carga...	1.2	3
- Operação Econômica das Instalações de Geração sem considerar as perdas de transmissão.....	1.2.a	4
- Condição de Operação Econômica considerando as Perdas de transmissão.....	1.2.b	8
- Situação do Problema.....	1.3	13
CAPÍTULO II		
- Resolução do Despacho Econômico com a Utilização dos Coeficientes B.....		21
- Introdução.....	2.1	21
- Desenvolvimento da Fórmula das Perdas de Transmissão (1).....	2.2	22
- Objetivo.....	2.2.a	22
- Conceito Fundamental.....	2.2.b	24
- Equação do "Network" de um Sistema Elétrico.....	2.2.c	25
- Fórmula das Perdas.....	2.2.d	38

DESCRIÇÃO	ITEM	PÁG.
- Desenvolvimento Algébrico do Método(2)....	2.3	51
- Determinação do Valor de λ na condição econômica (3).....	2.4	52
- Sequência de Cálculo do Método.....	2.5	54
- Comentários sobre o método dos Coeficientes B.....	2.6	55
Conceito de Transformação.....	Anexo 2A	58
Propriedades Matriciais.....	Anexo 2B	60
CAPÍTULO III		
- Resolução Numérica do método dos Coeficientes B.....		65
- Programa COEFB.....	3.1	65
- Equações Utilizadas.....	3.1.a	65
- Diagrama em Blocos (COEFB).....	3.1.b	68
- Instrução para entrada de dados.....	3.1.c	70
- Sistema Exemplo (COEFB).....	3.1.d	71
- Listagem do Programa COEFB e resultados obtidos.....	3.1.e	77
- Programa POTG1.....	3.2	83
- Equações utilizadas.....	3.2.a	83
- Diagrama em Blocos (POTG1).....	3.2.b	85
- Instrução para entrada de dados.....	3.2.c	89
- Sistema Exemplo (POTG1).....	3.2.d	89
- Listagem do programa e resultados obtidos.....	3.2.e	92

DESCRIÇÃO	ITEM	PÁG.
- Programa POTG2.....	3.3	100
- Instruções para entrada de dados.....	3.3.a	100
- Sistema Exemplo (POTG2).....	3.3.b	101
- Listagem do programa e resultados obtidos.....	3.3.c	103
CAPÍTULO IV		
- Solução Generalizada do Despacho Econômico..		117
- Introdução.....	4.1	117
- Método dos Trânsitos (4).....	4.2	117
- Notações e Definições Fundamentais.....	4.2.a	118
- Relações entre os custos marginais de energia sem considerar as restrições(equações incompletas).....	4.2.b	118
- Relações entre os custos marginais de energia em presença de restrições (relações completas).....	4.2.c	121
- Relações que ligam os custos marginais de produção e os custos marginais da energia em um ponto de produção.....	4.2.d	123
- Relações características do sistema em malha.....	4.2.e	124
- Resolução prática das relações estabelecidas.....	4.2.f	124
- Método das Injeções (2).....	4.3	125
- Expressão de $I_i(\bar{\theta}, \bar{U})$ e $K_i(\bar{\theta}, \bar{U})$.....	4.3.a	127
- Teorema de Kuhn e Tucker.....	4.3.b	129

DESCRIÇÃO	ITEM	PÁG.
- Aplicação do Teorema de Kuhn e Tucker no Despacho Econômico(2).....	4.3.c	131
- Desenvolvimento das relações do despacho econômico.....	4.3.d	134
- Equações resultantes do estudo do despacho econômico.....	4.3.e	139
- Interpretação das variáveis duais.....	4.3.f	142
CAPÍTULO V		
- Resolução Numérica das Relações do Despacho Econômico.....		150
- Introdução.....	5.1	150
- Teorema de Newton-Raphson(5).....	5.2	151
- Programa OPEC.....	5.3	154
- Equações Utilizadas.....	5.3.a	155
- Objetivo do Programa OPEC.....	5.3.b	161
- Descrição do programa.....	5.3.c	161
- Diagrama em Blocos.....	5.3.d	165
- Instrução para entrada de dados no programa.....	5.3.e	168
- Sistema Exemplo.....	5.3.f	169
- Listagem do programa e resultados obtidos.....	5.3.g	174
CAPÍTULO VI		
- Conclusão e Comentários.....		195
SÍMBOLOS UTILIZADOS.....		202
REFERÊNCIAS.		207

CAPÍTULO I

1.1 - INTRODUÇÃO

Um trabalho foi realizado sobre a aplicação de putadores digitais no controle de sistemas elétricos de potên constando além de estudos sobre Controle Digital Direto, de Té cas de Aplicação dos Computadores Digitais On-Line para sistem Complexos de Despacho, Sistemas Interligados, um programa para solução do Despacho Econômico de Carga. Tal programa foi confe nado com base no método desenvolvido por Eugene F. Hill e Wil D. Stevenson Jr.

O método utilizado é uma variação do método cl co, em que os coeficientes de perdas são calculados através resultados obtidos de um programa de fluxo de carga.

Este trabalho foi apresentado por uma equipe Tese de Graduação em 1970, da qual o autor foi um dos partici tes.

O problema do Despacho Econômico de Carga de Sistema Elétrico, de maneira muito sucinta, é determinar as p cias das usinas geradoras em serviço de modo a tornar mínimas despesas totais de geração satisfazendo as exigências dos div consumidores.

Para um sistema muito simples como o da Fig. 1 problema se torna bastante claro: -

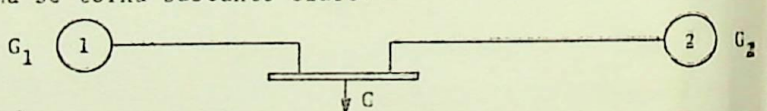


Fig. 1.1 - Sistema com dois centros geradores e um cons

Supondo-se que o custo de produção $/KWh do centro 2 seja menor do que o do centro 1, a maior economia evidentemente se obtém atendendo o consumo C com a parcela maior possível do centro 2.

Considerando-se agora as perdas de transmissão e supondo-se que as perdas na linha do lado do centro 2 sejam maiores, o problema complica-se sobremaneira, pois à medida que se aumenta a parcela do centro 2 as perdas do sistema também aumentam. Uma solução mais econômica consiste em se determinar, portanto, o equilíbrio entre custos de produção e perdas de transmissão.

O problema na prática é muito complexo, pois na determinação deste ponto ótimo de funcionamento deve-se considerar que:

a) O custo de produção $/KWh é normalmente variável com a potência produzida.

b) Os sistemas não são simples como o do exemplo, mas sistemas complexos com inúmeros consumidores e inúmeros centros geradores.

c) A situação de consumo do sistema varia constantemente.

d) A configuração do sistema de transmissão se altera através de chaveamento e atuação dos dispositivos de proteção.

e) A capacidade dos centros geradores e os meios de transmissão são fisicamente limitados.

f) As condições de geração são variáveis, princi-

palmente no caso das Usinas Hidroelétricas com seus problemas específicos, tais como a determinação da variação dos custos incrementais de produção considerando a capacidade do reservatório e as previsões pluviométricas, capacidade de geração e inúmeros outros.

g) As dificuldades no equacionamento quando se considera o custo das perdas de transmissão.

O sistema elétrico brasileiro com suas usinas termo-elétricas (e futuramente atômicas), seu grande potencial hidráulico e sua extensa região territorial possui características sui-generis, e provavelmente necessitará de um "Know-how" próprio para solução do problema de despacho econômico. Porém como uma etapa inicial é válida e necessária a tentativa de aplicação dos métodos desenvolvidos em outros países e principalmente a adaptação desses métodos para a resolução dos nossos problemas.

Acompanhando a resolução teórica do problema é de importância vital a aplicação dos métodos para casos reais, devendo ser melhorada em etapas à medida que se desenvolve a parte teórica, porque a implantação de tal empreendimento deverá galgar degraus progressivos, e os resultados de uma solução aproximada serão as bases comparativas dos métodos mais precisos.

1.2 - PROBLEMA DO DESPACHO ECONÔMICO DE CARGA

Como já mencionado no ítem anterior, o objetivo do despacho econômico de um sistema de potência é minimizar o custo de toda energia requerida pelo sistema durante um apropriado período de tempo e de maneira a atender as necessidades de consumo satisfatoriamente.

Com o auxílio do teorema de Lagrange pode-se, numa primeira etapa, considerar o despacho econômico: sem levar em consideração as perdas de transmissão e depois levando em consideração as perdas por transmissão.

1.2.a - Operação Econômica das Instalações de Geração sem considerar as Perdas de Transmissão

1.2.a.1 - Objetivo

O problema consiste em se determinar a condição de distribuição de carga entre as instalações de geração, de tal forma que o custo total, por hora, seja mínimo para o conjunto de geração de um sistema.

1.2.a.2 - Custo Incremental

Para se determinar essa condição de operação econômica, necessita-se primeiramente da curva do custo de energia gerada para cada instalação em função de sua potência gerada.

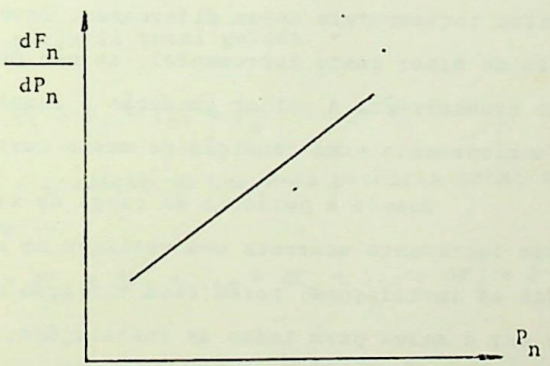


Fig. 1.2 - Custo Incremental em função da Potência de geração

Sendo:-

n = instalação

F_n = custo de funcionamento por hora da instalação

P_n = potência gerada pela instalação

$\frac{dF_n}{dP_n}$ é denominado "Custo Incremental", ou seja, o custo da energia gerada em Cr$/MWh.

Usualmente, pode-se aproximar a curva do custo incremental em função da potência para uma reta, sem com isso, prejudicar a precisão dos resultados obtidos, mesmo porque normalmente não se consegue dados muitos exatos no levantamento de custo devido a vários fatores que devem ser considerados.

1.2.a.3 - Solução Intuitiva

Pode-se ter uma idéia intuitiva da condição de funcionamento econômico. Por exemplo: se tivermos duas instalações cujos custos incrementais sejam diferentes, deve-se aumentar a carga naquela de menor custo incremental, se não considerarmos as perdas de transmissão. A melhor condição é aquela em que ambas estão em funcionamento numa condição de mesmo custo incremental.

Quando a potência de carga do sistema é incrementada, esse incremento acarreta uma variação no custo incremental para todas as instalações; porém essa variação no custo incremental deve ser a mesma para todas as instalações, a fim de que seja mantida a condição de funcionamento econômico.

1.2.a.4 - Solução Matemática

O critério que foi explanado pode ser apresentado de forma matemática como se segue:

Sendo:

F = Custo total de produção do sistema, por hora

N = nº de instalação de geração

F_n = custo individual de cada instalação

P_n = potência gerada por instalação

$$F = F_1 (P_1) + F_2 (P_2) + ... + F_n (P_n) + ... + F_N (P_N) \qquad (1.1)$$

Para uma economia máxima, deve-se ter um mínimo custo total F, ou seja, dF = 0.

$$dF = \frac{dF_1}{dP_1} \cdot dP_1 + \frac{dF_2}{dP_2} \cdot dP_2 + \ldots + \frac{dF_n}{dP_n} \cdot dP_n + \ldots +$$

$$+ \frac{dF_N}{dP_N} \cdot dP_N \qquad (1.2)$$

Sendo P_t = a potência total gerada: -

$$P_t = P_1 + P_2 + \ldots + P_n + \ldots + P_N \qquad (1.3)$$

e impondo-se a condição de que essa potência total se mantém constante, tem-se: -

$$dP_t = dP_1 + dP_2 + \ldots + dP_n + \ldots + dP_N = 0$$

$$dP_1 = - dP_2 - dP_3 - \ldots - dP_n - \ldots - dP_N \qquad (1.4)$$

De (1.2) e (1.4) tem-se: -

$$-dF = dP_2 \left(\frac{dF_1}{dP_1} - \frac{dF_2}{dP_2} \right) + dP_3 \left(\frac{dF_1}{dP_1} - \frac{dF_3}{dP_3} \right) + \ldots$$

$$\left(\frac{dF_1}{dP_1} - \frac{dF_n}{dP_n} \right) + \ldots + dP_K \left(\frac{dF_1}{dP_1} - \frac{dF_N}{dP_N} \right) = 0 \qquad (1.5)$$

Sendo os funcionamentos das instalações independentes entre si, os termos dP_n são independentes. E isto faz com que os termos entre parênteses sejam iguais a zero para satisfazer a equação (1.5).

Logo: $-$ $$\frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2}$$

$$\frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dP_3}{dC_3} \qquad (1.6)$$

$$\vdots \qquad \vdots$$

$$\frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dP_N}{dC_N}$$

Dessa forma, conclui-se que, de fato, a condição para se obter um máximo de economia no funcionamento de um conjunto de instalações de um sistema, sem se considerar as perdas de transmissão, é que cada instalação esteja funcionando em um determinado ponto, porém tendo todas elas o mesmo custo incremental (fig. 1.3).

$$\frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2} = \ldots = \frac{dF_n}{dP_n} = \ldots = \frac{dF_N}{dP_N} \qquad (1.7)$$

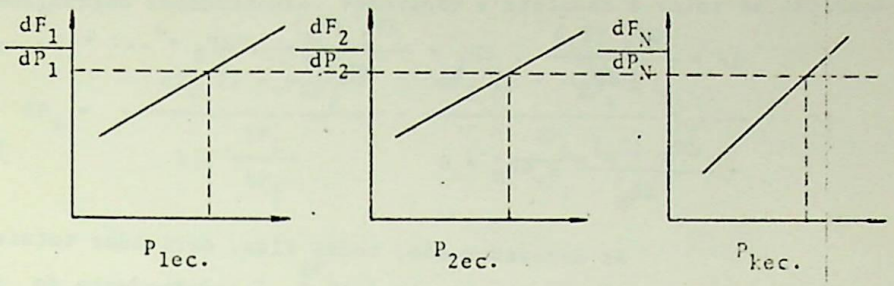


Fig. 1.3 - Custos incrementais das instalações de geração

1.2.b - Condição de Operação Econômica considerando as Perdas de Transmissão

1.2.b.1 - Objetivo

Analogamente ao item 1.2.a, o problema consiste em determinar a condição de operação do sistema a fim de se conseguir uma economia máxima, considerando, porém, para este caso, as perdas na transmissão.

1.2.b.2 - Desenvolvimento Matemático

O custo total de produção de um sistema de potência com K instalações de geração é dado por: -

$$F = F_1 (P_1) + F_2 (P_2) + F_3 (P_3) + \ldots + F_N (P_N) \qquad (1.8)$$

Onde: -

F = custo total por hora

$F_1, F_2, \ldots F_N$ = custo individual, por hora, de cada instalação

$P_1, P_2, \ldots P_N$ = potências reais de geração de cada instalação.

Diferenciando a expressão do custo de produção:

$$dF = \frac{dF_1\ (P_1)}{dP_1} \cdot dP_1 + \frac{dF_2\ (P_2)}{dP_2} \cdot dP_2 + \ldots +$$

$$+ \frac{dF_N\ (P_N)}{dP_N} \cdot dP_N = 0 \qquad (1.9)$$

As derivadas são, todas elas, derivadas totais po que o custo individual de cada instalação é independente do cust das demais instalações.

Desde que a curva de produção tenha uma curvatur sempre positiva, para um custo total mínimo deve-se ter:

$$dF = 0$$

Pela lei da conservação de energia pode-se escrever que:

$$P_R = P_1 + P_2 + \ldots + P_N - P_L \qquad (1.10$$

Nesta expressão: -

P_R = potência total de carga

$P_1, P_2 \ldots P_N$ = potência gerada em cada instalação

P_L = potência de perda total no sistema.

Se as potências de carga do sistema são consider das constantes, a diferencial total da expressão 1.10 será:

$$dP_R = 0 = dP_1 + dP_2 + \ldots + dP_N - \frac{\partial P_L}{\partial P_1} \cdot dP_1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2} \cdot dP_2 - \ldots$$

$$- \frac{\partial P_L}{\partial P_N} \cdot dP_N \qquad (1.11$$

Com exceção de algum caso particular, cada dP_i é considerado independente. Fatorando e isolando o valor de dP_1, tem-se: -

$$dP_1 = - \frac{dP_2 \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2}\right)}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1}} - \frac{dP_3 \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_3}\right)}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1}} - \ldots\ldots - \frac{dP_N \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_N}\right)}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1}} \qquad (1.12)$$

Substituindo esse valor de dP_1 na expressão da diferencial total do custo de produção, temos:

$$dF = \frac{dF_1(P_1)}{dP_1} \left[- \frac{dP_2 \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2}\right)}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1}} - \frac{dP_3 \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_3}\right)}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1}} - \ldots - \frac{dP_N \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_N}\right)}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1}} \right] + \frac{dF_2(P_2)}{dP_2} \cdot dP_2 + \ldots + \frac{dF_N(P_N)}{dP_N} \cdot dP_N = 0$$

$$dF = dP_2 \left[\frac{dF_2(P_2)}{dP_2} - \frac{dF_1(P_1)}{dP_1} \cdot \frac{(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2})}{(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1})} \right] +$$

$$+ dP_3 \left[\frac{dF_3(P_3)}{dP_3} - \frac{dF_1(P_1)}{dP_1} \cdot \frac{(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_3})}{(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1})} \right] + \ldots\ldots +$$

$$+ dP_N \left[\frac{dF_N(P_N)}{dP_N} - \frac{dF_1(P_1)}{dP_1} \cdot \frac{(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_N})}{(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1})} \right] = 0 \quad (1.13)$$

Desde que as diferenças dP desta expressão sejam todas independentes, cada termo deve ser, independentemente, igual a zero.

Esta condição pode ser satisfeita somente quando cada coeficiente é igual a zero.

Fazendo cada coeficiente igual a zero e separando as variáveis, tem-se que:

$$\frac{dF_1(P_1)}{dP_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1}} = \frac{dF_2(P_2)}{dP_2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2}} = \ldots\ldots =$$

$$= \frac{dF_N(P_N)}{dP_N} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_N}} = \lambda \quad (1.14)$$

λ = custo incremental aparente

Conclui-se, portanto, que para um mínimo custo total de produção, considerando as perdas de transmissão, o "custo incremental de produção multiplicado por um fator deve ser o mesmo" para todas as instalações de geração.

1.2.b.3 - Fator de "Penalty" e Perda Incremental

Na expressão 1.4 os fatores que multiplicam os custos incrementais

$$\frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_n}}$$

são denominados "fatores de Penalty" ou "fatores de Penalidade".

E as derivadas parciais da perda total $\frac{\partial P_L}{\partial P_n}$, em relação às potências de geração, são denominadas "Perdas Incrementais".

O nome fator de Penalty advém do fato de que esse fator é função da perda incremental de instalação correspondente, e é máximo quando a perda incremental tem seu máximo valor positivo.

O produto do custo incremental pelo fator de Penalty "λ" pode ser considerado como um custo incremental aparente de produção de uma instalação de geração, para uma determinada carga deliberada para o suprimento de uma carga do sistema teoricamente constante.

Para uma instalação "n" genérica, tem-se de (1.14)

$$\frac{dF_n(P_n)}{dP_n} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \lambda \qquad (1.15$$

Portanto para N instalações de geração teremos um sistema de N e quações 1.15 com N incógnitas P_n (Potência de geração), para cad valor do custo incremental assumido.

1.3 - SITUAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com a publicação do IEEE Transactions d Fevereiro de 1972, a resolução prática do despacho econômico pod ser encarado em duas etapas.

A primeira é o Pré-despacho, cujo objetivo é sel cionar a combinação das fontes e unidades que irão suprir o cons mo previsto no sistema durante um período de tempo apropriado e prevendo ainda uma margem especificada de reserva de operação. Es forços para computar o pré-despacho aplicando técnicas de progra ção dinâmica envolvendo a disponibilidade de variadas alternativ têm sido feitos, entretanto devido à quantidade de variáveis envo vidas, técnicas especiais têm sido descobertas para limitar o núm ro de alternativas a serem investigadas de modo a manter o temp de computação dentro dos limites práticos.

A segunda é o despacho econômico On-Line, que de termina instante por instante, a carga a ser aplicada para cada u nidade geradora em operação, de modo a minimizar o custo total d suprimento requerido pelo sistema.

Diferentes métodos têm sido propostos com difere tes aproximações e diferentes dificuldades de resolução numérica sendo que muitos deles têm sido aplicações práticas e outros ape

nas o desenvolvimento teórico.

A otimização do fluxo de potência ativa tem sido resolvida com a aplicação da fórmula das perdas de transmissão e métodos mais precisos têm sido propostos, como "Despacho Econômico de Geração Diretamente de Tensões e Admitâncias do Sistema de Potência" por R. B. Squires (IEEE Trans. Fevereiro de 1961), "Métodos Digitais para Análise de Sistema de Potência" por H. Dommel (Arch. Elektrotech. Fevereiro e Abril de 1963).

Métodos aproximados para otimização do fluxo de potência reativa têm sido desenvolvidos, como "Minimização das Potências de Perdas na Transmissão pelo Controle de Potência Reativa" por H. M. Smith e S. Y. Tong (IEEE Trans. Agosto de 1963) e "O Efeito da Variação dos Taps dos Transformadores sobre as Perdas no Sistema" por F. Heilbronner (Elektrotech. Z. 1966). E mais recentemente métodos mais exatos para otimização do fluxo de potência real e/ou reativa como, "Controle Ótimo do Fluxo de Potência Reativa" por J. Peschon, D. S. Piercy, W. F. Tinney, O. J. Tveit e M. Cuenod (IEEE Trans. Janeiro de 1968) e "Uma Técnica de Otimização da Distribuição da Potência Real e Reativa" por J. F. Dopazo, O.A. Klitin, G. W. Stagg e M. Watson (IEEE Proc. Novembro 1967).

O problema geral de otimização do fluxo de potência sujeito a restrições de igualdade e desigualdade, foi formulado em 1962 por J. Carpentier "Contribuição para o Problema do Despacho Econômico" (Bull. Soc. Franç. Electr.) e mais tarde estendido. "Métodos de Otimização para Produção de Potência em Sistemas de Potência" por G. Dauphin, G. D. Feingold e D. Spohn (Bull. de la Direction des Etudes et Recherches 1966).

O desenvolvimento de métodos muito rápidos e precisos, como a aplicação do método de Newton na solução de Load Flow, permitiu a proposição de novos métodos, como a solução d fluxo de potência pelo método de Newton e o ajuste ótimo dos parâmetros de controle pelo método do gradiente. O método consiste n resolução do fluxo de potência diversas vezes até chegar à soluçã ótima sem restrições e finalmente introduzir as restrições de desigualdades, primeiro sobre os parâmetros de controle e depois sobr as variáveis dependentes, "Solução Ótima do Fluxo de Potência" po Hermann W. Dommel e William F. Tinney (IEEE Trans. Outubro de 196 Outro método de otimização utilizando resultados de Load-Flow fo proposto por Eugene F. Hill e William D. Stevenson Jr. (IEEE Tran 1967), consiste na determinação dos termos $Ajn = \frac{\partial \theta_i}{\partial P_n}$ através d resolução de Load-Flow diversas vezes e aplicação dos mesmos no cálculos dos coeficientes de perdas

$$B_{nn} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial 2P_L}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \cdot A_{in} \cdot A_{jn}$$

$$B_{mn} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial 2P_L}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \cdot A_{im} \cdot A_{jn}$$

onde $\frac{\partial 2P_L}{\partial \theta_i \partial \theta_j}$ são calculados através de expressões obtidas p derivação sucessiva da fórmula das perdas em termo das admitânci de barra.

Kyushu é um estado (ilha) situado no sul do Japã Tem na parte norte, concentrado em decorrência das indústrias, por cento da carga total, onde também se encontram as centrais t

moelétricas em predominância e tem na parte sul as centrais hidráulicas nas regiões montanhosas.

Em 1965 a Kyushu Electric Power Company instalou um computador digital de processo (TOSBAC - 3300B) para operação do sistema. Em 1968 tendo este computador para despacho automático de carga combinado com equipamentos tipo analógico para controle automático de carga frequência, instalou um outro computador para o despacho econômico de carga (ELDC). As principais funções da operação econômica, controle do despacho automático de carga, controle da previsão de carga, controle das transferências de energia das linhas e coleta de dados.

Oito centrais termoelétricas e sete centrais hidroelétricas num total de 2.152 MW e que corresponde a 77 por cento da capacidade total instalada no sistema, são controladas continuamente.

O despacho econômico é resolvido utilizando-se a técnica do controle da tensão e potência reativa, minimizando as perdas de transmissão causadas pelo fluxo de potência reativa dentro das restrições limitantes, desconsiderando entretanto as perdas de transmissão devido ao fluxo de potência ativa. Com um custo de instalação do sistema de aproximadamente de 200.000 dólares, conseguiu-se uma redução nas perdas de outras vantagens como: uma melhor tensão de fornecimento, diminuição de equipamentos necessários para controle da tensão ou potência reativa do sistema, eliminação do trabalho dos operadores e nas subestações.

(Extraído do IEEE Trans. Janeiro de 1968 "Controle da Tensão do Sistema de Potência pelo uso de um

computador de Controle de Processo", por K
Kumai e Kazuya Ode).

O sistema de geração da Union Electric consi
instalações termo-elétricas convencionais, uma instalação hi
trica com reservatório, uma instalação hidro-elétrica a fio
e uma instalação hidro-elétrica com reservatório com bombe
de água.

Antes da implantação de um computador digita
sistema o despacho econômico era feito manualmente por bloco
custo incremental de carga de modo sequencial e sem consider
perdas incrementais de transmissão.

A realização prática de um programa de pré
cho de otimização e controle On-Line do sistema foi consegui
través de um sistema híbrido de controle, consistindo de um
tador de controle On-Line (PRODAC 510 da Westinghouse) e um
ma de controle analógico da Leeds & Northrup.

A função de otimização é executada pelo pr
de pré-despacho que processa todos os dados de entrada do de
tais como, limites de unidades, interrupção de serviço, pro
ções manuais, avaliação de água, etc. Os resultados pertinen
variáveis e parâmetros de controle são automaticamente tran
dos para o programa de controle On-Line que executa o despac
nômico em tempo real com o comando sobre o sistema analógico
clo de despacho básico é no máximo de 32 horas.

No despacho econômico as perdas de transmiss
consideradas de maneira clássica com a utilização do método
eficientes B, com exceção da usina com bombeamento, Taum Sau

re a qual é aplicado um algoritmo próprio.

Uma explanação mais detalhada poderá ser conseguida no IEEE Trans. (Janeiro de 1968) "Técnicas de Aplicação de Computador Digital On-Line para o Despacho de Sistemas Elétricos Complexos" por Thomas Kennedy e Arthur G. Hoffmann.

CAPÍTULO II

RESOLUÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO COM A UTILIZAÇÃO DOS COEFICIENTES B

2.1 - INTRODUÇÃO

A utilização dos coeficientes B, para a resolução do problema do Despacho Econômico de carga, é uma das diferentes formas de equacionamento do problema, assumindo uma série de aproximações e simplificações para a linearização do problema. Sua inclusão neste trabalho tem sua importância por ser um método difundido e cuja aplicação tem gerado os primeiros resultados positivos do problema. Apesar das restrições e aproximações inerentes do método, ainda é usado por diversas Companhias de Eletricidade principalmente nos Estados Unidos.

Como foi explanado no capítulo anterior o problema poderia ser encarado com a resolução de n equações do despacho econômico da forma: -

$$\frac{dF_n(P_n)}{dP_n} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \lambda$$

onde as n incógnitas seriam as potências ativas P_n de geração e λ um parâmetro das equações.

A parcela, derivada do custo total de produção em relação a uma determinada potência de geração, é facilmente calculável, desde que se determine a expressão do custo de produção de cada instalação. Essas expressões, normalmente do tipo polinomial, são de fato muito trabalhosas de serem levantadas com muita precisão, devido aos inúmeros fatores de manipulação de dados estatísticos.

A parcela, derivada da perda total do sistema relação a uma determinada potência de geração pode ser determina pela fórmula das perdas do sistema, onde as potências são as var veis independentes e os coeficientes B, os parâmetros. No desenv vimento desta fórmula são feitas diversas considerações e restr ções (Vide item seguinte), que acarretam as principais aproxim ções e restrições do método.

O valor de λ é o parâmetro das equações, e a var ção do mesmo implica em diferentes resultados, isto é, diferen conjuntos de valores de potências de geração que satisfazem o si tema de equações, porém o valor deste parâmetro deve ser tal as gerações do sistema atenda as necessidades dos consumidores, são os dados do problema, e atendendo também as limitações físic do sistema elétrico.

2.2 - DESENVOLVIMENTO DA FÓRMULA DAS PERDAS DE TRANSMISSÃO (1)

2.2.a - Objetivo

O problema consiste basicamente na determinação uma expressão para as perdas de transmissão em função das pot cias de geração.

Isto é feito reduzindo o circuito do sistema de tência, no qual várias fontes estão conectadas às cargas atra de um "network" de transmissão (fig. 2.1), a um circuito equiva te como mostra a figura 2.2.

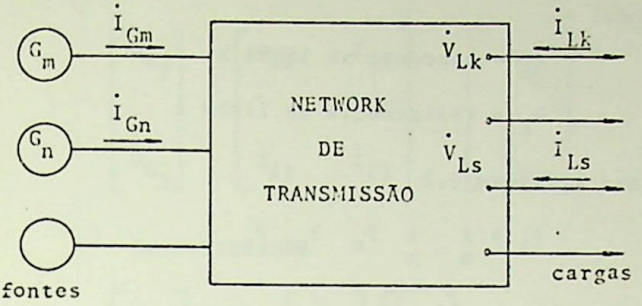


Fig. 2.1 - Diagrama Esquemático do Sistema de Potência

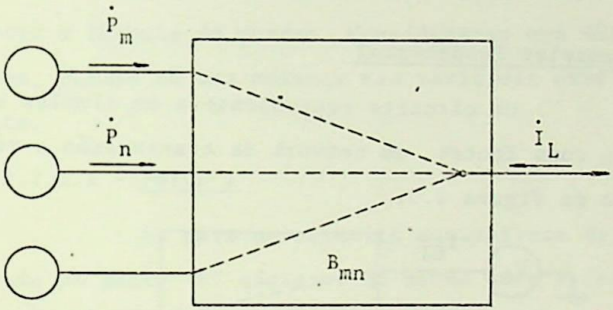


Fig. 2.2 - Circuito Equivalente com as potências de geração

As perdas de transmissão para ambos os circuitos (figs. 2.1 e 2.2) são iguais e são expressas pelas seguintes equações:

Para a figura 2.1

$$P_L = \Sigma_K \; I_k^2 \; R_k$$

Onde: -

I_k = corrente na linha k

R_k = resistência da linha k

Para a figura 2.2

$$P_L = \sum_m \sum_n P_m B_{mm} P_n$$

Onde: -

P_n, P_m = potências de geração

B_{mm} = constantes a serem determinadas

2.2.b - Conceito Fundamental

Um circuito equivalente a um simples circuito c
tituído de duas fontes, um network de transmissão e várias carg
é mostrado na figura 2.3.

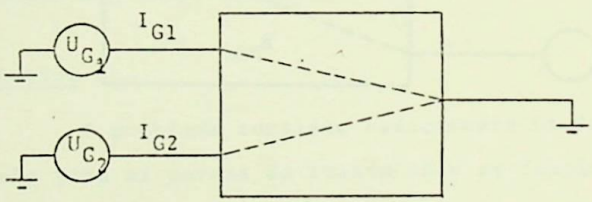


Fig. 2.3 -Sistema com duas fontes

As equações do circuito equivalente fig. 2.3 po
ser escritas da seguinte maneira: -

$$\dot{U}_{G_1} = \dot{Z}_{11} \dot{I}_{G_1} + \dot{Z}_{12} \dot{I}_{G_2}$$

$$\dot{U}_{G_2} = \dot{Z}_{21} \dot{I}_{G_2} + \dot{Z}_{22} \dot{I}_{G_2} \qquad (2.$$

ou na forma matricial

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} \\ \\ \dot{U}_{G_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \\ \dot{I}_{G_2} \end{bmatrix} \qquad (2.2)$$

Generalizando

$$\left[\dot{U}_{G_m}\right] = \left[\dot{Z}_{mn}\right]\left[\dot{I}_{G_n}\right] \qquad (2.3)$$

2.2.c - Equação do "Network" de um Sistema Elétrico

Existem várias formas de análise de um network para se obter a fórmula de perdas. Considera-se uma mudança na forma de análise, quando há uma mudança nas variáveis envolvidas no equacionamento.

2.2.c.1 - Forma 1

Se para um circuito equivalente de um sistema é considerado um ponto "R" qualquer do mesmo como referência (figura 2.4) um conjunto de equações pode ser escrito em termos da geração, da carga e das impedâncias próprias e mútuas com relação ao ponto de referência.

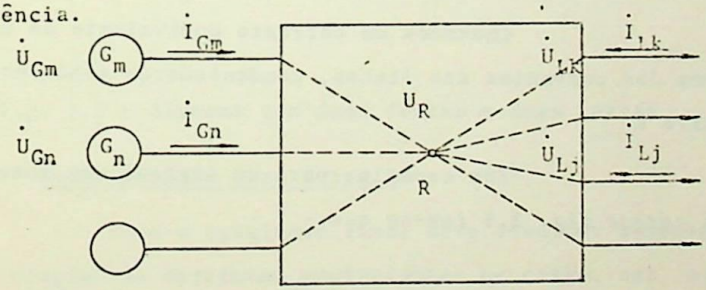


Fig. 2.4 - Circuito equivalente, forma 1

Na forma matricial elas podem ser escritas da

neira como se segue: -

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{G_m} - \dot{U}_R \\ \\ \dot{U}_{L_s} - \dot{U}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{G_m - G_n} & \dot{Z}_{G_m - L_k} \\ \\ \dot{Z}_{L_s - G_n} & \dot{Z}_{L_s - L_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_n} \\ \\ \dot{I}_{L_k} \end{bmatrix} \quad (1$$

Onde: -

m e n = número de ordem das fontes

s e k = número de ordem das cargas

G e L = geração e carga respectivamente

$\dot{I}_{L_k}$ = corrente equivalente de carga na barra k

$\dot{Z}_{G_m - G_n}$ = impedâncias próprias e mútuas entre as gerações

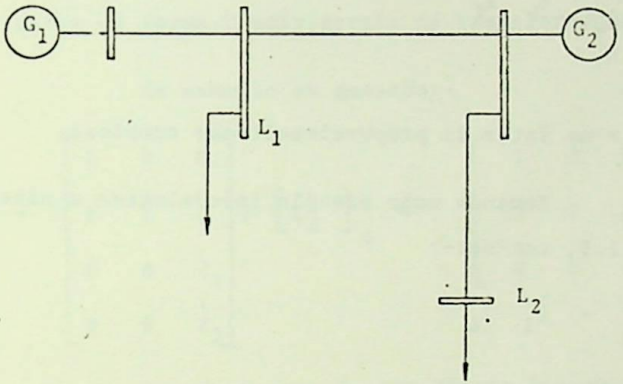
$\dot{Z}_{L_s - L_k}$ = impedâncias próprias e mútuas entre as cargas

$\dot{Z}_{G_m - L_k}$ e $\dot{Z}_{L_s - G_n}$ = impedâncias mútuas entre as fo
e as cargas.

Chamamos de corrente equivalente de carga $\dot{I}_{L_k}$,
soma das correntes das linhas, condensadores síncronos e cargas
barra k.

Por exemplo, para um sistema com duas fontes e
as cargas fig. 2.5 tem-se que:-

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{L_1} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{L_2} - \dot{U}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{G_1-G_1} & \dot{Z}_{G_1-G_2} & \dot{Z}_{G_1-L_1} & \dot{Z}_{G_1-L_2} \\ \dot{Z}_{G_2-G_1} & \dot{Z}_{G_2-G_2} & \dot{Z}_{G_2-L_1} & \dot{Z}_{G_2-L_2} \\ \dot{Z}_{L_1-G_1} & \dot{Z}_{L_1-G_2} & \dot{Z}_{L_1-L_1} & \dot{Z}_{L_1-L_2} \\ \dot{Z}_{L_2-G_1} & \dot{Z}_{L_2-G_2} & \dot{Z}_{L_2-L_1} & \dot{Z}_{L_2-L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \\ \dot{I}_{L_1} \\ \dot{I}_{L_2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



F.g. 2.5 - Sistema com duas fontes e duas cargas

2.2.c.2. - Transformação para forma 2

Como o resultado final deve envolver somente potências de geração, as correntes equivalentes de carga, nas equações da forma 1 devem ser substituídas.

Considera-se que cada corrente equivalente de ca
ga (soma das correntes de carga, de linha e dos condensadores sí
cronos), seja uma fração complexa constante da corrente equival
te de carga total.

Define-se a corrente equivalente total de carga c
mo sendo

$$\dot{I}_L = \sum_k \dot{I}_{L_k} \qquad (2.$$

Portanto, a corrente equivalente de carga na bar
k será:-

$$\dot{I}_{L_k} = \dot{\ell}_k \dot{I}_L \qquad (2.$$

Onde:-

$\dot{\ell}_k$ = um fator de proporcionalidade complexa.

Tomando como exemplo inicialmente o sistema most
do na fig. 2.5, tem-se:-

$$\dot{I}_{L_1} = \dot{\ell}_1 \dot{I}_L$$

$$\dot{I}_{L_2} = \dot{\ell}_2 \dot{I}_L \qquad (2.$$

A matriz de corrente da equação 2.5 fica altera
para a matriz 2.8 pela substituição das relações (2.7):-

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2}, \\ \dot{I}_{L_1} \\ \dot{I}_{L_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} \qquad (2.$$

Na forma matricial, pela aplicação de matriz de transformação (Vide anexo 2A), as relações de correntes podem ser escritas:-

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \\ \dot{I}_{L_1} \\ \dot{I}_{L_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_1 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \\ \dot{I}_{L} \end{bmatrix} \qquad (2.10)$$

Portanto as correntes da forma 1 relacionam-se com as correntes da forma 2 pela matriz de transformação $\left[\dot{C}_2^1\right]$.

No exemplo em questão:-

$$\left[\dot{C}_2^1\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_1 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_2 \end{bmatrix} \text{ e } \left[\dot{C}_2^1\right]_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_1 & \dot{\ell}_2 \end{bmatrix} \qquad (2.11)$$

A nova matriz de impedância é dada, segundo a expressão 2A.3 (Vide anexo 2A), por:

$$\left[\dot{Z}_2\right] = \left[\dot{C}_2^1\right]_t \left[\dot{Z}_1\right] . \left[\dot{C}_2^1\right]$$

$$\left[\dot{z}_1\right]\left[C_2^1\right] = \begin{bmatrix} \dot{z}_{G_1-G_1} & \dot{z}_{G_1-G_2} & \dot{z}_{G_1-L_1} & \dot{z}_{G_1-L_2} \\ \dot{z}_{G_2-G_1} & \dot{z}_{G_2-G_2} & \dot{z}_{G_2-L_1} & \dot{z}_{G_2-L_2} \\ \dot{z}_{L_1-G_1} & \dot{z}_{L_1-G_2} & \dot{z}_{L_1-L_1} & \dot{z}_{L_1-L_2} \\ \dot{z}_{L_2-G_1} & \dot{z}_{L_2-G_2} & \dot{z}_{L_2-L_1} & \dot{z}_{L_2-L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_1 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_2 \end{bmatrix}$$

$$\left[\dot{z}_1\right]\left[C_2^1\right] = \begin{bmatrix} \dot{z}_{G_1-G_1} & \dot{z}_{G_1-G_2} & (\dot{\ell}_1\dot{z}_{G_1-L_1} + \dot{\ell}_2\dot{z}_{G_1-L_2}) \\ \dot{z}_{G_2-G_1} & \dot{z}_{G_2-G_2} & (\dot{\ell}_1\dot{z}_{G_2-L_1} + \dot{\ell}_2\dot{z}_{G_2-L_2}) \\ \dot{z}_{L_1-G_1} & \dot{z}_{L_1-G_2} & (\dot{\ell}_1\dot{z}_{L_1-L_1} + \dot{\ell}_2\dot{z}_{L_1-L_2}) \\ \dot{z}_{L_2-G_1} & \dot{z}_{L_2-G_2} & (\dot{\ell}_1\dot{z}_{L_2-L_1} + \dot{\ell}_2\dot{z}_{L_2-L_2}) \end{bmatrix}$$

$$\left[\dot{z}_2\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_1 & \dot{\ell}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_{G_1-G_1} & \dot{z}_{G_1-G_2} & (\dot{\ell}_1\dot{z}_{G_1-L_1} + \dot{\ell}_2\dot{z}_{G_1-G_2}) \\ \dot{z}_{G_2-G_1} & \dot{z}_{G_2-G_2} & (\dot{\ell}_1\dot{z}_{G_2-L_1} + \dot{\ell}_2\dot{z}_{G_2-L_2}) \\ \dot{z}_{L_1-G_1} & \dot{z}_{L_1-G_2} & (\dot{\ell}_1\dot{z}_{L_1-L_1} + \dot{\ell}_2\dot{z}_{L_1-L_2}) \\ \dot{z}_{L_2-G_1} & \dot{z}_{L_2-G_2} & (\dot{\ell}_1\dot{z}_{L_2-L_1} + \dot{\ell}_2\dot{z}_{L_2-L_2}) \end{bmatrix}$$

$$\dot{Z}_2 = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{G_1-G_1} & \dot{Z}_{G_1-G_2} & \dot{a}_1 \\ \dot{Z}_{G_2-G_1} & \dot{Z}_{G_2-G_2} & \dot{a}_2 \\ \dot{b}_1 & \dot{b}_2 & \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

onde: -

$$\dot{a}_1 = \dot{\ell}_1 \dot{Z}_{G_1-L_1} + \dot{\ell}_2 \dot{Z}_{G_1-L_2}$$

$$\dot{a}_2 = \dot{\ell}_1 \dot{Z}_{G_2-L_1} + \dot{\ell}_2 \dot{Z}_{G_2-L_2}$$

$$\dot{b}_1 = \dot{\ell}_1 \dot{Z}_{L_1-G_1} + \dot{\ell}_2 \dot{Z}_{L_2-G_2}$$

$$\dot{b}_2 = \dot{\ell}_1 \dot{Z}_{L_1-G_2} + \dot{\ell}_2 \dot{Z}_{L_2-G_1}$$

$$\dot{w} = \dot{\ell}_1 Z_{L_1-L_1} \dot{\ell}_1 + \dot{\ell}_1 Z_{L_1-L_2} \dot{\ell}_2 + \dot{\ell}_2 Z_{L_2-L_1} \dot{\ell}_1 + \dot{\ell}_2 Z_{L_2-L_2} \dot{\ell}_2$$

A nova matriz de tensões é dada, conforme a expressão 2A.2 (Vide anexo 2A), por: -

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2^1 \end{bmatrix}_t \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\ell}_1 & \dot{\ell}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{L_1} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{L_2} - \dot{U}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_L - \dot{U}_R \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\dot{\ell}_1(\dot{U}_{L_1} - \dot{U}_R) + \dot{\ell}_2(\dot{U}_{L_2} - \dot{U}_R) = \dot{\ell}_1\dot{U}_{L_1} + \dot{\ell}_2\dot{U}_{L_2} - (\dot{\ell}_1 + \dot{\ell}_2)\,\dot{U}_R$$

Sendo: -

$$\dot{\ell}_1\dot{U}_{L_1} + \dot{\ell}_2\dot{U}_{L_2} = \dot{U}_L$$

e

$$\dot{\ell}_1 + \dot{\ell}_2 = 1$$

logo:-

$$\dot{\ell}_1\,(\dot{U}_{L_1} - \dot{U}_R) + \dot{\ell}_2\,(\dot{U}_{L_2} - \dot{U}_R) = \dot{U}_L - \dot{U}_R$$

De acordo com 2.9, 2.12 e 2.13 a equação 2.5 f transformada para a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_L - \dot{U}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{G_1-G_1} & \dot{Z}_{G_1-G_2} & \dot{a}_1 \\ \dot{Z}_{G_2-G_1} & \dot{Z}_{G_2-G_2} & \dot{a}_2 \\ \dot{b}_1 & \dot{b}_2 & \dot{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} \qquad (2.$$

Portanto, pela substituição das relações 2.7 equação 2.5 da forma, obtém-se a equação da forma 2 (para o ex plo, equação (2.14)), na qual as variáveis são as correntes de ração e a corrente equivalente total de carga $\dot{I}_L$.

Para um caso mais geral, em que a ordem das fon são expressas pelos subíndices m e n e as cargas por s e k, a e ção da forma 2 pode ser escrita da forma: -

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{G_m} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_L - \dot{U}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{G_m} - G_n & \dot{a}_m \\ \dot{b}_n & \dot{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_n} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} \qquad (2.15)$$

Onde:-

$$\begin{aligned} \dot{a}_m &= \dot{\ell}_k \cdot \dot{z}_{G_m} - L_K \\ \dot{b}_n &= \dot{\ell}_s \cdot \dot{z}_{L_s} - G_n \\ \dot{W} &= \dot{\ell}_s \cdot \dot{z}_{L_s} - L_k \cdot \dot{\ell}_k \\ U_L &= \dot{\ell}_s \dot{V}_{L_s} \end{aligned} \qquad (2.16)$$

Após a transformação, o circuito equivalente da fig. 2.4 ficará substituído pelo circuito equivalente da fig.2.6

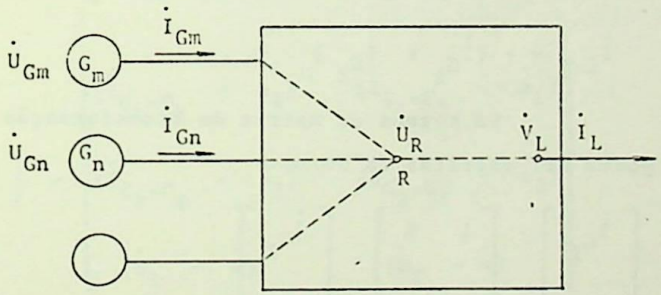


Fig. 2.6 - Circuito Equivalente, forma 2

O ponto L de carga não existe no network real e consequentemente ele se refere a um ponto hipotético de carga.

2.2.c.3 - Transformação para a forma 3

Como foi mostrado na transformação da forma 1 a forma 2, as correntes equivalentes de carga $\dot{I}_{L_k}$ das barras foram substituídas por uma corrente equivalente de carga total $\dot{I}$

Nesta transformação para a forma 3, será feita substituição de $\dot{I}_L$ em termos das correntes de geração, baseando no fato de que a soma das correntes deve ser igual ao oposto soma das correntes equivalentes de carga.

$$\sum_n \dot{I}_{G_n} = - \dot{I}_L \qquad (2$$

Para o sistema exemplo, fig. 2.5

$$\dot{I}_{G_1} = \dot{I}_{G_1}$$

$$\dot{I}_{G_2} = \dot{I}_{G_2} \qquad (2$$

$$\dot{I}_L = - (\dot{I}_{G_1} + \dot{I}_{G_2})$$

Em termos de matriz de transformação as relações 2.18 podem ser escritas da forma:-

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \end{bmatrix} \qquad (2$$

Portanto, as correntes da forma 2 relacionam-se com as correntes da forma 3 pela matriz de transformação $\left[C_3^2\right]$

Para o exemplo em questão: -

$$\left[\dot{C}_3^2\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \left[\dot{C}_3^2\right]_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

A nova matriz de impedância, segundo a expressão 2A.3 (Anexo 2A), é dada por:-

$$\left[\dot{Z}_3\right] = \left[\dot{C}_3^2\right]_t \left[\dot{Z}_2\right] \left[\dot{C}_3^2\right] \tag{2.21}$$

$$\left[\dot{Z}_2\right]\left[\dot{C}_3^2\right] = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{G_1-G_1} & \dot{Z}_{G_1-G_2} & \dot{a}_1 \\ \dot{Z}_{G_2-G_1} & \dot{Z}_{G_2-G_2} & \dot{a}_2 \\ \dot{b}_1 & \dot{b}_2 & \dot{w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\left[\dot{Z}_2\right]\left[\dot{C}_3^2\right] = \begin{bmatrix} (\dot{Z}_{G_1-G_1} - \dot{a}_1) & (\dot{Z}_{G_1-G_2} - \dot{a}_1) \\ (\dot{Z}_{G_2-G_1} - \dot{a}_2) & (\dot{Z}_{G_2-G_2} - \dot{a}_2) \\ (\dot{b}_1 - \dot{w}) & (\dot{b}_2 - \dot{w}) \end{bmatrix}$$

$$\left[\dot{Z}_3\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\dot{Z}_{G_1-G_1} - \dot{a}_1) & (\dot{Z}_{G_1-G_2} - \dot{a}_1) \\ (\dot{Z}_{G_2-G_1} - \dot{a}_2) & (\dot{Z}_{G_2-G_2} - \dot{a}_2) \\ (\dot{b}_1 - \dot{w}) & (\dot{b}_2 - \dot{w}) \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

A nova matriz de tensões, segundo 2A.2 (Anexo 2 ficará da forma:-

$$\left[\dot{U}_3\right] = \left[C_3^2\right]_t \left[\dot{U}_2\right]$$

$$\left[\dot{U}_3\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_R \\ \dot{U}_L - \dot{U}_R \end{bmatrix}$$

$$\left[\dot{U}_3\right] = \begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_L \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_L \end{bmatrix} \qquad (2.$$

Pela substituição das expressões 2.19, 2.22 e 2 na equação da forma 3 tem-se:-

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_L \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\dot{Z}_{G_1-G_1} - \dot{a}_1 - \dot{b}_1 + \dot{w}) & (\dot{Z}_{G_1-G_2} - \dot{a}_1 - \dot{b}_2 + \dot{w}) \\ (\dot{Z}_{G_2-G_1} - \dot{a}_2 - \dot{b}_1 + \dot{w}) & (\dot{Z}_{G_2-G_2} - \dot{a}_2 - \dot{b}_2 + \dot{w}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \end{bmatrix} \qquad (2.$$

ou ainda:-

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_L \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{G_1} \\ \dot{I}_{G_2} \end{bmatrix} \qquad (2.$$

Generalizando, a equação da forma 3 pode ser es ta da seguinte maneira: -

$$\left[\dot{U}_3\right] = \left[\dot{Z}_3\right]\left[\dot{I}_3\right] \tag{2.26}$$

ou seja

$$\left[\dot{U}_{G_m} - \dot{U}_L\right] = \left[\dot{Z}_{G_m-G_n} - \dot{a}_m - \dot{b}_n + \dot{W}\right]\left[\dot{I}_{G_m}\right] \tag{2.27}$$

ou ainda

$$\left[\dot{U}_{G_m} - \dot{U}_L\right] = \left[\dot{Z}_{mn}\right]\left[\dot{I}_{G_m}\right] \tag{2.28}$$

onde:-

$$\left[\dot{Z}_{mn}\right] = \left[\dot{Z}_{G_m - G_n} - \dot{a}_m - \dot{b}_n + \dot{W}\right] \tag{2.29}$$

$$\left[\dot{C}_3^2\right] = \left[\begin{array}{c} 1 \\ t_n \end{array}\right] \tag{2.30}$$

$t_n = -1$ para todos os valores de n.

O circuito equivalente da forma 2, fig. 2.6, pode ser então modificado para um circuito equivalente da forma 3, pela substituição da corrente equivalente de carga total $\dot{I}_L$ em termos de correntes de geração $\dot{I}_{G_m}$. Fig. 2.7.

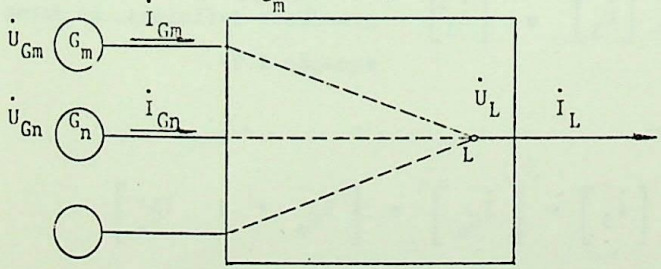


Fig. 2.7 - Circuito Equivalente - forma 3

O circuito equivalente da fig. 2.7 não pode ser apresentado no analisador de circuito, devido ao fato das impedâncias mútuas não serem simétricas, $\dot{Z}_{mn} \neq \dot{Z}_{nm}$, porém as perdas do circuito equivalente dessa forma 3 correspondem às perdas do circuito original.

2.2.d - Fórmula das Perdas

2.2.d.1 - Desenvolvimento matemático

As perdas para o circuito equivalente da forma 3, fig. 2.7, podem ser dadas pela expressão:-

$$\dot{P}_L = \left[\dot{I}_3\right]\left[\dot{U}_3\right] \qquad (2.$$

A parte real das perdas será:-

$$P_L = R\left[\dot{I}_3\right]\left[\dot{U}_3\right]$$

$$P_L = R\left[\dot{I}_3\right]\left[\dot{Z}_3\right]\left[\dot{I}_3\right] \qquad (2.$$

Onde:-

P_L = parte real da potência total de perdas

$\left[\dot{I}_3\right]$, $\left[\dot{V}_3\right]$ e $\left[\dot{Z}_3\right]$ = grandezas definidas, na forma 3 equação 2.27

Sendo:-

$$\left[\dot{I}_3\right] = \left[\dot{I}_{G_n}\right] = \left[I'_{G_n} + j\ I''_{G_n}\right], \qquad (2.$$

a equação 2.25, do exemplo, ficará da forma:-

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{G_1} - \dot{U}_L \\ \dot{U}_{G_2} - \dot{U}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_{G_1} + j\, I''_{G_1} \\ I'_{G_2} + j\, I''_{G_2} \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

Sendo:-

$$\left[\dot{Z}_{mn}\right] = \left[\dot{Z}_{G_m} - G_n - \dot{a}_m - \dot{b}_n + \dot{w}\right] \tag{2.29}$$

$$\left[\dot{Z}_{mn}\right] = \left[R_{mn} + j\, X_{mn}\right] \tag{2.35}$$

$$\left[\dot{U}_3\right] = \begin{bmatrix} (R_{11} + j\, X_{11}) & (R_{12} + j\, X_{12}) \\ (R_{21} + j\, X_{21}) & (R_{22} + j\, X_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_{G_1} + j\, I''_{G_1} \\ I'_{G_2} + j\, I''_{G_2} \end{bmatrix}$$

$$\left[\dot{U}_3\right] = \begin{bmatrix} (R_{11} I'_{G_1} + R_{12} I'_{G_2} - X_{11} I''_{G_1} - X_1 I''_{G_2}) + \\ (R_{21} I'_{G_1} + R_{22} I'_{G_2} - X_{21} I''_{G_1} - X_{22} I''_{G_2}) + \\ \qquad + j(R_{11} I''_{G_1} + R_{12} I''_{G_2} + X_{11} I'_{G_1} + X_{12} I'_{G_2}) \\ \qquad + j(R_{21} I''_{G_1} + R_{22} I''_{G_2} + X_{22} I'_{G_1} + X_{22} I'_{G_2}) \end{bmatrix}$$

$$P_L = R\left[\dot{I}_3\right]\left[\dot{U}_3\right] = I'_{G_1} R_{11} I'_{G_1} + I'_{G_1} R_{12} I'_{G_2} - I'_{G_1} X_{11} I''_{G_1} -$$

$$- I'_{G_1} X_{12} I''_{G_2} + I''_{G_1} R_{11} I''_{G_1} + I''_{G_1} R_{12} I''_{G_2} +$$

$$+ I''_{G_1} X_{11} I'_{G_1} + I''_{G_1} X_{12} I'_{G_2} + I'_{G_2} R_{21} I'_{G_1} +$$

$$+ I'_{G_2} R_{22} I'_{G_2} - I'_{G_2} X_{21} I''_{G_1} - I'_{G_2} X_{22} I''_{G_2} +$$

$$+ I''_{G_2} R_{21} I''_{G_1} + I''_{G_2} R_{22} I''_{G_2} + I''_{G_2} X_{21} I'_{G_1} +$$

$$+ I''_{G_2} X_{22} I'_{G_2} \qquad (2.3$$

Combinando os termos:-

$$P_L = I'_{G_1} R_{11} I'_{G_1} + 2 I'_{G_1} \left(\frac{R_{12}+R_{21}}{2}\right) I'_{G_2} + I'_{G_2} R_{22} I'_{G_2} +$$

$$+ I''_{G_1} R_{11} I''_{G_1} + 2 I''_{G_1} \left(\frac{R_{12}+R_{21}}{2}\right) I''_{G_2} + I''_{G_2} R_{22} I''_{G_2} -$$

$$- 2 I'_{G_1} \left(\frac{X_{12}-X_{21}}{2}\right) I''_{G_2} - 2 I'_{G_2} \left(\frac{X_{21}-X_{12}}{2}\right) I''_{G_1} \qquad (2.$$

Pode-se notar que somente a parte simétrica e anti-simétrica, (Vide Anexo 2B), respectivamente, das resistênci e das reatâncias da forma 3, contribuem para o cálculo da potênc real de perdas.

Para o caso geral em que as fontes são represe das por m e n, tem-se:-

$$\left[\dot{Z}_3\right]\left[\dot{I}_3\right] = \left[\dot{Z}_{mn}\right]\left[I'_{G_n} + j\, I''_{G_n}\right]$$

$$\left[\dot{Z}_3\right]\left[\dot{I}_3\right] = \left[(R_{mn}\, I'_{G_n} - X_{mn}\, I''_{G_n}) + j(R_{mn} I''_{G_n} + X_{mn}\, I'_{G_n})\right]$$

$$P_1 = R\left[I_3\right]\left[\dot{Z}_3\right]\left[\dot{I}_3\right] \qquad (2.32)$$

$$P_L = R\left[I'_{G_m} - jI''_{G_m}\right]\left[(R_{mn}\, I'_{G_n} - X_{mn} I''_{G_n}) + j(R_{mn} I''_{G_n} + X_{mn}\, I'_{G_n})\right]$$

$$P_L = \left[I'_{G_m} R_{mn}\, I'_{G_n} - I'_{G_m} X_{mn}\, I''_{G_n} + I''_{G_m} R_{mn}\, I''_{G_n} + I''_{G_m} X_{mn}\, I'_{G_n}\right]$$

$$P_L = \left[I'_{G_m} R_{mn}\, I'_{G_n} + I''_{G_m} R_{mn} I''_{G_n} - 2\, I'_{G_m} \left(\frac{X_{mn} - X_{nm}}{2}\right) I''_{G_n}\right]$$

$$P_L = \left[I'_{G_m} \left(\frac{R_{mn}+R_{nm}}{2}\right) I'_{G_n} + I''_{G_m} \left(\frac{R_{mn}+R_{nm}}{2}\right) I''_{G_n} - 2X'_m \left(\frac{X_{mn} - X_{nm}}{2}\right) I''_{G_n}\right]$$

(2.38)

Da equação (2.29):-

$$\left[\dot{Z}_{mn}\right] = \left[\dot{Z}_{G_m - G_n} - \dot{a}_m - \dot{b}_n + \dot{W}\right]$$

A parte real simétrica de $\dot{Z}_{mn}$ é dada por:-

$$\left[\frac{R_{mn}+R_{nm}}{2}\right] = R\,\frac{1}{2}\left[\dot{Z}_{mn} + \dot{Z}_{nm}\right]$$

$$= R\,\frac{1}{2}\left[\dot{Z}_{G_m - G_n} - \dot{a}_m - \dot{b}_n + \dot{W} + \dot{Z}_{G_n - G_n} - \dot{a}_n - \dot{b}_m + \dot{W}\right]$$

$$= R\,\frac{1}{2}\left[\dot{Z}_{G_m - G_n} + \dot{Z}_{G_n - G_m} - (\dot{a}_m + \dot{b}_m) - (\dot{a}_n + \dot{b}_n) + 2\,\dot{W}\right]$$

$$= \left[R_{G_m - G_n} - D_m - D_n + W'\right] \qquad (2.39)$$

Onde:-

$$D_m = R \left(\frac{\dot{a}_m + \dot{b}_m}{2} \right)$$

$$W' = R\, W'$$ (2.4

Das relações 1.16, forma 2, tem-se que:-

$$\dot{a}_m = \dot{\ell}_k \cdot \dot{z}_{G_m - L_k}$$

$$\dot{b}_n = \dot{\ell}_s \cdot \dot{z}_{L_s - G_n}$$ (1.1

Então:-

$$\dot{b}_m = \dot{\ell}_k \cdot \dot{z}_{L_k - G_m}$$

$$\dot{a}_m + \dot{b}_m = \dot{z}_{G_m - L_k} \cdot \dot{\ell}_k + \dot{z}_{L_k - G_m} \cdot \dot{\ell}_k$$

mas como:-

$$\dot{z}_{G_m - L_k} = \dot{z}_{L_k - G_m}$$

$$\dot{a}_m + \dot{b}_m = \dot{z}_{L_k - G_m} (\dot{\ell}_k + \dot{\ell}_k)$$

$$\dot{a}_m + \dot{b}_m = 2\, \dot{z}_{L_k - G_m} \cdot \ell'_k$$

onde:-

$$\ell'_k = R\, \dot{\ell}_k$$

Logo a expressão 2.40 ficará:-

$$D_m = R \left(\frac{\dot{a}_m + \dot{b}_m}{2} \right) = \dot{R}_{L_k - G_m} \cdot \ell'_k$$ (2

Da equação 2.16 tem-se que:-

$$\dot{W} = \dot{\ell}_s \dot{Z}_{L_s} - L_k \dot{\ell}_k \qquad (2.16)$$

Logo:-

$$W' = R \dot{\ell}_s \cdot \dot{Z}_{L_s} - L_k \cdot \dot{\ell}_k \qquad (2.42)$$

Por esta expressão, 2.42, é quase impossível o cálculo de W', pois esta necessita de todas as impedâncias $\dot{Z}_{L_k-L_k}$. Então, para um sistema de L barras de cargas tem-se L^2 impedâncias. Existe um outro método para o cálculo de W', mais curto, que será posteriormente mostrado.

A parte "imaginária" anti-simétrica de Z_{mn} é dado por:-

$$\left[\frac{X_{mn}-X_{nm}}{2}\right] = I\left[\frac{\dot{Z}_{mn}-\dot{Z}_{nm}}{2}\right]$$

$$= I\left[\dot{Z}_{G_m-G_n} - \dot{a}_m - \dot{b}_n + \dot{W} - \dot{Z}_{G_n-G_m} + \dot{a}_n + \dot{b}_m - \dot{W}\right]$$

$$= I\left[\frac{-(\dot{a}_m - \dot{b}_m)+(\dot{a}_n - \dot{b}_n)}{2}\right] \qquad (2.43)$$

Onde I indica a parte imaginária.

Da equação 2.16

$$\dot{a}_m = \dot{Z}_{G_m-L_k} \cdot (\ell'_k - j\,\ell''_k)$$

$$\dot{b}_m = \dot{Z}_{L_k-G_m} \cdot (\ell'_k - j\,\ell''_k)$$

$$\dot{a}_n = \dot{Z}_{G_n - L_k} \cdot (\ell'_k + j\,\ell''_k)$$

$$\dot{b}_n = \dot{Z}_{L_k - G_n} \cdot (\ell'_k - j\,\ell''_k)$$

$$I\,(\dot{a}_m - \dot{b}_m) = 2\,R_{G_m - L_k} \cdot \ell''_k \qquad (2.44$$

$$I\,(\dot{a}_n - \dot{b}_n) = 2\,R_{G_n - L_k} \cdot \ell''_k$$

Substituindo na expressão 2.43:-

$$\left[\frac{X_{mn} - X_{nm}}{2}\right] = \left[\frac{-2\,R_{G_m-L_k} \cdot \ell''_k + 2\,R_{G_n-L_k} \cdot \ell''_k}{2}\right]$$

$$= \left[-2\,R_{G_m-L_k} \cdot \ell''_k + R_{G_n-L_k} \cdot \ell''_k\right]$$

$$= \left[-E_m + E_n\right] \qquad (2.4$$

Onde:-

$$E_m = R_{G_m-L_k} \cdot \ell''_k \qquad (2.4$$

$$E_n = R_{G_n-L_k} \cdot \ell''_k$$

Pela substituição da expressão 2.45 em 2.38 a p
da real P_L será dada por:-

$$P_L = \left[I'_{Gm} R_{mn} I'_{Gn} + I''_{Gm} R_{mn} I''_{Gn} + 2\,I'_{Gm}\,(E_n - E_m)\,I''_{Gn}\right] \qquad (2.4$$

Onde:-

$$R_{mn} = R_{G_m-G_n} - D_m - D_n + W'$$

$$D_m = R_{G_m-L_k} \cdot \ell'_k$$

$$E_m = R_{G_m-L_k} \cdot \ell''_k$$

2.2.d.2 - Transformação das Correntes de Geração em Termos de Potência de Geração

Como já foi anteriormente ventilado, a expressão das perdas deve ter como variáveis as potências de geração, que são grandezas usualmente utilizadas no despacho de carga. Então necessário se torna a transformação da expressão 2.47 em termos de potências de geração.

Sejam:-

θ_m e θ_n = ângulos das tensões de geração m e n

P_m e P_n = potências reais de geração

Q_m e Q_n = potências reativas de geração

U_m e U_n = magnitudes das tensões de geração

Da fig. 2.8 tem-se que:-

$$I'_m = \frac{1}{U_m} (P_m \cos \theta_m + Q_m \operatorname{sen} \theta_m) \qquad (2.48)$$

$$I''_m = \frac{-1}{U_m} (- P_m \operatorname{sen} \theta_m + Q_m \cos \theta_m) \qquad (2.49)$$

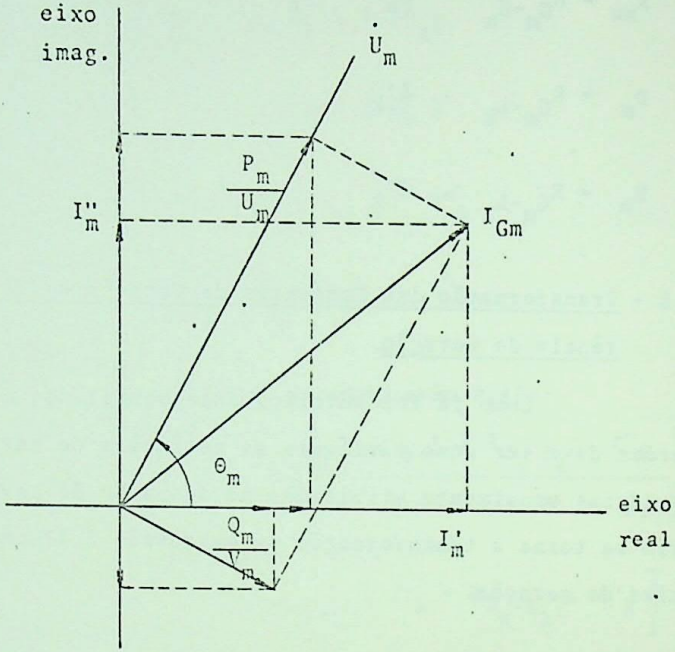


Fig. 2.8 - Relações Corrente-Potência

Para eliminar Q_m como variável, toma-se a ra

Q_m/P_m como um valor constante T_m.

As equações ficam:-

$$I'_m = \frac{1}{U_m} (\cos \Theta_m + T_m \text{ sen } \Theta_m) P_m \qquad (2.$$

$$I''_m = - \frac{1}{U_m} (- \text{ sen } \Theta_m + T_m \cos \Theta_m) P_m \qquad (2.$$

Substituindo as relações 2.50 e 2.51 na expres

2.47, tem-se:-

$$P_L = \left[P_m \cdot \frac{1}{U_m} (\cos \theta_m + T_m \operatorname{sen} \theta_m) R_{mn} (\cos\theta_n + T_n \operatorname{sen}\theta_n) \cdot \frac{1}{U_n} \cdot P_n + \right.$$

$$+ P_m \cdot \frac{1}{U_m} (-\operatorname{sen}\theta_m + T_m \cos\theta_m) R_{mn} (-\operatorname{sen}\theta_n + T_n \cos\theta_n) \frac{1}{U_n} \cdot P_n -$$

$$\left. - 2 P_m \cdot \frac{1}{U_m} (\cos\theta_m + T_m \operatorname{sen}\theta_m)(E_m - E_n)(-\operatorname{sen}\theta_n + T_n \cos\theta_n) \frac{1}{U_n} \cdot P_n \right]$$

$$P_L = \left[P_m \cdot \frac{1}{U_m U_n} (\cos\theta_m \cos\theta_n + T_m \cos\theta_m \operatorname{sen}\theta_n + T_m \operatorname{sen}\theta_m \cos\theta_n + \right.$$

$$+ T_m T_n \operatorname{sen}\theta_m \operatorname{sen}\theta_n) R_{mn} \cdot P_n +$$

$$+ P_m \cdot \frac{1}{U_m U_n} (\operatorname{sen}\theta_m \operatorname{sen}\theta_n - T_n \operatorname{sen}\theta_m \cos\theta_n - T_m \cos\theta_m \operatorname{sen}\theta_n +$$

$$+ T_m T_n \cos\theta_m \cos\theta_n) R_{mn} P_n -$$

$$\left. - 2 P_m \frac{1}{U_m U_n} (-\cos\theta_m \operatorname{sen}\theta_n + T_n \cos\theta_m \cos\theta_n - T_m \operatorname{sen}\theta_m \operatorname{sen}\theta_n + \right.$$

$$\left. + T_m T_n \operatorname{sen}\theta_m \cos\theta_n)(E_m - E_n) P_n \right]$$

$$P_L = \left[P_m \cdot \frac{1}{U_m U_n} (\cos\theta_m \cos\theta_n + \operatorname{sen}\theta_m \operatorname{sen}\theta_n + T_m T_n \cos\theta_m \cos\theta_n + \right.$$

$$+ T_m T_n \operatorname{sen}\theta_m \operatorname{sen}\theta_n + T_m \operatorname{sen}\theta_m \cos\theta_n - T_m \cos\theta_m \operatorname{sen}\theta_n -$$

$$- T_n \operatorname{sen}\theta_m \cos\theta_n + T_n \cos\theta_m \operatorname{sen}\theta_n) R_{mn} P_n -$$

$$\left. - 2 P_m \cdot \frac{1}{U_m U_n} (-\cos\theta_m \operatorname{sen}\theta_n + T_n \cos\theta_m \cos\theta_n - T_m \operatorname{sen}\theta_m \operatorname{sen}\theta_n + \right.$$

$$+ T_m T_n \operatorname{sen}\theta_m \cos\theta_n)(E_m - E_n) P_n\Big]$$

$$P_L = \Big[P_m \cdot \frac{1}{U_m U_n} \Big\{ (1 + T_m \cdot T_n)\cos(\theta_m - \theta_n) + (T_m - T_n)\operatorname{sen}$$

$$(\theta_m - \theta_n) \quad R_{mn} P_n - 2 P_m \cdot \frac{1}{2U_m U_n} \quad (1 + T_m T_n)\operatorname{sen}(\theta_m - \theta_n)$$

$$+(T_n - T_m) \cos (\theta_m - \theta_n) \Big\} (E_m - E_n) P_n \Big] \qquad (2.5$$

fazendo:-

$$K_{mn} = \frac{1}{U_m U_n} \Big\{ (1+T_m \cdot T_n)\cos(\theta_m - \theta_n) + (T_m - T_n)\operatorname{sen}(\theta_m - \theta_n)$$

(2.5

$$H_{mn} = \frac{1}{U_m U_n} \Big\{ (1+T_m \quad T_n)\operatorname{sen}(\theta_m - \theta_n) + (T_n - T_m)\cos(\theta_m - \theta_n)$$

Então a equação 2.52 pode ser escrita na forma:-

$$P_L = \Big[P_m K_{mn} R_{mn} P_n - P_m H_{mn} (E_m - E_n) P_n\Big] \qquad (2.5$$

$$P_L = \Big[P_m\Big]\Big[K_{mn} R_{mn} - H_{mn} (E_m - E_n)\Big]\Big[P_n\Big] \qquad (2.5$$

fazendo:-

$$\Big[K_{mn} R_{mn} - H_{mn} (E_m - E_n)\Big] = \Big[B_{mn}\Big] \qquad (2.5$$

tem-se finalmente que:-

$$P_L = \Big[P_m\Big]\Big[B_{mn}\Big]\Big[P_n\Big] \qquad (2.5$$

ou na forma de somatório:-

$$P_L = \sum_m \sum_n P_m \; B_{mn} \; P_n \qquad (2.58)$$

Onde, B_{mn}, segundo as relações 2.56 e 2.39:-

$$B_{mn} = K_{mn} R_{mn} - H_{mn} (E_m - E_n)$$

$$B_{mn} = K_{mn} (R_{G_m - G_n} - D_n - D_m + W') - H_{mn} (E_m - E_n)$$

$$B_{mn} = K_{mn} (R_{G_m - G_n} - D_n - D_m) + K_{mn} W' - H_{mn} (E_m - E_n)$$

$$B_{mn} = A_{mn} + K_{mn} W' - H_{mn} (E_m - E_n) \qquad (2.59)$$

onde:-

$$A_{mn} = K_{mn} (R_{G_m - G_n} - D_n - D_m) \qquad (2.60)$$

sendo:-

I'_k = parte real da corrente na linha k

R_k = resistência da linha k.

A perda total nas linhas será:-

$$\sum I'^2_k \cdot R_k = \sum_m \sum_n P_m \; B_{mn} \; P_n$$

$$\sum I'^2_k R_k = \sum_m \sum_n P_m A_{mn} P_n + P_m K_{mn} W' P_n - P_m H_{mn} (E_m - E_n) P_n$$

tirando o valor de W', tem-se que:-

$$W' = - \frac{\sum I'^2_k \cdot R_k - \sum_m \sum_n P_m \; A_{mn} \; P_n}{\sum_m \sum_n P_m \; K_{mn} \; P_n} \qquad (2.61)$$

desde que o termo $H_{mn}(E_m - E_n)$ seja desprezado.

$$H_{mn} = \frac{1}{U_m U_n} \left\{ (1 + T_m T_n)\,\mathrm{sen}(\theta_m - \theta_n) + (T_n - T_m)\cos(\theta_m - \theta_n) \right\}$$

e

$$E_m - E_n = R_{G_m - L_k} \cdot \ell''_{ik} - R_{G_n - L_k} \cdot \ell''_{ik}$$

O termo H_{mn} será pequeno desde que $(\theta_m - \theta_n)$ e $(T_n - T_m)$ sejam pequenos.

O termo $E_m - E_n$ será pequeno desde que

$$\sum_k \ell''_{ik} = 0$$

Para a maior parte dos sistemas elétricos, o termo $P_m H_{mn}(E_m - E_n) P_n$ pode ser considerado igual a zero, comparativamente com a precisão da fórmula de perdas. Deve ser considerado quando a diferença de ângulos da geração, com relação às demais partes do sistema se torna muito grande.

Portanto o termo B_{mn}, simplificado, tomará a forma:-

$$B_{mn} = K_{mn} R_{mn} \qquad (2.62)$$

Como foi mostrado, a fórmula das perdas de transmissão pode ser expressa em termos de potências de geração.

$$P_L = \sum_m \sum_n P_m B_{mn} P_n \qquad (2.58)$$

P_m, P_n = potências de geração

B_{mn} = constantes B da fórmula das perdas de transmissão.

2.3 - DESENVOLVIMENTO ALGÉBRICO DO MÉTODO (2)

Da expressão da perda total do sistema em relação às potências de geração

$$P_L = \sum_m \sum_n P_m \; B_{mn} \; P_n \qquad (2.58)$$

tem-se a expressão das Perdas Incrementais de uma instalação genérica n em termos dos coeficientes B, ou seja

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = 2 \sum_m B_{mn} \; P_m \qquad (2.59)$$

Considerando a expressão do custo total de produção da forma polinomial

$$\begin{aligned} C_t = {} & A_{10} + A_{11} P_1 + A_{12} P_1^2 + \ldots + A_{1p} P_1^p + \\ & A_{20} + A_{21} P_2 + A_{22} P_2^2 + \ldots + A_{2p} P_2^p + \\ & \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ & A_{n0} + A_{n1} P_n^1 + A_{n2} P_n^2 + \ldots + A_{np} P_n^p + \\ & \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ & A_{N0} + A_{N1} P_N^1 + A_{N2} P_N^2 + \ldots + A_{Np} P_N^p \end{aligned} \qquad (2.63)$$

O custo incremental de uma instalação genérica n poderá ser expressa por:-

$$\frac{\partial F(P_n)}{\partial P_n} = A_{n1} + 2A_{n2} P_n + \ldots + PA_{np} P_n^{p-1} \qquad (2.64)$$

Substituindo (2.59) e (2.64) na equação do despacho econômico:-

$$\frac{\partial F(P_n)}{\partial P_n} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \lambda$$

Escola Federal de Engenharia BIBLIOTECA

tem-se:-

$$A_{n1} + 2A_{n2} P_n + ... + PA_{np} P_n^{p-1} + 2\lambda \sum_m B_{mn} P_m = \lambda \quad (2.65)$$

onde:- A_{n1}, A_{n2}...., A_{np} são os coeficientes da expressão do custo de produção da instalação n

B_{mn} = coeficientes da expressão das perdas

λ = parâmetro (custo incremental sem perdas)

P = potências de geração (incógnitas)

Uma vez calculados os coeficientes B para uma determinada condição do sistema, e considerando apenas os coeficientes dos termos de até 2º grau da expressão do custo de produção, a expressão 2.65 pode ser escrita na forma

$$A_{n1} + 2A_{n2} P_n + 2\lambda \sum_m B_{mn} P_m = \lambda \quad (2.66)$$

transformando o problema, na resolução de um sistema de equações lineares, para cada valor de λ.

2.4 - DETERMINAÇÃO DO VALOR DE λ NA CONDIÇÃO ECONÔMICA (5)

Uma vez montado o sistema de equações do tipo 2.66 o problema se resume em se determinar o valor de λ na condição econômica, pois a resolução do sistema de equações lineares não oferece maiores dificuldades desde que se tenha o auxílio de um computador digital.

Se as perdas na transmissão não forem consideradas o valor de λ é o valor do custo incremental (Vide Cap. I) e

(2.66) tem-se:-

$$\lambda = \frac{\partial F(P_n)}{\partial P_n} = \Lambda_{n1} + 2\,\Lambda_{n2}\,P_n \qquad (2.67)$$

Portanto para cada instalação associa-se uma curva de λ em função da potência de geração, fig. 2.9.

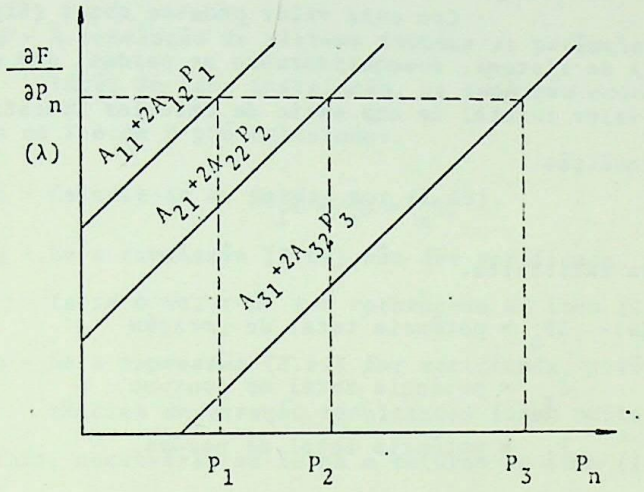


Fig. 2.9 - Custos Incrementais

Somando todas as curvas da fig. 2.9, obtém-se uma única curva fig. 2.10, que fornece o valor de λ em função da potência total de geração do sistema.

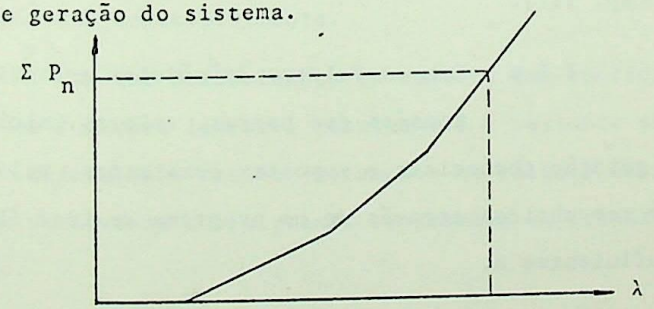


Fig. 2.10 $\Sigma P_n = f(\lambda)$

Sendo desprezadas as perdas de transmissão, a g
ração total do sistema seria igual ao consumo total, cujo valor
considerado conhecido no problema

$$C_t = \Sigma P_n \qquad (2.6$$

Com este valor pode-se obter (fig. 2.10) o val
de λ do sistema, desconsiderando as perdas, que seria adotado co
um valor inicial de uma série de cálculos iterativos a fim de q
a condição

$$\Sigma P_n = C_t + P_L \qquad (2.6$$

seja satisfeita.

Onde:- ΣP_n = potência total de geração

C_t = potência total de consumo

P_L = potência total de perdas.

2.5 - SEQUÊNCIA DE CÁLCULO DO MÉTODO

Em decorrência do exposto nos itens anteriores, u
sequência de cálculo pode ser seguida, como apresentada abaixo,
sobre a qual foram confeccionados alguns programas em FORTRAN (V
de Cap. III).

2.5.a - Com os valores do módulos e ângulos de fase d
tensões das barras, valores iniciais das potênci
de geração conhecidas e supostas constantes, valores estes que p
dem ser obtidos através de um programa de Load-flow, calcula-se
coeficientes B.

2.5.b - Conhecendo-se as potências consumidas e despre

do-se as perdas, por 2.68 tem-se a potência total de geração.

2.5.c - Pela curva fig. 2.10, obtem-se um valor de λ inicial.

2.5.d - Com os valores dos coeficientes B e o valor de λ por 2.66 obtem-se um sistema de equações lineares.

2.5.e - A resolução do sistema fornece as potências de geração de cada instalação, na condição econômica para os valores de λ e de B pré-calculados.

2.5.f - Calcula-se as perdas por (2.58).

2.5.g - Se a expressão (2.69) não for verificada, incrementa-se o valor de λ e retorna-se ao item (2.5 d).

2.5.h - Se a expressão (2.69) for verificada, porém as potências de geração resultantes forem muito diferentes das iniciais, necessário se torna o retorno ao item (2.5 a).

2.6 - COMENTÁRIOS SOBRE O MÉTODO DOS COEFICIENTES B

Apesar dos resultados considerados satisfatórios na aplicação deste método por certas companhias de Eletricidade, convém ressaltar as principais considerações e aproximações realizadas durante o seu desenvolvimento.

Uma vez determinados os valores dos coeficientes B, a resolução das equações lineares resultantes é bastante simples, porém a maior dificuldade reside justamente no cálculo desses valores, que para um sistema muito grande representa um trabalho extremamente longo.

Este método fundamentalmente consiste na aplicação

da fórmula das perdas, da qual por derivação obtem-se a expressão da perda incremental:-

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = 2 \sum B_{mn} P_m \qquad (2.59)$$

um dos termos das equações do despacho econômico. No desenvolvimento da fórmula das perdas uma das suposições básica é considerar um só centro fictício de carga e as correntes equivalentes de carga de cada barra como uma fração complexa constante da corrente equivalente total de carga.

Outras hipóteses simplificativas são:-

a) Considerar o módulo das tensões em todas as barras constantes.

b) As variações dos ângulos de fase dessas tensões muito pequenas.

c) A potência reativa de geração é considerada aproximadamente como a soma de uma componente que varia com a carga do sistema e uma componente que varia com a geração do sistema.

Portanto os coeficientes B calculados são constantes em princípio dentro de um dado estado de carga; eles não são estáveis na prática para dois ou mais estados do sistema.

Com as transformações e manipulações matemáticas, praticamente desaparece o significado físico das constantes, apesar disso a utilização dos mesmos torna-se útil, devido a simplicidade da expressão das perdas incrementais que advêm do emprego dessas constantes.

O método é essencialmente aplicável em sistemas onde há predominância de gerações térmicas e onde não se tem problema de limitações de transporte de energia. No sistema Francês por exemplo, considerando que o norte da França é quase que exclusivamente térmico e que no sul predominam as instalações hidráulicas, a exploração racional das reservas hidráulicas implica, em certas horas, em uma utilização importante das possibilidades de trânsito das linhas. Além disso a adaptação da configuração do sistema às condições do momento é essencialmente variável tornando ineficiente a utilização do método dos coeficientes B.

ANEXO 2.A - CONCEITO DE TRANSFORMAÇÃO

Na análise das perdas de transmissão, é necessá
que todas as mudanças e transformações no circuito equivalente(
2.4) sejam feitas de tal maneira que as potências de geração,
tências de carga e as perdas de transmissão sejam mantidas cons
tes.

Estas transformações podem ser realizadas atra
de matrizes de transformação $[\dot{C}]$, as quais tornam a análise
gica e sistemática.

A concepção de uma matriz de transformação $[\dot{C}]$
mite que um dado circuito possa ser modificado para um novo cir
to, de tal forma que a potência de geração se mantém constante.

As grandezas pertencentes ao circuito original
rão designadas pelo subíndice 1 e as quantidades pertencentes
novo circuito serão designadas pelo subíndice 2.

Geralme nte considera-se que as correntes $[\dot{I}_1]$
tencentes ao circuito original são transformadas em correntes $[$
pertencentes ao novo circuito pela matriz de transformação $[\dot{C}]$

$$[\dot{I}_1] = [\dot{C}][\dot{I}_2] \qquad (2.$$

Tem-se que:-

$$[\dot{V}_1] = [\dot{Z}_1][\dot{I}_1]$$
$$[\dot{P}_1] = [\dot{V}_1][I_{.1}]$$
$$[\dot{V}_2] = [\dot{Z}_2][\dot{I}_2]$$
$$[\dot{P}_2] = [\dot{V}_2][I_{.2}]$$

Se a potência é mantida constante então:-

$$\left[\dot{P}_1\right] = \left[\dot{P}_2\right]$$

Substituindo

$$\left[\dot{V}_1\right]\left[\dot{I}_1\right] = \left[\dot{V}_2\right]\left[\dot{I}_2\right]$$

$$\left[\dot{V}_1\right]\left[\dot{C}\right]\left[\dot{I}_2\right] = \left[\dot{V}_2\right]\left[\dot{I}_2\right]$$

$$\left[\dot{V}_2\right] = \left[\dot{V}_1\right]\left[\dot{C}\right]$$

Sendo $\left[\dot{C}\right]_t$ a matriz conjugada transposta de $\left[\dot{C}\right]$

$$\left[\dot{V}_2\right] = \left[\dot{C}\right]_t \left[\dot{V}_1\right] \qquad (2.A.2)$$

Sabendo-se que:-

$$\left[\dot{V}_1\right] = \left[\dot{Z}_1\right]\left[\dot{I}_1\right]$$

Substituindo a expressão 2.A.1, tem-se:-

$$\left[\dot{V}_1\right] = \left[\dot{Z}_1\right]\left[\dot{C}\right]\left[\dot{I}_2\right]$$

Multiplicando membro a membro, por $\left[\dot{C}\right]_t$

$$\left[\dot{C}\right]_t \left[\dot{V}_1\right] = \left[\dot{C}\right]_t \left[\dot{Z}_1\right]\left[\dot{C}\right]\left[\dot{I}_2\right]$$

pela expressão 2.A.2 resulta

$$\left[\dot{V}_2\right] = \left[\dot{C}\right]_t \left[\dot{Z}_1\right]\left[\dot{C}\right]\left[\dot{I}_2\right]$$

como:-

$$\left[\dot{V}_2\right] = \left[\dot{Z}_2\right]\left[\dot{I}_2\right] \qquad (2.A.3)$$

$$\left[\dot{Z}_2\right] = \left[C\right]_t\left[\dot{Z}_1\right]\left[\dot{C}\right]$$

ANEXO 2B - PROPRIEDADES MATRICIAIS

De maneira geral, uma matriz $[A]$ pode ser dividida duas matrizes: uma matriz simétrica $[B]$ e uma matriz anti-simétrica $[C]$.

Uma matriz é chamada simétrica, se os mesmos elementos correm em ambos os lados da diagonal principal.

Uma matriz é chamada anti-simétrica se os elementos da diagonal principal são todos iguais a zero e se os mesmos elementos correm em ambos os lados da diagonal principal, porém com sinais contrários.

$$[A] = [B] + [C] \tag{2.}$$

Onde:-

$$[B] = \frac{[A] + [A]_t}{2}$$

$$[C] = \frac{[A] - [A]_t}{2} \tag{2.}$$

ou:-

$$[A_{ij}] = [B_{ij}] + [C_{ij}] \tag{2.}$$

onde:-

$$[B_{ij}] = \frac{[A_{ij}] + [A_{ji}]}{2}$$

$$[C_{ij}] = \frac{[A_{ij}] - [A_{ji}]}{2} \tag{2.}$$

Uma expressão do tipo

$$\left[P\right]\left[A\right]\left[P\right] \text{ ou } \left[P_i\right]\left[A_{ij}\right]\left[P_j\right] \text{ ou } \sum_i \sum_j P_i \, A_{ij} \, P_j \qquad (2.B5)$$

nde os elementos das matrizes $\left[P\right]$ e $\left[A\right]$ são números reais, a atriz $\left[A\right]$ pode ser sempre substituída pela matriz simétrica cor espondente 2.B2.

$$\left[B\right] = \frac{\left[A\right] + \left[A\right]_t}{2} \qquad (2.B2)$$

esde que os elementos da matriz anti-simétrica sejam nulos.

Por exemplo: considerando-se a expressão 2.B5 para i, j=1,2

$$\left[P_i\right]\left[A_{ij}\right]\left[P_j\right] = P_1 \, P_{11} \, P_1 + P_1 A_{12} P_2 + P_2 \, A_{21} \, P_1 + P_2 A_{22} \, P_2 \qquad (2.B6)$$

Substituindo $\left[A_{ij}\right]$ pela sua matriz simétrica, tem-se:

$$\left[P_i\right]\left[A_{ij}\right]\left[P_j\right] = P_1\left(\frac{A_{11} + A_{11}}{2}\right) P_1 + P_1\left(\frac{A_{12} + A_{21}}{2}\right) P_2 +$$

$$+ P_2\left(\frac{A_{21} + A_{12}}{2}\right) P_1 + P_2\left(\frac{A_{22} + A_{22}}{2}\right) P_2 \qquad (2.B7)$$

Desenvolvendo a expressão 2.B7, observa-se facilmente que:

$$\left[P_i\right]\left[A_{ij}\right]\left[P_j\right] = \left[P_i\right]\left[B_{ij}\right]\left[P_j\right] \qquad (2.B8)$$

Substituindo A_{ij} pela sua matriz anti-simétrica, tem-se:

$$\left[P_i\right]\left[A_{ij}\right]\left[P_j\right] = P_1\left(\frac{A_{11} - A_{11}}{2}\right) P_1 + P_1\left(\frac{A_{12} - A_{21}}{2}\right) P_2 +$$

$$+ \; P_2\left(\frac{A_{21} - A_{12}}{2}\right) P_1 + P_2\left(\frac{A_{22} - A_{22}}{2}\right) P_2$$

logo:-

$$\left[P_i\right]\left[C_{ij}\right]\left[P_j\right] = 0 \quad .$$

CAPÍTULO III

RESOLUÇÃO NUMÉRICA DO MÉTODO DOS COEFICIENTES P

Em um estudo, com uma manipulação matemática muito intensa e inúmeras alternativas de condicionamento do problema, como o da operação econômica de sistemas elétricos, a verificação da exatidão dos resultados obtidos, em cada etapa, torna-se uma questão muito delicada. Daí a importância de se ter, para este método, dos coeficientes B, programas que permitam a obtenção de resultados aproximados, com relativa facilidade, a fim de que processos mais avançados possam ser verificados.

Três programas foram confeccionados com este objetivo:-

1. Programa COEFB
2. Programa POTG1
3. Programa POTG2

O programa COEFB é utilizado para o cálculo dos coeficientes B.

Os programas POTG1 e POTG2 são destinados à obtenção das potências de geração, na condição econômica, sendo que, o programa POTG2 é apenas uma versão melhorada do programa POTG1.

3.1 - Programa COEFB

A obtenção dos coeficientes B, de um sistema elétrico para uma determinada condição de operação, denominada "caso base", é conseguida através deste programa por cálculo direto (1).

3.1.a - Equações Utilizadas

Do capítulo anterior, item 2.2 tem-se:-

$$D_m = \ell'_k \cdot R_{L_k} - G_m \qquad (2.41)$$

$$E_m = \ell''_k \cdot R_{G_n} - L_k \qquad (2.46)$$

$$K_{mn} = \frac{1}{V_m V_n} \left[(1 + S_m S_n) \cos(\theta_m - \theta_n) + (S_n - S_m) \operatorname{sen}(\theta_m - \theta_n) \right] \qquad (2.53)$$

$$H_{mn} = \frac{1}{V_m V_n} \left[(1 + S_m S_n) \operatorname{sen}(\theta_m - \theta_n) + (S_n - S_m) \cos(\theta_m - \theta_n) \right] \qquad (2.54)$$

$$A_{mn} = K_{mn} (R_{G_m} - G_n - D_n - D_m) \qquad (2.60)$$

$$W' = \frac{\Sigma R_j \cdot I_j^2 - P_m A_{mn} P_n + P_m H_{mn} (E_m - E_n) P_n}{P_m K_{mn} P_n} \qquad (2.61)$$

$$B_{mn} = A_{mn} + W' K_{mn} - H_{mn} (E_m - E_n) \qquad (2.59)$$

onde:-

$R_{G_m} - G_n$ = Resistência mútua entre os nós de geração m e n em circuito aberto

$R_{L_k} - G_m$ = Resistência mútua entre o nó de consumo K e o de geração m em circuito aberto.

ℓ'_k = parte real da relação: $\frac{\text{corr. equivalente de carga do nó K}}{\text{corr. equiv. total de carga}}$

ℓ''_k = parte imaginária da relação:

$$\frac{\text{corr. equivalente de carga dos nós K}}{\text{corr. equiv. total de carga}}$$

V_m, V_n = magnitudes das tensões nos nós m e n, respectivamente.

S_m, S_n = relações características entre as potências reativas

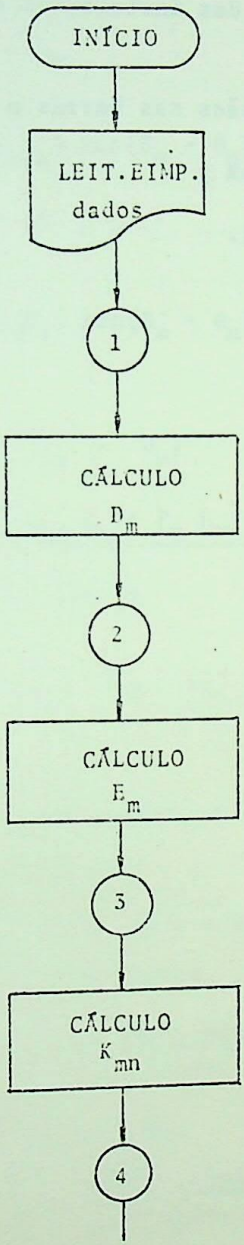
$\left(\frac{Q_m}{P_m} , \frac{Q_n}{P_n} \right)$ das instalações de geração m e n

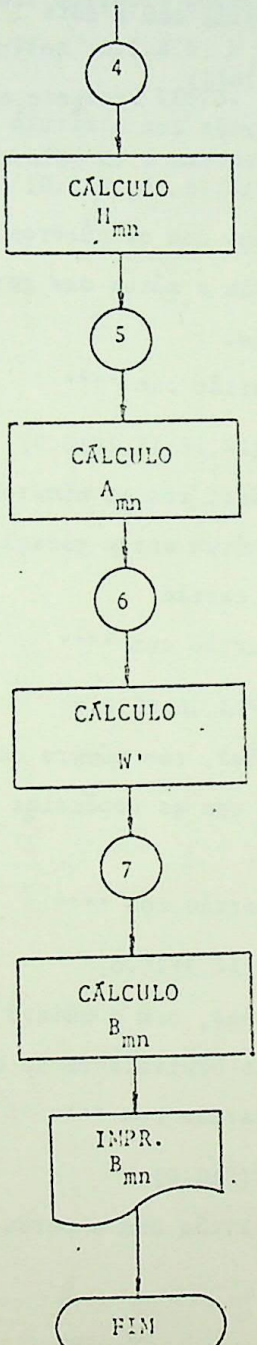
θ_m, θ_n = ângulos das tensões nas barras m e n.

R_j = resistência da linha j

I_j = corrente da linha j.

3.1.b - Diagrama em Blocos (COEFB)




4
CÁLCULO
H_{mn}
5
CÁLCULO
A_{mn}
6
CÁLCULO
W'
7
CÁLCULO
B_{mn}
IMPR.
B_{mn}
FIM

3.1.c - Instrução para entrada de dados

1) FØRMAT(3A4)

- Um cartão com a data

2) FØRMAT(20A4)

- Um cartão com o título do sistema

3) FØRMAT(A4,I6,I5,2F10.0)

- Cartões com os números das barras e a respectiva resistên
própria e mútua das gerações, em circuito aberto, um em c
cartão.

- Um cartão com ****

4) FØRMAT(A4,I6,I5,2F10.0)

- Cartões, com os números das barras e a respectiva resistê
cia mútua entre geração e consumo, em circuito aberto, um
cada cartão.

- Um cartão com ****

5) FØRMAT(A4,I6,3F10.0)

- Cartões, com número da barra, com a relação característi
Q/P, com as Potências ativa e reativa de geração, no c
base.

- Um cartão com ****

6) FØRMAT(A4,3F10.0)

- Cartões, com o número da barra, parte real e reativa da
rente equivalente de carga.

- Um cartão com ****

7) FØRMAT(F10.0)

- Um cartão com a perda total do sistema no caso base.

3.1.d - Sistema Exemplo (COEFB)

O sistema exemplo utilizado, encontra-se no livro "Economic Operation" - Kirchmayer, pag. 117, resolvido com todas as etapas de cálculo e os resultados obtidos; inclusive esses resultados poderão ser vistos no subitem 3.1.d.1, a título de conferência dos resultados obtidos pelo programa COEFB.

O sistema é constituído de 5 barras, com 3 barras geradoras (fig. 3.1).

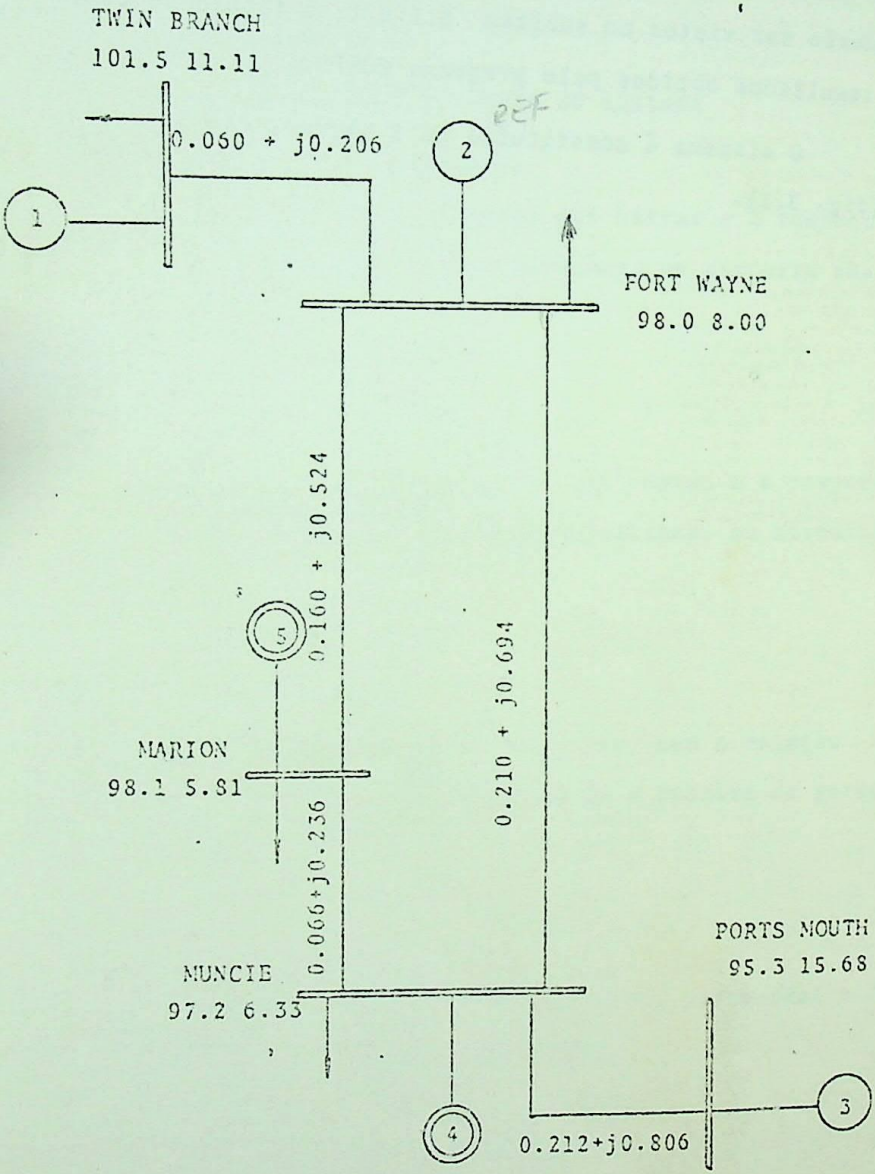


Fig. 3.1 - Sistema de 5 barras com 3 gerações

POTÊNCIAS DE GERAÇÃO NO CASO BASE E RELAÇÃO CARACTERÍSTICA Q/P (S)

BARRA	POT. GER. (MW)	POT. GER. (MVAR)	S (Q/P)
1	144.000	39.023	-0.25
2	10.668	-13.549	-0.40
3	34.600	-10.528	0.00

CORRENTES EQUIVALENTES DE CARGA NO CASO BASE

BARRA	P. REAL (p_u)	P. IMAG. (p_u)
1	0.482158	0.169336
2	0.209055	-0.130198
3	-0.008721	-0.049074
4	0.189079	-0.023723
5	0.106511	0.033660

PERDA TOTAL DO SISTEMA NO CASO BASE = 2.868

MVA_B = 200 MVA

RESISTÊNCIAS PRÓPRIAS E MÚTUAS DAS GERAÇÕES, EM CIRCUITO ABERTO

BARRAS	RESISTÊNCIAS (p_u)
1 1	0.0600
1 2	0.0000
1 3	0.0000
2 2	0.0000
2 3	0.0000
3 3	~~0.0000~~ 0,3209

RESISTÊNCIAS MÚTUAS ENTRE CONSUMO E GERAÇÃO, EM CIRCUITO ABERT

B. CONS.	B. GER.	RESISTÊNCIA (p_u)
1	1	0.0600
1	2	0.0000
1	3	0.0000
2	1	0.0000
2	2	0.0000
2	3	0.0000
3	1	0.0000
3	2	0.0000
3	3	0.3209
4	1	0.0000
4	2	0.0000
4	3	0.1089
5	1	0.0000
5	2	0.0000
5	3	0.0771

3.1.d.1 - Resultado dos cálculos dos coeficientes B, obtidos p
Kirchmayer

COEFICIENTES B_{mn}			
Gerad.	G_1	G_2	G_3
G_1	0.027251	-0.003506	-0.036788
G_2	-0.003506	0.030896	-0.005653
G_3	-0.036788	-0.005653	0.322950

```
TP 56 FORTRAN COMPILER,MV 03 (70)    FORA.                                                    00.00.
C
C            PROGRAMA     *****  COEFB  *****
C
C     PROGRAMA PARA CALCULO DOS COEFICIENTES DE PERDAS  B
C     DADOS DE ENTRADA
C             RESISTENCIAS PROPRIA E MUTUA EM CIRCUITO ABERTO DOS GERADORES
C             RESISTENCIAS MUTUAS ENTRE AS CARGAS E GERADORES
C             RELACAO CARACTERISTICA ENTRE POTENCIAS REATIVAS E REAIS DE CADA
C             GERACAO
C             POTENCIA REAL E REATIVA DE GERACAO
C             MAGNITUDE E ANGULO DA TENSAO EM TODAS AS BARRAS
C             CORRENTES EQUIVALENTES DE CARGAS EM RELACAO A UMA MESMA REFERENCIA
C             PERDAS RI**2 DO SISTEMA
      REAL K
      INTEGER*2 LB1(20),LB2(20),LB3(20),LB4(20),NG,NIG,NC,NCBUS(20),IBUS
     C(20),NBUS(20),M,N
      DIMENSION IDAT(3),ITITUL(20),IAST(21),RESG(20,20),RESC(20,20),SG(2
     CC),M(20,20),A(20,20),B(20,20),V(20),TETA(20),CEQ1(20),CEQ2(20),Q(2
     CC),P(20),Q(20),E(20),K(20,20)
      DATA IFLAG/4H****/
      READ(12,1)IDAT
    1 FORMAT(3A4)
      DO 100 I=1,21
  100 IAST(I)=IFLAG
      READ(12,2)ITITUL
    2 FORMAT(20A4)
      WRITE(1,3) IAST,ITITUL,IAST
    3 FORMAT(1H1,13X,21A4/14X,'*',11X,' CALCULO DOS COEFICIENTES DE PERD
     3AS B - PROGRAMA  COEFB    ',13X,'*',/14X,'* ',20A4,' *'/14X,21A4///)
     C)
      DO 101 I=1,500
      READ(12,4)IN,LB1(I),LB2(I),RESG(LB1(I),LB2(I))
    4 FORMAT(A4,16,I5,2F10.0)
      IF(IN.EQ.IFLAG)GO TO 102
  101 CONTINUE
  102 NIG=I-1
      DO 103 I=1,500
      READ(12,4)IN,LB3(I) ,LB4(I),RESC(LB3(I),LB4(I))
      IF(IN.EQ.IFLAG)GO TO 104
  103 CONTINUE
  104 NIC=I-1
      DO 105 I=1,500
      READ(12,5)IN,IBUS(I),SG(IBUS(I)),P(IBUS(I)),Q(IBUS(I))
    5 FORMAT(A4,I6,3F10.0)
      IF(IN.EQ.IFLAG) GO TO 106
  105 CONTINUE
  106 NG=I-1
      DO 107 I=1,500
      READ(12,5)IN,NBUS(I),V(NBUS(I)),TETA(NBUS(I))
      IF(IN.EQ.IFLAG) GO TO 108
  107 CONTINUE
  108 NB=I-1
      DO 109 I=1,500
      READ(12,5) IN,NCBUS(I),CEQ1(NCBUS(I)),CEQ2(NCBUS(I))
      IF(IN.EQ.IFLAG) GO TO 110
  109 CONTINUE
  110 NC=I-1
      READ(12,111) PERDA
```

```
      WRITE(1,8)
    8 FORMAT(///23X,'ENTRE BARRAS',21X,'MUTUA ENTRE GERACAO E CONSUMO EM
     3 CIRC.ABERTO',//21X,'GERACAO  CONSUMO',32X,'RESISTENCIA'/)
      WRITE(1,7) (LB3(I),LB4(I),RESC(LB3(I),LB4(I)),I=1,NIC)
    7 FORMAT(/21X,I3,I9,F35.4,F22.4)
      WRITE(1,16) (IBUS(I),SG(IBUS(I)),I = 1,NG)
   16 FORMAT(///25X,'GERACAO',24X,'REL. CARACTERISTICA Q/P'/100(/27X,I2,
     5F48.3))
      WRITE(1,17)
   17 FORMAT(////25X,'***** DADOS OBTIDOS DO ESTUDO DO FLUXO DE CARGA**
     5***',////26X,'BARRA',25X,'MOD. TENSAO',10X,'ANG. TENSAO'/)
      WRITE(1,9) (NBUS(I),V(NBUS(I)),TETA(NBUS(I)),I = 1,NB)
    9 FORMAT(1X,I28,F35.4,F22.4)
      WRITE(1,15)(IBUS(I),P(NBUS(I)),Q(NBUS(I)),I=1,NG)
   15 FORMAT(///30X,'POTENCIA DE GERACAO NO CASO BASE',//26X,'BARRA',28X
     C,'REAL',14X,'REATIVA'/100(/1X,I28,F35.4,F20.4))
      WRITE(1,10) (NCBUS(I),CEQ1(NCBUS(I)),CEQ2(NCBUS(I)),I = 1,NC)
   10 FORMAT(///30X,,'CORRENTE EQUIV.DE  CARGA NO CASO BASE'//26X,'BARRA
     7',29X,'REAL',14X,'REATIVA',//100(/1X,I28,F35.4,F22.4))
      WRITE(1,12)PERDA
   12 FORMAT(///30X,,'PERDA RI**2 DO CASO BASE',F10.4)
C       CALCULO DA CORRENTE EQUIV DE CARGA TOTAL
      CEQ=0
      DO 111 I=1,NC
  111 CEQ=CEQ+CEQ1(I)
C    CALCULO DE D(M) E F(M)
      DO 113 M = 1,NG
      D(M)=0.0
      F(M) = 0.0
      DO 112 N = 1,NC
      D(M) = D(M) + CEQ1(N)*RESC(N,M)
  112 F(M) = F(M) + CEQ2(N)*RESC(N,M)
      D(M)=D(M)/CEQ
  113 F(M)=F(M)/CEQ
C       CALCULO DE K(M,N),H(M,N) E A(M,N)
      PHFP=0.0
      PAP=0.0
      PKP=0.0
      DO 114 I=1,NG
      DO 114 J=1,NG
      M=IBUS(I)
      N=IBUS(J)
      K(M,N) = ((1.0 + SG(M)*SG(N))*COS(TETA(M) -TETA(N)) + (SG(M) - SG(
     CN))*SIN(TETA(M) - TETA(N)))/(V(M)*V(N))
      H(M,N) = ((1.0 + SG(M)*SG(N))*SIN(TETA(M) - TETA(N)) + (SG(N) - SG
     C(M))*COS(TETA(M) - TETA(N)))/(V(M)*V(N))
      A(M,N) = (RESG(M,N) - D(M) - D(N))*K(M,N)
      PAP=PAP+P(M)*A(M,N)*P(N)
      PHFP=PHFP+P(M)*H(M,N)*(F(M)-F(N))*P(N)
      PKP=PKP+P(M)*K(M,N)*P(N)
  114 CONTINUE
C       CALCULO DE W
      W=(PERDA-PAP+PHFP)/PKP
C       CALCULO DE B(M,N)
      DO 115 I=1,NG
      DO 115 J=1,NG
      M=IBUS(I)
      N=IBUS(J)
  115 B(M,N)=A(M,N)+W*K(M,N)-H(M,N)*(F(M)-F(N))
```

```
      DO 120 I = 1,21
  120 IAST(I) = IFLAG
      WRITE(1,13) IAST,IDAT,ITITUL,IAST
   13 FORMAT(1H1,13X,21A4,/14X,'*',17X,'MATRIZ DOS COEFICIENTES  B',15X,
     93A4,12X,'*',/14X,'*  ',20A4,'*',/14X,21A4///)
      DO 116 N=1,NG
  116 WRITE(1,14)(B(M,N),N=1,NG)
   14 FORMAT(/30X,3F15.6)
      STOP
      END
,

HP        FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:  7748 ZELLEN OHNE COMMON
```

E.E.E.K. LABORATÓRIO DE COMPUTAÇÃO E SIMULAÇÃO

PROGRAMA: COEFB - DADOS	PERFURADOR: TATUO		PÁGINA:
PROGRAMADOR: TATUO NAKANISHI	ENTRADA: 5-12-72	SAIDA: 5-12-72	UNIDADE:

NUMERO DECLAR	CON	DECLARAÇÃO FORTRAN	IDENT
2 3 4 5	6	7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72	73 74 75 7
5-12-		72	
		SISTEMA DE CINCO BARRAS COM 3 BARRAS DE GERACAO KIRCHMAYER PG 116	
	1	1 0.060	
	2	3 0.3209	
****			
	1	1 0.060	
	2	3 0.3209	
	3	3 0.1089	
	5	3 0.0771	
****			
	1	-0.25 0.72 0.1951	
	2	-0.40 0.05334 -0.06334	
	3	0.0 0.133 -0.05360	
****			
	1	1.015 0.1938695	
	2	0.930 0.14	
	3	0.953 0.2736116	
****			
	1	0.4821558 0.1693366	
	2	0.2090554 -0.1302198	
	3	-0.0087221 -0.0490763	
		0.1990349 -0.0233223	

E.F.E.I. LABORATÓRIO DE COMPUTAÇÃO E SIMULAÇÃO

PROGRAMA: COEFB - DADOS	PERFURADOR: T.N.	PÁGINA:
PROGRAMADOR: TATUO NAKANISHI	ENTRADA: 5-12-72 SAIDA: 5-12-72	UNIDADE:

NÚMERO DECLAR.	CF	DECLARAÇÃO FORTRAN	IDENT
1 2 3 4 5	6	7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72	73 74 75
		0.01434	

```
**********************************************************************
*     CALCULO DOS COEFICIENTES DE PERDAS B - PROGRAMA  COEFB          *
*.    SISTEMA DE CINCO BARRAS COM 2 BARRAS DE GERACAO   KIRCHMAYER PG 117  *
**********************************************************************
```

G-

***** PARAMETROS DO SISTEMA *****

ENTRE BARRAS GERACAO		PROPRIA E MUTUA DAS GERACOES EM CIR.ABERTO RESISTENCIA
1	1	0.0600
3	3	0.3209

ENTRE BARRAS GERACAO	CONSUMO	MUTUA ENTRE GERACAO E CONSUMO EM CIRC.ABERTO RESISTENCIA
1	1	0.0600
3	3	0.3209
4	3	0.1089
5	3	0.0771

GERACAO	REL. CARACTERISTICA O/P
1	-0.250
2	-0.400
3	0.000

***** DADOS OBTIDOS DO ESTUDO DO FLUXO DE CARGA*****

BARRA	MOD. TENSAO	ANG. TENSAO
1	1.0150	0.1939
2	0.9800	0.1400
3	0.9530	0.2736

POTENCIA DE GERACAO NO CASO BASE

BARRA	REAL	REATIVA
1	0.7200	0.1951
2	0.0533	-0.0677
3	0.1730	-0.0526

CORRENTE EQUIV.DE CARGA NO CASO BASE

BARRA	REAL	REATIVA
1	0.4822	0.1693
2	0.2091	-0.1222
3	-0.0037	-0.0491
4	0.1391	-0.0237
5	0.1065	0.0337

PERDA R**2 DO CASO BASE 0.0143

MATRIZ DOS COEFICIENTES B 5-12-1972
SISTEMA DE CINCO BARRAS COM 2 BARRAS DE GERACAO KIRCHMAYER PG 117

0.027249	-0.003505	-0.036792
-0.003505	0.030893	-0.005664
-0.036792	-0.005664	0.322947

STOP

3.2 - PROGRAMA POTG1

De posse dos valores, dos coeficientes da expressão dos custos de geração do sistema, dos valores dos coeficientes de perdas B do caso base, e do consumo total do sistema, o programa POTG1 calcula os valores das potências de geração de cada barra geradora do sistema, de forma a tornar mínimo o custo total da produção. Além disso, o programa calcula também, a perda total do sistema, nestas condições.

3.2.a - As equações utilizadas, bem como a sequência seguida, encontram-se expostas nos itens 2.3, 2.4 e 2.5, do capítulo anterior, portanto, não serão aqui repetidas totalmente, apenas serão expostas algumas transformações matemáticas efetuadas.

Considerando-se a equação 2.66

$$A_{n1} + 2A_{n2} P_n + 2 \lambda \sum_m B_{mn} P_m = \lambda \quad m \neq n \qquad (2.66)$$

$$A_{n1} + 2A_{n2} P_n + 2 \lambda B_{mn} P_n + 2 \lambda \sum_m B_{mn} P_m = \lambda \quad \text{com } m \neq n$$

$$(2A_{n2} + 2 \lambda B_{nn}) P_n + 2 \lambda \sum_m B_{mn} P_m = \lambda - A_{n1} \quad m \neq n \qquad (3.1)$$

fazendo-se:-

$$A_{mn} = 2 \lambda B_{mn} \quad P/m \neq n$$

$$A_{mn} = 2 A_{n2} + 2 \lambda B_{mn} \quad P/m = n \qquad (3.2)$$

$$Y_n = \lambda - A_{n1}$$

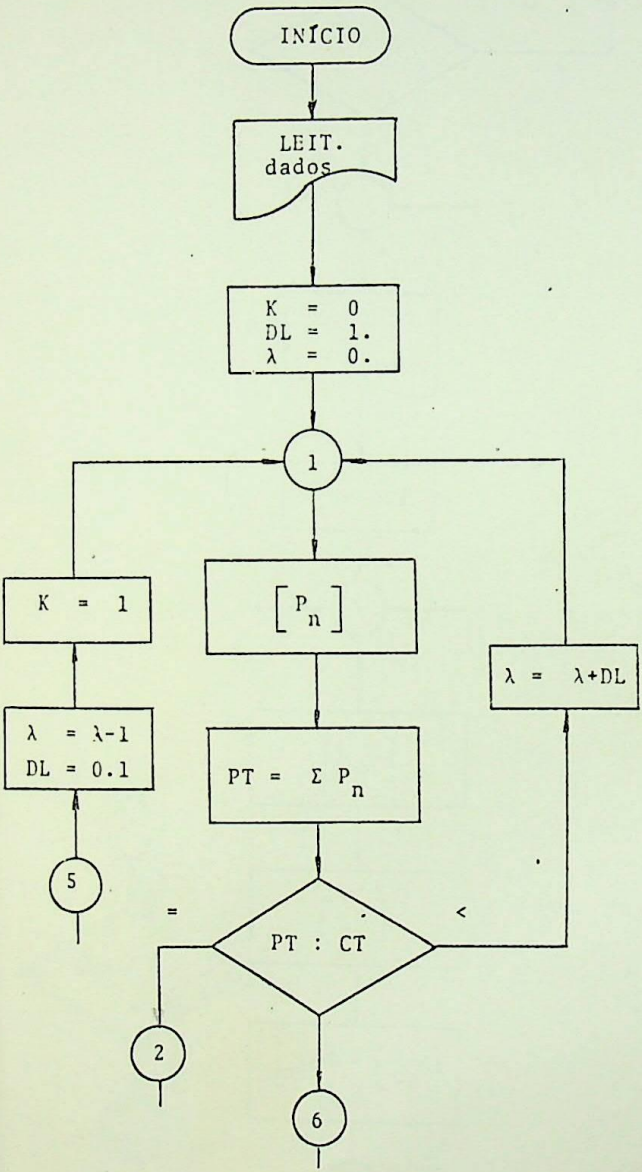
tem-se, simbolicamente, que:-

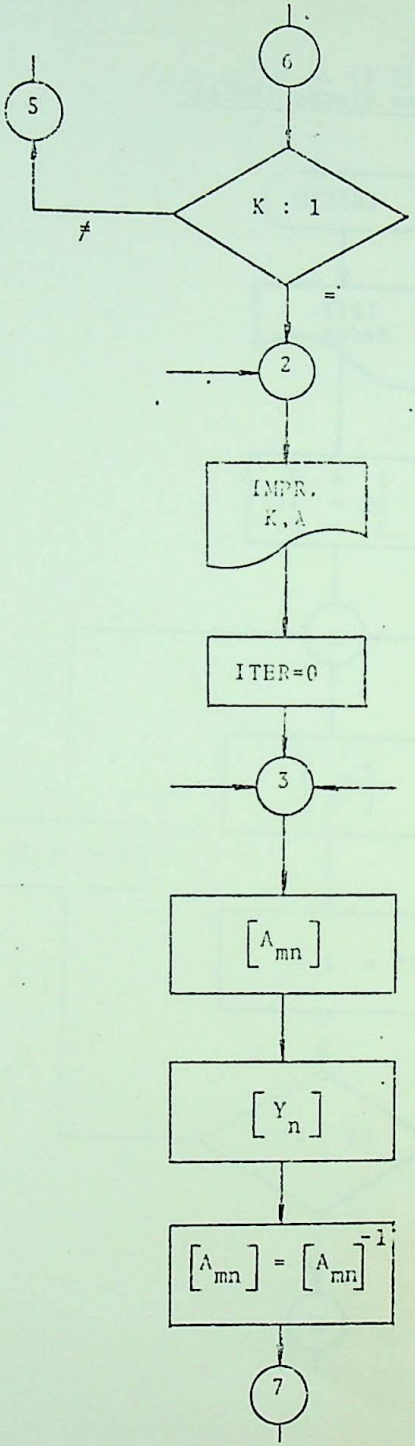
$$[A][P] = [Y] \qquad (3.3)$$

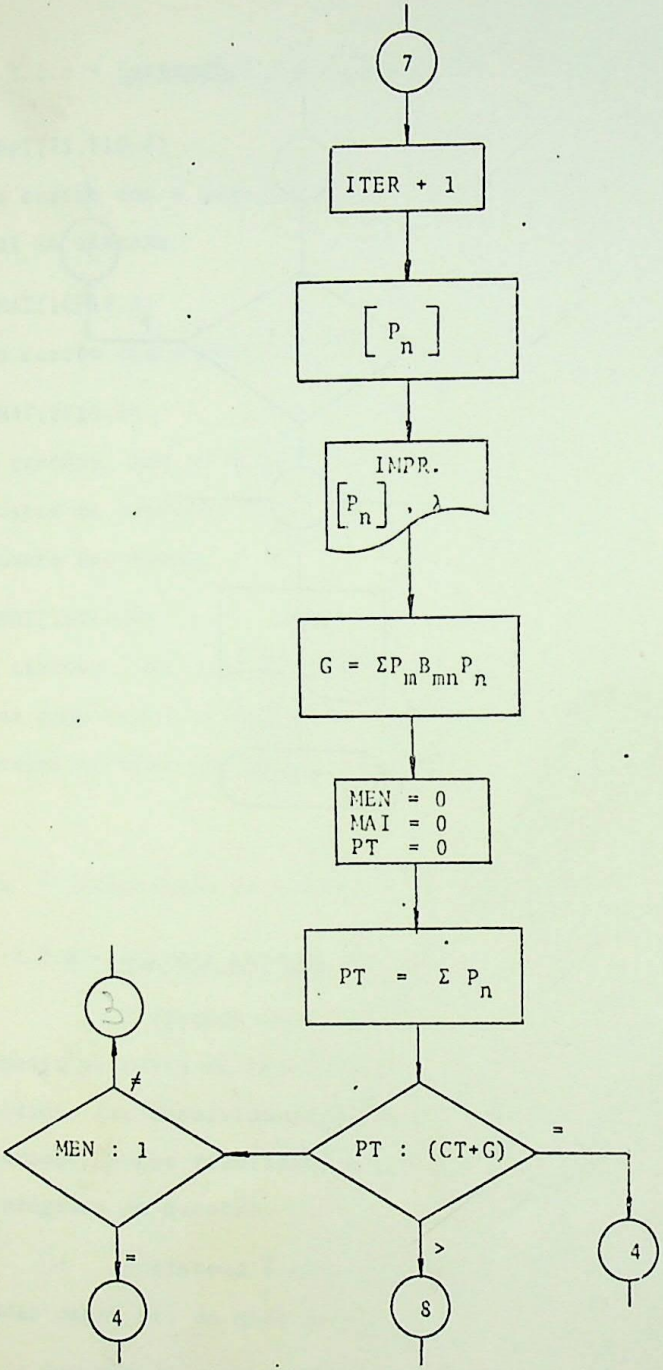
multiplicando-se ambos os lados de (3.3) por $\left[A\right]^{-1}$

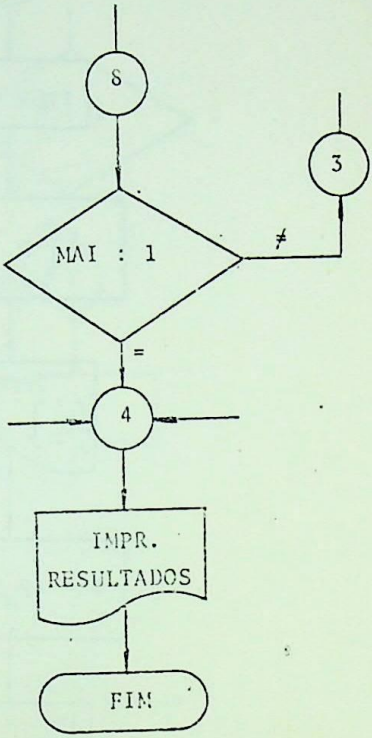
$$\left[P\right] = \left[A\right]^{-1} \left[Y\right] \qquad (3$$

3.2.b - Diagrama em Blocos (POTG1)




6
5
K : 1
≠
=
2
IMPR.
K, A
ITER=0
3
[A_mn]
[Y_n]
[A_mn] = [A_mn]^-1
7


7
ITER + 1
[Pn]
IMPR.
[Pn] , λ
G = ΣPm Bmn Pn
MEN = 0
MAI = 0
PT = 0
PT = Σ Pn
PT : (CT+G)
=
>
MEN : 1
≠
=
4
8
4


8
3
MAI : 1
≠
=
4
IMPR.
RESULTADOS
FIM

3.2.c - Instruções para entrada de dados

1) FØRMAT(I5,F10.0)

- Um cartão com a quantidade de barras de geração e consumo total do sistema.

2) FØRMAT(10F10.0)

- Um cartão com a precisão do valor de λ desejado.

3) FØRMAT(2F10.0)

- n cartões, com os valores dos coeficientes da equação dos custos de produção $2A_{n2}$ e A_{n1}, em cada cartão, na ordem do número das barras.

4) FØRMAT(10F10.0)

- n cartões, com os valores dos coeficientes B, devendo constar cada linha da matriz de B, em um cartão, e a sequência destes cartões ser igual a das linhas da matriz.

Sendo:-

n - quantidade de barras de geração.

3.2.d - Sistema Exemplo (POTG1)

O sistema utilizado como exemplo, neste programa, foi proposto no curso de Pós-Graduação, DEL 821, portanto, naquela oportunidade, foi resolvido pelos alunos do curso sem a utilização do computador. Estes resultados foram utilizados para a conferência do programa em questão.

O sistema é constituído de 3 barras geradoras, interligadas entre si, da qual se conhecem:-

- Equação do custo total de produção

$$F = (2P_1 + 0{,}005\ P_1^2) + (1{,}5\ P_2 + 0{,}005\ P_2^2) + (2{,}3P_3 + 0{,}005\ P_3^2)$$

- Coeficientes de perdas B do sistema

$B_{11} = 0{,}001$

$B_{22} = 0{,}0024$

$B_{33} = 0{,}0095$

$B_{12} = B_{21} = -0{,}0005$

$B_{13} = B_{31} = -0{,}00048$

$B_{23} = B_{32} = -0{,}00044$

Consumo total do sistema = 184,5 MW

E.E.E.M. LABORATÓRIO DE COMPUTAÇÃO E SIMULAÇÃO

PROGRAMA: DOTGA -- DADOS	PERFURADOR: T.P.		PÁGINA: 1
PROGRAMADOR: TATUO MORIMOTO	ENTRADA: 10-3-72	SAÍDA: 10-3-72	UNIDADE: 1

NÚMERO DECLAR.	S/S	DECLARAÇÃO FORTRAN	IDENTIFICAÇÃO
		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72	73 74 75 76 77 78 79 80
	S	1 3 3 4 S	
		0.01	
		0.01 2.0	
		0.01 3.5	
		0.01 2.5	
		0.001 -0.0005 -0.00048	
		-0.0005 0.0024 -0.00048	
		-0.00048 -0.00048 0.00025	

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

```
TR 86 FORTRAN COMPILER MV 08 (70)   FONTE.F

C    TATUO NAKAMISHI
C    PROGR. POTCI
C    CALCULO DAS POTENCIAS DE GERACAO
       REAL LAMB
       DIMENSION ACUST(10),BCUST(10),B(10,10),APOT(10,10),Y(10),P(10)
       READ(12,1) NG,CT
     1 FORMAT(I5,F10.0)
       READ(12,2)DLAMB
     2 FORMAT(10F10.0)
       READ(12,3)(ACUST(I),BCUST(I),I = 1,NG)
     3 FORMAT(2F10.0)
       DO 50 M = 1,NG
    50 READ(12,2) (B(M,N),N = 1,NG)
       K = 0
       DL = 1.
       LAMB = 0.0
    45 PI = 0.0
       DO 40 M = 1,NG
    40 PI = PI + (LAMB - BCUST(M))/ACUST(M)
       IF(PI - CT) 41,42,43
    41 LAMB = LAMB + DL
       GO TO 45
    43 IF(K.EQ.1) GO TO 42
       DL = 0.1
       LAMB = LAMB - 1.
       K = 1
       GO TO 45
    42 WRITE(1,10) NG, CT,LAMB,DLAMB
    10 FORMAT(1X,'NUMERO DE GERACAO',I10,'CONSUMO TOTAL',F14.4,'  KW'//1X
      C,'LAMB INICIAL',F15.4,//1X,'INCREMENTO DE LAMB',F9.4///)
       WRITE(1,11) (I,ACUST(I),BCUST(I),I=1,NG)
    11 FORMAT(//1X,'COEF. DAS EXPRESSOES DOS CUSTOS INCREMENTAIS',///1X,30(
      C/1X,I3,3X,2F10.4))
       K = 0
       MM = 0
       MI = 0
   100 DO 51 M = 1,NG
       DO 51 N = 1,NG
       IF(M.EQ.N) GO TO 60
       APOT(M,N) = 2.*LAMB*B(M,N)
       GO TO 51
    60 APOT(M,N) = ACUST(M) + 2.*LAMB*B(M,N)
    51 Y(M) = LAMB - BCUST(M)
       CALL INMAT(NG,APOT)
       K = K + 1
       DO 52 M = 1,NG
       P(M) = 0.0
       DO 52 N = 1,NG
    52 P(M) = P(M) + APOT(M,N)*Y(N)
       WRITE(1,4) K,LAMB
     4 FORMAT(///1X,'ITERACAO NUMERO',I5,5X,'LAMB =',F7.3,//5X,'POTENCIS
      C AIS CALCULADAS',///)
       WRITE(1,5) (M,P(M),M = 1,NG)
     5 FORMAT(1X,I2,'),',F10.4,2X,'MW')
C    CALCULO DAS PERDAS
       Q = 0.0
       DO 53 M = 1,NG
       DO 53 N = 1,NG
    53 Q = Q + B(M,N)*P(M)*P(N)
       PT = 0.0
       DO 54 M = 1,NG
```

```
54 PT = PT + P(N)
   WRITE(1,12) PT,CT,G
12 FORMAT(/1X,'POT. TOTAL GER. =',F10.4,5X,'POT. CONSUMO =',F10.4,5X,
  C'PERDAS =',F10.4)
   IF(PT - G - CT) 55,57,56
55 IF(MEN.EQ. 1) GO TO 57
   MAI = 1
   LAMB = LAMB + DLAMB
   GO TO 100
56 IF(MAI.EQ.1) GO TO 57
   MEN = 1
   LAMB = LAMB - DLAMB
   GO TO 100
57 WRITE(1,6)
 6 FORMAT(//1X,'VALORES FINAIS PARA AS QUAIS A POTENCIA DE GREACAO =
  C CONSUMO + PERDAS'//)
   WRITE(1,7) (LAMB,(M,P(M),M = 1,NG))
 7 FORMAT(1X,'VALORE DE LAMB =',F10.4,//1X,30(/5X,'P(',I2,') =',F7.4)
  C)
   STOP
   END
```

```
      SUBROUTINE INMAT(N,A)
      DIMENSION A(10,10)
      DO 70 K = 1,N
      A(K,K) = 1./A(K,K)
      DO 50 I = 1,N
      IF(I.EQ.K) GO TO  50
      A(I,K) = A(I,K)*A(K,K)
   50 CONTINUE
      DO 65 I = 1,N
      IF(I.EQ.K) GO TO 65
      DO 60 J = 1,N
      IF(J.EQ.K) GO TO 60
      A(I,J) = A(I,J) - A(I,K)*A(K,J)
   60 CONTINUE
   65 CONTINUE
      DO 70 J = 1,N
      IF(J.EQ.K) GO TO 70
      A(K,J) = -A(K,J)*A(K,K)
   70 CONTINUE
      RETURN
      END
```

```
H2        FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:  1542 ZELLEN OHNE COMMON

UP INMAT  FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   202 ZELLEN OHNE COMMON
```

```
IR 66 FORTRAN COMPILER NV 08 (70)   STARTED

PROGRAM LAENGE  58002

ENDE DER COMPILATION

NUMERO DE GERACAO          3CONSUM  TOTAL      184.5000  KW
LAMB INICIAL               2.6000
INCREMENTO DE LAMB         0.0100

COEF. DAS EXPRESSOES DOS CUSTOS INCREMENTAIS

  1        0.0100     2.0000
  2        0.0100     1.5000
  3        0.0100     2.3000

          ITERACAO NUMERO   1     LAMB =  2.600
     POTENCIS REAIS CALCULADAS

  1)   55.9450  MW
  2)   59.3225  MW
  3)   38.5120  MW
 POT. TOTAL GER. =   153.7797     POT. CONSUMO =  184.5000     PERDAS =    5.5872

          ITERACAO NUMERO   2     LAMB =  2.610
     POTENCIS REAIS CALCULADAS

  1)   56.6394  MW
  2)   59.8783  MW
  3)   39.4374  MW
 POT. TOTAL GER. =   156.1548     POT. CONSUMO =  184.5000     PERDAS =    5.6797

          ITERACAO NUMERO   3     LAMB =  2.620
     POTENCIS REAIS CALCULADAS

  1)   57.3338  MW
  2)   60.4323  MW
  3)   40.3409  MW
 POT. TOTAL GER. =   158.5274     POT. CONSUMO =  184.5000     PERDAS =    5.7733
```

ITERACAO NUMERO 4 LAMB = 2.630

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 59.6259 MW
2) 60.9154 MW
3) 41.2651 MW

POT. TOTAL GER. = 160.8973 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 5.8678

ITERACAO NUMERO 5 LAMB = 2.640

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 59.5173 MW
2) 61.5377 MW
3) 42.2088 MW

POT. TOTAL GER. = 163.2644 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 5.9634

ITERACAO NUMERO 6 LAMB = 2.650

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 60.4092 MW
2) 62.0693 MW
3) 43.1309 MW

POT. TOTAL GER. = 165.6293 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.0600

ITERACAO NUMERO 7 LAMB = 2.660

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 61.2993 MW
2) 62.6394 MW
3) 44.0522 MW

POT. TOTAL GER. = 167.9914 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.1577

ITERACAO NUMERO 8 LAMB = 2.670

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 62.1804 MW
3) 44.8587 MW

POT. TOTAL GER. = 170.2390 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.2363

ITERACAO NUMERO 9 LAMB = 2.680

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 63.0786 MW
2) 63.7379 MW
3) 45.9523 MW

POT. TOTAL GER. = 172.7678 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.3560

ITERACAO NUMERO 10 LAMB = 2.690

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 63.9668 MW
2) 64.2343 MW
3) 46.8110 MW

POT. TOTAL GER. = 175.0622 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.4566

ITERACAO NUMERO 11 LAMB = 2.700

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 64.8543 MW
2) 64.8365 MW
3) 47.7290 MW

POT. TOTAL GER. = 177.4139 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.5583

ITERACAO NUMERO 12 LAMB = 2.710

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 65.7419 MW
2) 65.3759 MW
3) 48.6461 MW

POT. TOTAL GER. = 179.7631 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.6610

ITERACAO NUMERO 13 LAMB = 2.720

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 66.6279 MW
2) 65.9203 MW
3) 49.5624 MW

POT. TOTAL GER. = 182.1107 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.7646

ITERACAO NUMERO 14 LAMB = 2.730

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 67.5122 MW
2) 66.4777 MW
3) 50.4779 MW

POT. TOTAL GER. = 184.4538 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.8693

ITERACAO NUMERO 15 LAMB = 2.740

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 68.3966 MW
2) 67.0061 MW
3) 51.3926 MW

POT. TOTAL GER. = 186.7953 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 6.9749

ITERACAO NUMERO 16 LAMB = 2.750

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 69.2003 MW
2) 67.5475 MW
3) 52.3064 MW

POT. TOTAL GER. = 189.1342 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 7.0816

ITERACAO NUMERO 17 LAMB = 2.760

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 70.1632 MW
2) 68.0880 MW
3) 53.2194 MW

POT. TOTAL GER. = 191.4706 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 7.1892

ITERACAO NUMERO 18 LAMB = 2.770

POTENCIS REAIS CALCULADAS

1) 71.0454 MW
2) 68.6275 "
3) 54.1316 "

POT. TOTAL GER. = 193.8045 POT. CONSUMO = 184.5000 PERDAS = 7.2978

VALORES FINAIS PARA AS QUAIS A POTENCIA DE GREACAO = CONSUMO + PERDAS

VALORE DE LAMB = 2.7700

P(1) =71.0454
P(2) =68.6275
P(3) =54.1316
P(

STOP !

3.3 - PROGRAMA POTG2

O programa POTG2 tem os mesmos objetivos do programa POTG1, porém com uma série de melhoramentos, tais como: menor trabalho na preparação dos dados, saída de dados com opção da impressão ou não dos resultados intermediários, a precisão dos resultados de cálculo pré-estabelecida e a precisão no equilíbrio entre geração, consumo e perdas, e além disso, devido a um algoritmo desenvolvido, diminuiu-se muito o número de iterações para se chegar a um mesmo resultado (De 17 iterações do programa POTG1 para 10 iterações do programa POTG2).

3.3.a - Instruções para entrada de dados

1) FØRMAT(20A4)
   - Um cartão com o título do sistema em estudo.

2) FØRMAT(3A4)
   - Um cartão com a data.

3) FØRMAT(A4,I6,3F15.0)
   - n cartões com, número da barra e os três primeiros coeficientes da equação dos custos de produção (A_0, A_1 e A_2).
   - Um cartão com ****

4) FØRMAT(A4, I6,I5,F15.0)
   - n x n cartões (em qualquer ordem) com, os números das barras e o respectivo valor do coeficiente B.
   - Um cartão com ****

5) FØRMAT(F10.0,I5)
   - Um cartão com o consumo total.

6) FØRMAT(F10.0,I5)

- Um cartão com a precisão desejada, isto é, o maior valor da diferença entre a potência gerada e o consumo mais as perdas do sistema, e o número código 1 se os resultados intermediários forem necessários; caso contrário deve-se deixar em branco este campo.

3.3.b - Sistema Exemplo (POTG2)

O mesmo sistema exemplo do programa POTG1 foi utilizado, podendo-se com isso verificar os resultados por comparação.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Biblioteca

CAPÍTULO IV

E.E.E.I. LABORATÓRIO DE COMPUTAÇÃO E SIMULAÇÃO

PROGRAMA: POTG2 - DADOS | PERFURADOR: T.U. | PÁGINA: 1

PROGRAMADOR: TATIO NAKANISHI | ENTRADA: 5-12-72 | SAÍDA: 5-12-72 | UNIDADE: 1

DECLARAÇÃO FORTRAN | NÚMERO DECLAR. | IDENTIFICAÇÃO

```
SISTEMA DE 3 BARRAS COM 3 BARRAS GERADORAS
5-12-1972
    1                   0.0                 2.0                 0.005
    2                   0.0                 1.5                 0.005
    3                   0.0                 2.3                 0.005
NNNNN
    1   1                       0.0045
    1   2              -0.00045
    2   0              -0.00045
    2   2                       0.0045
    2   3              -0.00045
    2   4              -0.00045
    2   5              -0.00045
    3   3                       0.0045
    3   4              -0.00045
XXXXX
        3 4 5
      0.5   1
```

```
TR 86 FORTRAN COMPILER MV 00 (70)   FOKA.

C      PROGRAMA  ****  POTG2  ****
C    PROGRAMA PARA CALCULO DAS POTENCIAS DE GERACAO NA CONDICAO
C    ECONOMICA UTILIZANDO OS COEF. DE PERDAS  B
C    DADOS DO PROBLEMA
C            COEFICIENTES DA EQUACAO DOS CUSTOS DE PRODUCAO
C            COEFICIENTES DE PERDAS  B
C            CONSUMO TOTAL DO SISTEMA
      REAL LAMB
      INTEGER*2 BUSG(20),LB1(20),LB2(20),M,N
      DIMENSION ITITUL(20),IDAT(3),IAST(21),A0(20),A1(20),A2(20),B(20,20
     C),PMOT(20,20),Y(20),P(20)
      DATA IFLAG/4hFIM /
      READ(12,1) ITITUL
    1 FORMAT(20A4)
      READ(12,2) IDAT
    2 FORMAT(3A4)
      DO 100 I=1,500
      READ(12,3) IN,BUSG(I),A0(BUSG(I)),A1(BUSG(I)),A2(BUSG(I))
    3 FORMAT(A4,I5,3F15.0)
      IF(IN.EQ.IFLAG)GOTO 101
  100 CONTINUE
  101 NG = I - 1
      DO 102 M=1,500
      READ(12,4) IN,LB1(M),LB2(M),B(LB1(M),LB2(M))
    4 FORMAT(A4,I5,I5,F15.0)
      IF(IN.EQ.IFLAG)GOTO 103
  102 CONTINUE
  103 NCEF = M - 1
      READ(12,5) CT
    5 FORMAT(F10.0,I5)
      READ(12,5) PREC,INT
      DO 104 I=1,21
  104 IAST(I)=IFLAG
      WRITE(1,6) IAST,ITITUL,IAST
    6 FORMAT(1H1,13X,21A4/14X,1H*,11X,'OPERACAO ECONOMICA UT.DOS COEFICI
     CIENTES B - PROGR. POTG2',10X,1H*/14X,1H* ',20A4,' *'/14X,21A4///)
      WRITE(1,7)
    7 FORMAT(/26X,'***** PARAMETROS DAS EQUACOES DOS CUSTOS DE PRODUCAO
     C*****'//10X,'BARRA',19X,'A0',18X,'A1',18X,'A2'/)
      WRITE(1,8)(BUSG(I),A0(BUSG(I)),A1(BUSG(I)),A2(BUSG(I)),I=1,NG)
    8 FORMAT(10X,I2,F27.9,2F20.9)
      WRITE(1,9)(B(M),LB2(M),B(LB1(M),LB2(M)),M=1,NCEF)
    9 FORMAT(////26X,'***** VALOR DOS COEFICIENTES B *****'//10X,'BARRAS
     C',5X,'COEF.B',10X,'BARRAS',5X,'COEF.B',10X,'BARRAS',5X,'COEF.B'//1
     CX0(/10X,I3,I5,F12.6,2(10X,I5,F12.6)))
      WRITE(1,10)CT,PREC
   10 FORMAT(////50X,'CONSUMO TOTAL DO SISTEMA',F15.3//50X,'PRECISAO DES
     CEJADA',F22.8)
      IF(INT.NE.1) GO TO 124
      WRITE(1,30)
   30 FORMAT(1H1)
C     CALCULO DE LAMB SEM CONSIDERAR AS PERDAS
  124 K=0
      DL=1.0
      LAMB=0.0
  105 PI=0.0
      DO 106 M=1,NG
  106 PI = PI + (LAMB - A1(BUSG(M)))/(2.*A2(BUSG(M)))
      IF(PI-CT)107,108,109
  107 LAMB=LAMB+DL
      GO TO 105
```

```
  109 IF(K.EQ.1)GOTO 108
      DL=0.1
      LAMB=LAMB-1.
      K=1
      GO TO 105
C  CALCULO DA MATRIZ DOS COEFICIENTES A E DA MATRIZ Y
  108 ITER=0
      DLAMB=0.1
  121 MEN=0
      MAI=0
  110 DO 111 I=1,NG
      DO 111 J=1,NG
      M=BUSG(I)
      N=BUSG(J)
      IF(M.EQ.N)GOTO 112
      APOT(M,N)=2.*LAMB*B(M,N)
      GO TO 111
  112 APOT(M,N) = 2.0*A2(M) + 2.0*LAMB*B(M,N)
  111 Y(M)=LAMB-A1(M)
C  INVERSAO DA MATRIZ DOS COEFICIENTES
      CALL INMAT(NG,APOT)
C  CALCULO DAS POTENCIAS DE GERACAO E POT. TOTAL
      ITER=ITER+1
      PT=0.0
      DO 113 M=1,NG
      P(M)=0.0
      DO 123 N = 1,NG
  123 P(M)=P(M)+APOT(M,N)*Y(N)
  113 PT=PT+P(M)
C  CALCULO DAS PERDAS
      G=0.0
      DO 114 M=1,NG
      DO 114 N=1,NG
  114 G=G+P(M)*B(M,N)*P(N)
      DIF=PT-CT-G
      IF(INT.NE.1)GOTO 115
      WRITE(1,11) ITER,LAMB
   11 FORMAT(////32X,'***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO',I3,' *****',//
     C//36X,'VALOR DE LAMB',F10.2)
      WRITE(1,12)(M,P(M),M=1,NG)
   12 FORMAT(//38X,'BARRA',13X,'POT.DE GERACAO'/100(/1X,I40,F26.3))
      WRITE(1,13)CT,G,PT,DIF
   13 FORMAT(//12X,'CONS.TOTAL',13X,'PERDA TOTAL',13X,'GER.TOTAL',15X,'D
     CIFER.'//1X,F20.3,3F23.3)
  115 IF(ABS(DIF).LE.PREC)GOTO 122
      IF(ITER.GT.30)GOTO 122
      IF(DIF)116,120,118
  116 IF(MEN.EQ.1)GOTO 117
      MAI=1
      LAMB=LAMB+DLAMB
      GO TO 110
  118 IF(MAI.EQ.1)GOTO 119
      MEN=1
      LAMB=LAMB-DLAMB
      GO TO 110
  117 LAMB=LAMB+DLAMB
      GO TO 120
  119 LAMB=LAMB-DLAMB
  120 DLAMB=0.01
      GO TO 121
  122 WRITE(1,14)IAST,IDAT,ITITUL,IAST
```

```
14 FORMAT(1H1,13X,21A4/14X,'*',11X,'RESULTADOS DA CONDICAO ECONOMICA
  COEF.',1,10X,3A4,10X,'*'/14X,'*',20A4,'*'/14X,21A4///)
   WRITE(1,15)(M,P(M),M=1,NG)
15 FORMAT(///33X,'BARRA',13X,'POT.DE GERACAO'/100(/1X,I40,F26.3))
   WRITE(1,16)CT,G,PT,LAMB,ITER
16 FORMAT(///12X,'CONS.TOTAL',13X,'PERDA TOTAL',13X,'GER.TOTAL',16X,'
  CLAMB',13X,'NUM.ITER'//1X,F20.3,2F23.3,F22.3,I19)
   STOP
   END
```

```
      SUBROUTINE INMAT(N,A)
      DIMENSION A(20,20)
      DO 70 K = 1,N
      A(K,K) = 1./A(K,K)
      DO 50 I = 1,N
      IF(I.EQ.K) GO TO  50
      A(I,K) = A(I,K)*A(K,K)
   50 CONTINUE
      DO 65 I = 1,N
      IF(I.EQ.K) GO TO 65
      DO 60 J = 1,N
      IF(J.EQ.K) GO TO 60
      A(I,J) = A(I,J) - A(I,K)*A(K,J)
   60 CONTINUE
   65 CONTINUE
      DO 70 J = 1,N
      IF(J.EQ.K) GO TO 70
      A(K,J) = -A(K,J)*A(K,K)
   70 CONTINUE
      RETURN
      END
/
UP        FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:  3601 ZELLEN OHNE COMMON

UP INMAT  FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   202 ZELLEN OHNE COMMON
```

```
**********************************************************************
*        OPERACAO ECONOMICA UT.DOS COEFICIENTES B - PROGR. P0762      *
*     SISTEMA DE 3 BARRAS  COM 3 BARRAS GERADORAS                     *
**********************************************************************
```

***** PARAMETROS DAS EQUACOES DOS CUSTOS DE PRODUCAO *****

BARRA	A0	A1	A2
1	0.000000000	2.000000000	0.005000000
2	0.000000000	1.500000000	0.005000000
3	0.000000000	2.300000000	0.005000000

***** VALOR DOS COEFICIENTES B *****

BARRAS	COEF.B	BARRAS	COEF.B	BARRAS	COEF.B
1 1	0.001000	1 2	-0.000500	1 3	-0.000480
2 1	-0.000500	2 2	0.002400	2 3	-0.000440
3 1	-0.000480	3 2	-0.000440	3 3	0.000950

CONSUMO TOTAL DO SISTEMA 184.500

PRECISAO DESEJADA 0.500

RESULTADOS DA CONDICAO ECONOMICA COEF.B 5-12-1972

SISTEMA DE 3 BARRAS COM 3 BARRAS GERADORAS

BARRA	POT.DE GERACAO
1	70.163
2	68.059
3	53.219

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	LAMB	NUM.ITER
184.502	7.189	191.471	2.760	10

STOP !

pg. 1/1

```
**********************************************************************
*     OPERACAO ECONOMICA UT.DOS COEFICIENTES B - PROGR. POTG2         *
*     SISTEMA DE 3 BARRAS  COM 3 BARRAS GERADORAS                     *
**********************************************************************
```

***** PARAMETROS DAS EQUACOES DOS CUSTOS DE PRODUCAO *****

BARRA	A0	A1	A2
1	0.000000000	2.000000000	0.005000000
2	0.000000000	1.500000000	0.005000000
3	0.000000000	2.300000000	0.005000000

***** VALOR DOS COEFICIENTES B *****

BARRAS	COEF.B	BARRAS	COEF.B	BARRAS	COEF.B
1 1	0.001020	1 2	-0.000500	1 3	-0.000480
2 1	-0.000500	2 2	0.002400	2 3	-0.000440
3 1	-0.000480	3 2	-0.000440	3 3	0.000950

CONSUMO TOTAL DO SISTEMA 184.500

PRECISAO DESEJADA 0.500

pág 01/3rd

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 1 *****

VALOR DE LAMB 2.60

BARRA	POT.DE GERACAO
1	55.945
2	59.323
3	38.512

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	5.587	153.780	-36.308

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 2 *****

VALOR DE LAMB 2.70

BARRA	POT.DE GERACAO
1	64.854
2	64.831
3	47.729

CONS.TOTAL	PERDA TOTA	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	6.558	177.414	-13.644

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 3 *****

VALOR DE LAMB 2.80

BARRA	POT.DE GERACAO
1	73.607
2	70.240
3	56.843

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	7.689	200.791	8.661

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 4 *****

VALOR DE LAMB 2.70

BARRA	POT.DE GERACAO
1	64.854
2	64.831
3	47.729

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	6.558	177.414	-13.644

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 5 *****

VALOR DE LAMB 2.71

BARRA	POT.DE GERACAO
1	65.741
2	65.376
3	48.646

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	6.661	179.763	-11.398

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 6 *****

VALOR DE LAMB 2.72

BARRA	POT.DE GERACAO
1	66.627
2	65.920
3	49.562

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	6.765	182.110	-9.155

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 7 *****

VALOR DE LAMB 2.73

BARRA	POT.DE GERACAO
1	67.512
2	66.464
3	50.478

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	6.869	184.454	-6.916

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 8 *****

VALOR DE LAMB 2.74

BARRA	POT.DE GERACAO
1	68.397
2	67.006
3	51.393

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	6.975	186.795	-4.680

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 9 *****

VALOR DE LAMB 2.75

BARRA	POT.DE GERACAO
1	69.280
2	67.548
3	52.306

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	7.082	189.134	-2.447

pág. 1/3

***** RESULTADOS DA ITERACAO NUMERO 1º *****

VALOR DE LAMB 2.76

BARRA	POT.DE GERACAO
1	70.163
2	68.057
3	53.219

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	DIFER.
184.500	7.189	191.471	-0.219

RESULTADOS DA CONDICAO ECONOMICA COEF.D 5-12-1972

SISTEMA DE 3 BARRAS COM 3 BARRAS GERADORAS

BARRA	POT.DE GERACAO
1	70.163
2	68.068
3	53.219

CONS.TOTAL	PERDA TOTAL	GER.TOTAL	LAMB	NUM.ITER
184.500	7.189	191.471	2.760	10

STOP :

pág. 115

SOLUÇÃO GENERALIZADA DO DESPACHO ECONÔMICO

4.1 - INTRODUÇÃO

O problema geral de minimização do custo de operação de um sistema de potência, pela determinação selecionada das potências ativas e reativas de geração, é formulado como um problema de programação não linear de acordo com o trabalho de J. Carpentier da Electricité de France em 1961 (método das Injeções).

As limitações do sistema tais como as impostas pelas leis físicas que governam um sistema de transmissão, bem como as impostas pelos equipamentos rotativos, são consideradas através das equações de desigualdades.

As equações de otimização, que precisam ser satisfeitas no ótimo derivam-se das condições de suficiência do teorema de Kuhn e Tucker. Um programa de computador capaz de resolver essas equações de otimização de Kuhn e Tucker uma por uma (como no método de Gauss-Seidel) está aparentemente implantado na Electricité de France para um sistema de 50 barras, porém para o caso particular em que as tensões no sistema de transmissão são assumidas constantes e conhecidas.

Independentemente deste trabalho, Sireux, também da Electricité de France, formulou o problema de otimização de maneira quase idêntica e chegou às mesmas condições de Kuhn e Tucker de otimização, pelo processo intuitivo, baseando-se nos custos marginais de Kirchmayer (método dos trânsitos).

4.2 - MÉTODO DOS TRÂNSITOS (4)

4.2.a - Notações e Definições Fundamentais

Sejam:-

$I_{i\alpha}$ - o trânsito de ativo partindo de i pela linha $i\alpha$

K_{i_α} - o trânsito de reativo partindo de i pela linha $i\alpha$

Consequentemente:-

$I_{\alpha i}$ - o trânsito partindo de α pela linha αi

λ_i - o custo marginal de energia ativa na barra i.

μ_i - o custo marginal de energia reativa na barra i.

Desde que o consumo de ativo em i aumente de uma pequena quantidade dC_i, as despesas de produção F aumentam de $dF = \lambda_i\, dC_i$. A definição é análoga para μ_i. Estas definições são fundamentais. Note-se que elas são válidas em todos os nós, tanto para os que têm produção como para os que não têm produção.

4.2.b - Relações entre os custos marginais de energia sem considerar as restrições (equações incompletas)

Efetuando-se uma variação nos consumos dC_i e dD_i em i, o aumento das despesas de produção será por definição dado por:-

$$dF = \lambda_i\, dC_i + \mu_i\, dD_i$$

No ótimo, esta despesa deve ser o custo da energia suplementar fornecido pelos nós vizinhos α, fazendo variar os trânsitos das linhas α_i, condição que é realizável desde que Θ_i e U_i variem e os diferentes $\Theta\alpha$ e $U\alpha$ restantes se mantenham constantes.

Então:-

$$dF = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \, dI_{\alpha i} + \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} \, dK_{\alpha i}$$

$$\lambda_i \, dC_i + \mu_i \, dD_i = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \, dI_{\alpha i} + \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} \, dK_{\alpha i}$$

ou:-

$$dC_i = - \sum_{\alpha} dI_{i\alpha}$$

$$dD_i = - \sum_{\alpha} dK_{i\alpha} + 2 \, Y_{i0} \, U_i \, dU_i$$

U_i - tensão no nó i

Y_{i0} - admitância dos elementos ligados à terra no nó i

$$\lambda_i \sum_{\alpha} dI_{i\alpha} - \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \, dI_{\alpha i} + \mu_i \left[\sum_{\alpha} dK_{i\alpha} - 2 \, Y_{i0} \, U_i \, dU_i \right] +$$

$$+ \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} \, dK_{\alpha i} = 0$$

$$dI_{i\alpha} = \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial \theta_i} \, d\theta_i + \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial U_i} \, dU_i$$

Escrevendo de maneira análoga as outras diferenciais $dI_{\alpha i}$, ... em função de $d\theta_i$ e dU_i, e escrevendo que a relação encontrada é variável, quaisquer que sejam $d\theta_i$ e dU_i, obtém-se as duas relações seguintes:-

$$\lambda_i \sum_{\alpha} \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial \theta_i} + \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial \theta_i} + \mu_i \sum_{\alpha} \frac{\partial K_{i\alpha}}{\partial \theta_i} + \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} \frac{\partial K_{\alpha i}}{\partial \theta_i} = 0$$

(4.1)

$$\lambda_i \sum_{\alpha} \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial U_i} + \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial U_i} + \mu_i \left[\sum_{\alpha} \frac{\partial K_{i\alpha}}{\partial U_i} - 2 \, Y_{i0} \, U_i \right] +$$

$$+ \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} \frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial U_i} = 0 \qquad (4.2)$$

As expressões $\frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial \Theta_i}$, $\frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial U_i}$, ... são funções senoidais em Θ_i e Θ_α e quadráticas ou lineares em U_i e U_α e são muito fáceis de serem calculadas.

Utilizando-se a representação ¶ das linhas i_α e chamando de:-

$$R_{i\alpha} + jX_{i\alpha} = \bar{Z}_{i\alpha} = Z_{i\alpha} \; e \; j(\frac{¶}{2} - \delta_{i\alpha})$$

a impedância série, e $Y_{i\alpha}$ a admitância paralela tem-se:-

$$\frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial \Theta_i} = \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos (\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial \Theta} = - \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos (\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial K_{i\alpha}}{\partial \Theta_i} = \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen} (\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial K_{\alpha i}}{\partial \Theta_i} = \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen} (\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial U_i} = \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen} (\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \frac{2U_i}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen} \delta_{i\alpha}$$

$$\frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial U_i} = \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen} (\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial K_{i\alpha}}{\partial U_i} = -\frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + 2\frac{U_i}{Z_{i\alpha}} \cos \delta_{i\alpha} - 2U_i Y_{i\alpha}$$

$$\frac{\partial K_{\alpha i}}{\partial U_i} = -\frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha})$$

4.2.c - Relações entre os custos marginais de energia em presença de restrições (relações completas)

4.2.c.1 - Restrições de Transporte

Uma restrição de transporte se exprime na forma:-

$\Theta_i - \Theta_\alpha \leq T_{i\alpha}$ ou

$\Theta_\alpha - \Theta_i \leq T_{\alpha i}$

($T_{i\alpha}$ e $T_{\alpha i}$ positivos)

Desde que ela intervém, ela corresponde à limitação da amplitude $d\Theta_i$, da variação de Θ_i.

Se, por exemplo, for atingida uma restrição da forma:-

$$\Theta_i - \Theta_\alpha \leq T_{i\alpha}$$

não se pode aumentar $d\Theta_i$ suficientemente para que a relação 4.1 seja verificada; isto quer dizer que não se pode transportar energia ativa de i correspondente ao equilíbrio economicamente livre - o preço da energia ativa λ_i é dado mais baixo do que aquele do equilíbrio livre.

$\sum_\alpha \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial \Theta_i}$ é sempre ≥ 0, e pode-se entender que justifica a introdução na equação 4.1 uma quantidade $t_{i\alpha} \geq 0$ tal que

$$\lambda_i \sum_\alpha \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial \Theta_i} + \sum_\alpha \lambda_\alpha \frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial \Theta_i} + \mu_i \sum_\alpha \frac{\partial K_{i\alpha}}{\partial \Theta_i} + \sum_\alpha \mu_\alpha \frac{\partial K_{\alpha i}}{\partial \Theta_i} + t_{i\alpha} = 0$$

Da mesma forma, se for atingida uma restrição

$$\Theta_\alpha - \Theta_i \leq T_{\alpha i}$$

a equação 4.2 tem a forma completa:-

$$\lambda_i \sum_\alpha \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial \Theta_i} + \sum_\alpha \lambda_\alpha \frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial \Theta_i} + \mu_i \sum_\alpha \frac{\partial K_{i\alpha}}{\partial \Theta_i} + \sum_\alpha \mu_\alpha \frac{\partial K_{\alpha i}}{\partial \Theta_i} +$$

$$+ \sum_\alpha (t_{i\alpha} - t_{\alpha i}) = 0 \qquad (4.3)$$

com:-

$$t_{i\alpha} \geq 0 \quad (\Theta_i - \Theta_\alpha - T_{i\alpha})\, t_{i\alpha} = 0$$

$$t_{\alpha i} \geq 0 \quad (\Theta_\alpha - \Theta_i - T_{\alpha i})\, t_{\alpha i} = 0$$

4.2.c.2 - Restrições sobre os Módulos das tensões

Desde que a restrição $U_i \leq U_i^M$ intervém, ela limita a amplitude dU_i da variação de U_i; dU_i não pode ser aumentado suficientemente para que a relação 4.2 seja verificada; isto quer dizer que não se pode transportar de i a energia reativa correspondente ao equilíbrio economicamente livre: o preço da energia reativa μ_i é dado mais baixo do que aquele do equilíbrio livre.

$\sum_\alpha \frac{\partial K_{i\alpha}}{\partial U_i} - 2\, Y_{i0}\, U_i$ é sempre ≥ 0 e isto leva a introduzir uma grandeza $u_i \geq 0$ tal que

$$\lambda_i \sum_\alpha \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial U_i} + \sum_\alpha \lambda_\alpha \frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial U_i} + \mu_i \left[\sum_\alpha \frac{K_{i\alpha}}{\partial U_i} - 2\, Y_{i0}\, U_i \right] +$$

$$+ \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} \frac{\partial K_{\alpha i}}{\partial U_i} + u_i = 0 .$$

Da mesma maneira, se for atingida a condição $U_i \geq U_i^m$ isto leva a diminuir da equação 4.2 da grandeza $u_i' \geq 0$.

Em conclusão, a equação 4.2 passa a ter a forma completa:-

$$\lambda_i \sum_{\alpha} \frac{\partial I_{i\alpha}}{\partial U_i} + \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \frac{\partial I_{\alpha i}}{\partial U_i} + \mu_i \left[\sum_{\alpha} \frac{\partial K_{i\alpha}}{\partial U_i} - 2Y_{i0} U_i \right] +$$

$$+ \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} \frac{\partial K_{\alpha i}}{\partial U_i} + u_i - u_i' = 0 \qquad (4.4)$$

com:-

$$u_i \geq 0 \quad (U_i - U_i^M)\, u_i = 0$$

$$u_i' \geq 0 \quad (U_i - U_i^m)\, u_i' = 0$$

4.2.d - Relações que ligam os custos marginais de produção e os custos marginais da energia em um ponto de produção

Se a produção de ativo não é limitada por uma das restrições,

$$\lambda_i = \frac{\partial F}{\partial P_i}$$

Se a produção de ativo é limitada superiormente

$$\lambda_i \geq \frac{\partial F}{\partial P_i}$$

Se a produção de ativo é limitada inferiormente

$$\lambda_i \leq \frac{\partial F}{\partial P_i}$$

Se a produção de reativo não é limitada por uma das restrições

$$\mu_i = \frac{\partial F}{\partial Q_i} = 0$$

Se a produção de reativo é limitada superiormente $\mu_i \geq 0$; se produção de reativo é limitada inferiormente, $\mu_i \leq 0$.

4.2.e - Relações características do sistema em malha

Elas são escritas da seguinte maneira:-

$$P_i - C_i = \sum_{\alpha} I_{i\alpha}$$

$$Q_i - D_i = \sum_{\alpha} K_{i\alpha} - Y_{i0} U_i^2$$

O conjunto das relações obtidas caracterizam o ótimo econômico, e é suficiente a sua resolução para obter a solução exata do problema.

Pode-se observar que nenhuma hipótese restritiva é feita, isto é, o problema foi enunciado de maneira totalmente geral.

4.2.f - Resolução prática das relações estabelecidas

As relações estabelecidas podem ser resolvidas por aproximações sucessivas, exatamente como para um cálculo de sistema em malha pelo método iterativo nodal.

De início se dá θ, U, λ, μ em todos os nós, de maneira teoricamente arbitrária (na prática, conhece-se os valores

procurados, e são tomados como valores iniciais).

Em seguida procura-se corrigir as grandezas O_i, U_i, λ_i, μ_i, P_i, Q_i de maneira que verifiquem as seis equações estabelecidas para o nó i, utilizando um processo de relaxação em bloco.

Percorre-se os diferentes nós sucessivamente e repete-se o processo até à estabilização dos valores das variáveis.

Note-se que a solução fornece os valores O e U que caracterizam as funções complexas:- efetua-se simultaneamente a otimização e o cálculo do sistema malhado, e o operador será informado de uma maneira completa sobre o estado do seu sistema, que é extremamente importante do ponto de vista de segurança de transporte.

4.3 - MÉTODO DAS INJEÇÕES (2)

O método das Injeções desenvolvido por J. Carpentier, se propõe resolver o problema do despacho econômico de carga de maneira completamente generalizada, isto é, sem considerar nenhuma hipótese restritiva.

Sendo dados os consumos locais de potência ativa e reativa, através do teorema de Kuhn e Tucker, o problema é equacionado de maneira que se consegue calcular as potências ativas e reativas de produção, de modo a tornar mínima a despesa total de produção do sistema.

Portanto, os módulos das tensões não são fixados, consideração de um ponto hipotético de carga não é feita e outras aproximações como no método clássico, e além disso, as limitações físicas do sistema que não são consideradas no método clássico são

consideradas neste método.

As equações resultantes e que expressam as condições de optimização são chamadas "relações do Despacho Econômico".

Sendo:-

P_i = potência ativa gerada

C_i = consumo de potência ativa

Q_i = potência reativa produzida

D_i = consumo de potência reativa

U_i = módulo da tensão

$I_i = P_i - C_i$ potência ativa transmitida (ou injetada) do nó i para a rede.

$K_i = Q_i - D_i$ potência reativa transmitida (ou injetada) do nó i para a rede

tem-se as "relações de injeção"

$$I_i(\bar{\theta}, \bar{U}) - P_i + C_i = 0$$
$$K_i(\bar{\theta}, \bar{U}) - Q_i + D_i = 0 \qquad (4.5)$$

onde $\bar{\theta}$ e $\bar{U}$ são valores cujos componentes são respectivamente.

$\theta_0, \theta_1, \theta_2 \ldots\ldots \theta_N$

$U_0, U_1, U_2 \ldots\ldots U_N$

Essas relações de injeção (4.5) expressam a condição de que as potências injetadas, ativas ou reativas, são iguais

à diferença entre as respectivas produções e consumos nos correspondentes nós i.

4.3.a - Expressão de $\bar{I}_i(\bar{0}, \bar{U})$ e $\bar{K}_i(\bar{0}, \bar{U})$

Considerando o circuito ¶ equivalente para a representação das linhas de transmissão (fig. 4.1)

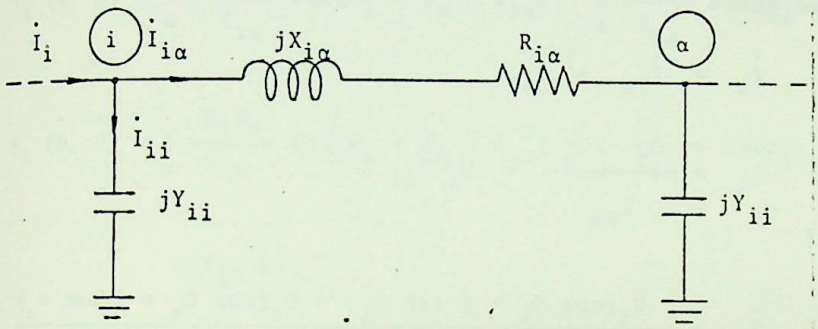


Fig. 4.1 - Circuito ¶ equivalente

Sendo:-

i índice de um nó

α índice que se refere ao nó vizinho de i

iα índice do ramo que une os nós i e α

$R_{i\alpha}$, $X_{i\alpha}$ resistência e reatância, respectivamente do ramo iα

$$\delta_{i\alpha} = \text{arctang} \frac{R_{i\alpha}}{X_{i\alpha}}$$

$$Z_{i\alpha} = \left| R_{i\alpha} + jX_{i\alpha} \right| e^{j\left(\frac{¶}{2} - \delta_{i\alpha}\right)}$$

$\dot{Y}_{ii} = jY_{ii}$ admitância total entre o nó i e a terra, incluindo a eventual admitância real (entre o nó e a terra) e as admitâncias devido às capacidades distribuídas das linhas que passam por i.

$\dot{N}_i = \dot{U}_i \dot{I}_i$ potência aparente injetada no nó i

tem-se que:-

$$\dot{I}_i = \dot{I}_{i\alpha} + \dot{I}_{ii}$$

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_\alpha}{\dot{Z}_{i\alpha}} + \dot{U}_i \dot{Y}_{ii}$$

$$\dot{I}_i = \frac{U_i(\cos\theta_i + j\,\mathrm{sen}\,\theta_i) - U_\alpha(\cos\theta_\alpha + j\,\mathrm{sen}\,\theta_\alpha)}{Z_{i\alpha}(\mathrm{sen}\,\delta_{i\alpha} + j\cos\delta_{i\alpha})} +$$

$$+ U_i(\cos\theta_i + j\,\mathrm{sen}\,\theta_i)\, jY_{ii}$$

$$\dot{N}_i = U_i(\cos\theta_i + j\,\mathrm{sen}\,\theta_i) \times$$

$$\left[\frac{U_i(\cos\theta_i - j\,\mathrm{sen}\theta_i) - U_\alpha(\cos\theta_\alpha - j\,\mathrm{sen}\theta_\alpha)}{Z_{i\alpha}(\mathrm{sen}\delta_{i\alpha} - j\cos\delta_{i\alpha})} - \right.$$

$$\left. - jU_i Y_{ii}(\cos\theta_i - j\,\mathrm{sen}\theta_i)\right]$$

Efetuando e agrupando os termos, obtem-se:-

$$\dot{N}_i = \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \mathrm{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \mathrm{sen}\,\delta_{i\alpha} -$$

$$- j \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + j \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \cos \delta_{i\alpha} - jU_i^2 Y_{ii}$$

(4.6)

Portanto as expressões das potências ativas e reativas injetadas no nó i são, respectivamente, dadas por:-

$$I_i(\bar{\Theta}, \bar{U}) = \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_\alpha \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}\delta_{i\alpha} \quad (4.7)$$

$$K_i(\bar{\Theta}, \bar{U}) = -\sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_\alpha \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \cos\delta_{i\alpha} - Y_{ii} U_i^2$$

Substituindo-se (4.7) nas relações de injeção (4.5), tem-se:-

$$\sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_\alpha \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}\delta_{i\alpha} - P_i + C_i = 0$$

(4.8)

$$- \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_\alpha \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \cos\delta_{i\alpha} - Y_{ii} U_i^2 - Q_i + D_i = 0$$

Portanto, as equações de injeção contém todos os elementos físicos do sistema e definem completamente o estado do sistema.

4.3.b - Teorema de Kuhn e Tucker

No equacionamento, para a definição da condição econômica, utiliza-se o teorema de Kuhn e Tucker, teorema este para resolução de problema de otimização de sistemas não lineares com

restrições, que será exposto em seguida.

Considere-se, a função:-

$$F(\bar{X}) \tag{4.9}$$

sendo X, um vetor que tem como componentes X_0, X_1,.....X_i,..... ...X_z e as funções

$$H_k(\bar{X}) = 0 \quad (k = 1,2,3.....) \tag{4.10}$$

$$G_m(\bar{X}) \leq 0 \quad (m = 1,2,3.....) \tag{4.11}$$

Na hipótese de que as funções em questão tenham a convexidade conveniente, a condição necessária e suficiente para que $F(\bar{X})$ seja mínima, sob as restrições formuladas pelas equações (4.10) e (4.11), é que existam números quaisquer:-

$$\alpha_k \geq 0 \tag{4.12}$$

$$\beta_m \geq 0 \tag{4.13}$$

tais que, construída a função:-

$$L = F(\bar{X}) + \Sigma\, \alpha_k H_k(\bar{X}) + \Sigma\, \beta_m G_m(\bar{X}) \tag{4.14}$$

sejam satisfeitas as seguintes condições

$$\frac{\partial L(\bar{X})}{\partial X_i} = 0 \tag{4.15}$$

$$\beta_m G_m(\bar{X}) = 0 \tag{4.16}$$

para o valor de $\bar{X}$, que torna mínima a função F.

Os fatores α_k e β_m, são chamados "variáveis duais", associadas, respectivamente, às equações de restrição (4.10) e (4.11).

A equação (4.16) quer significar que ambos β_m e G_m, são nulos, quando a função F é minima.

4.3.c - Aplicação do Teorema de Kuhn e Tucker no Despacho Econômico (2)

As relações do despacho econômico são derivadas pela aplicação das condições (4.15) e (4.16) do teorema, de acordo com o que será exposto no item seguinte 4.3.d. Portanto, para tal, deve-se associar inicialmente às (4.9), (4.10) e (4.11) às funções dos custos e as equações do sistema elétrico, e devendo-se introduzir também as variáveis duais.

4.3.c.1 - Sendo as despesas de produção dadas por:-

$$F(P_0, P_1, \ldots\ldots, P_i, \ldots\ldots P_N), \qquad (4.17)$$

esta função poderá ser identificada à $\bar{F}(X)$ (4.9) do Teorema, e consequentemente $(P_0, P_1 \ldots, P_i, \ldots\ldots P_N)$, constituem um grupo das Z componentes X_i do vetor X e são variáveis interdependentes em virtude das equações de injeção (4.5).

$$F(P_0, P_1, \ldots\ldots, P_i, \ldots\ldots P_N) \rightarrow \bar{F}(X)$$

$$P_0, P_1, \ldots\ldots, P_i, \ldots\ldots P_N \rightarrow X_0, X_1, \ldots\ldots X_i, \ldots\ldots X_Z$$

4.3.c.2 - As relações de injeção (4.8)

$$\sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_{\alpha} \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}\delta_{i\alpha} - P_i + C_i = 0$$

$$-\sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_{\alpha} \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \cos\delta_{i\alpha} - Y_{ii} U_i^2 - Q_i + D_i = 0$$

poderá corresponder às funções nulas $H_k(\bar{X}) = 0$, onde as componentes de $\bar{X}$ que figuram nas equações são respectivamente:-

$$P_i,\ \theta_i,\ U_i \qquad 0 \leq i \leq N$$

e

$$Q_i,\ \theta_i,\ U_i \qquad 0 \leq i \leq N$$

As variáveis dependentes P_i e Q_i aparecem, evidentemente, somente quando as equações são aplicadas aos nós de produção, enquanto θ_i e U_i aparecem nas equações relativas a todos os nós, inclusive naqueles de consumo puro.

$$I_i(\bar{\theta}, \bar{U}) - P_i + C_i = 0 \rightarrow H_1(\bar{X})$$

$$K_i(\bar{\theta}, \bar{U}) - Q_i + D_i = 0 \rightarrow H_2(\bar{X})$$

$\alpha_1 = \lambda_i \geq 0$ variáveis duais associadas, respectivamente.

$\alpha_2 = \mu_i \geq 0$

4.3.c.3 - As equações de desigualdade do sistema que correspondem às equações $G_m(\bar{X}) \leq 0$ do teorema, são as limitações físicas do sistema, ou seja, devido às limitações dos geradores, devido às limitações das tensões nos nós e devido às limitações da capacidades de transporte das linhas.

Limitações dos Geradores:-

i - índice referente a um gerador genérico

S_{iM} - potência aparente máxima

P_{im} - potência ativa mínima

Q_{iM} - potência reativa máxima

Q_{im} - potência reativa mínima

$$G_1 = (P_i^2 + Q_i^2 - S_{iM}^2) \leq 0 \qquad (4.18)$$

$\beta_i = M_i \geq 0$ variável dual associada

$$G_2 = (P_{im} - P_i) \leq 0 \qquad (4.19)$$

$\beta_2 = M_i' \geq 0$ variável dual associada

$$G_3 = (Q_i - Q_{iM}) \leq 0 \qquad (4.20)$$

$\beta_3 = e_i \geq 0$ variável dual associada

$$G_4 = (Q_{im} - Q_i) \leq 0 \qquad (4.21)$$

$\beta_4 = e_i' \geq 0$ variável dual associada

Limitações das Tensões nos nós:-

U_{iM} - módulo da tensão máxima

U_{im} - módulo da tensão mínima

$$G_5 = (U_i - U_{iM}) \leq 0 \qquad (4.22)$$

$\beta_5 = v_i \geq 0$ variável dual associada

$$G_6 = (U_{im} - U_i) \leq 0 \qquad (4.23)$$

$\beta_6 = v_i' \geq 0$ variável dual associada

Limitações das capacidades de transporte das linhas:-

θ_i - ângulo de fase da tensão no ponto i

θ_α - ângulo de fase da tensão nos pontos vizinhos α

$T_{i\alpha}$ - ângulo de torque, diferença permitida entre as fases, no início e no fim da linha $i\alpha$, visando a estabilidade.

$$G_7 = (\theta_i - \theta_\alpha - T_{i\alpha}) \leq 0 \qquad (4.24)$$

$\beta_7 = t_{i\alpha} \geq 0$ variável dual associada

As limitações devido às tensões nos nós e capacidade de transporte têm que ser relacionadas com as condições correspondentes a um futuro possível,

A função geral do teorema de Kuhn e Tucker:-

$$L = F(\bar{X}) + \Sigma\, \alpha_k (\bar{X}) + \Sigma\, \beta_m G_m (\bar{X}) \qquad (4.14)$$

após as associações poderá ser escrita da seguinte forma:-

$$L = F(P_i) + \sum_i \lambda_i \left[I_i (\bar{\theta},\bar{U}) - P_i + C_i \right] + \sum_i \mu_i \left[K_i (\bar{\theta},\bar{U}) - \right.$$

$$\left. - Q_i + D_i \right] + \sum_i M_i (P_i^2 + Q_i^2 - S_{iM}^2) + \sum_i M_i (P_{im} - P_i) +$$

$$+ \sum_i e_i (Q_i - Q_{iM}) + \sum_i e_i' (Q_{im} - Q_i) + \sum_i v_i (U_i - U_{iM}) +$$

$$+ \sum_i v_i' (U_{im} - U_i) + \sum_i t_i (\theta_i - \theta_\alpha - T_{i\alpha})$$

$$0 \leq i \leq N$$

4.3.d - Desenvolvimento das relações do despacho econômico

Segundo o exposto no item 4.3.b a condição ótima é obtida pelas relações (4.15) e (4.16), ou seja, respectivamente.

$$\frac{\partial L(\bar{X})}{\partial X_i} = 0$$

$$\beta_m G_m (\bar{X}) = 0$$

Neste item, serão desenvolvidas as equações referentes à (4.15), pela derivação da função (4.25) em relação a P_i, Q_i, θ_i e U_i.

4.3.d.1 - Derivadas em relação a P_i

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial F}{\partial P_i} - \lambda_i + 2 M_i P_i - M_i' = 0$$

$$\lambda_i = \frac{\partial F}{\partial P_i} + 2 M_i P_i - M_i' \qquad (4.26)$$

(aplicável nos nós de produção).

4.3.d.2 - Derivadas em relação a Q_i

$$\frac{\partial L}{\partial Q_i} = - \mu_i + 2 M_i Q_i + e_i - e_i'$$

$$\mu_i = 2 M_i Q_i + e_i - e_i' \qquad (4.27)$$

(aplicável nos nós de produção).

4.3.d.3 - Derivadas em relação a Θ_i e U_i

Na função geral (4.25) os termos que contêm Θ_i e U_i são somente:-

$$\Sigma\lambda_i I_i,\ \Sigma\mu_i K_i,\ \Sigma v_i (U_i - U_{iM}),\ \Sigma v_i' (U_{im} - U_i) \quad \text{e}$$

$$\sum_{\alpha} t_{i\alpha} (\Theta_i - \Theta_\alpha - T_{i\alpha})$$

logo:-

$$\frac{\partial L}{\partial \Theta_i} = \frac{\partial}{\partial \Theta_i} \left[\Sigma\lambda_i I_i + \Sigma\mu_i K_i \right] + \sum_{\alpha} (t_{i\alpha} - t_{\alpha i}) = 0 \qquad (4.28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial U_i} = \frac{\partial}{\partial U_i} \left[\Sigma\lambda_i I_i + \Sigma\mu_i K_i \right] + (v_i - v_i') = 0 \qquad (4.29)$$

As duas primeiras somatórias podem ser escritas da seguinte maneira:-

$$\Sigma\lambda_i\ I_i = \lambda_i\ I_i + \Sigma\lambda_\alpha\ I_\alpha$$

$$\Sigma\mu_i\ K_i = \mu_i\ K_i + \Sigma\mu_\alpha\ K_\alpha$$

onde o índice α representa os nós vizinhos do nó $i,\ldots,i-2,i-1,i+1,i+2,\ldots$

fazendo-se por brevidade

$$\Theta_i = U_i = X_i \tag{4.30}$$

tem-se:-

$$\frac{\partial}{\partial X_i}\left[\Sigma\ \lambda_i\ I_i\right] = \lambda_i\ \frac{\partial I_i}{\partial X_i} + \sum_\alpha \lambda_\alpha\ \frac{\partial I_\alpha}{\partial X_i} \tag{4.31}$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i}\left[\Sigma\ \mu_i\ K_i\right] = \mu_i\ \frac{\partial K_i}{\partial X_i} + \sum_\alpha \mu_\alpha\ \frac{\partial K_\alpha}{\partial X_i} \tag{4.32}$$

Segundo (4.31), (4.32) e a consideração (4.30) as equações (4.28) e (4.29) assumem o seguinte aspecto:-

$$\lambda_i\ \frac{\partial I_i}{\partial \Theta_i} + \sum_\alpha \lambda_\alpha\ \frac{\partial I_\alpha}{\partial \Theta_i} + \mu_i\ \frac{\partial K_i}{\partial \Theta_i} + \sum_\alpha \mu_\alpha\ \frac{\partial K_\alpha}{\partial \Theta_i} + \sum_\alpha (t_{i\alpha} - t_{\alpha i}) = 0 \tag{4.33}$$

$$\lambda_i\ \frac{\partial I_i}{\partial U_i} + \sum_\alpha \lambda_\alpha\ \frac{\partial I_\alpha}{\partial U_i} + \mu_i\ \frac{\partial K_i}{\partial U_i} + \sum_\alpha \mu_\alpha\ \frac{\partial K_\alpha}{\partial U_i} + (v_i - v_i') = 0$$

As derivadas de I_i e K_i em relação a Θ_i e U_i são obtidas facilmente pela expressão (4.7), ou seja,

$$I_i = \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}}\ \mathrm{sen}(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_\alpha \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}}\ \mathrm{sen}\delta_{i\alpha}$$

$$K_i = -\sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_{\alpha} \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \cos\delta_{i\alpha} - Y_{ii} U_i^2 \qquad (4.7)$$

logo:-

$$\frac{\partial I_i}{\partial \theta_i} = \sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial \theta_i} = \sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial I_i}{\partial U_i} = \sum_{\alpha} \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_{\alpha} \frac{2U_i}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}\delta_{i\alpha}$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial U_i} = -\sum_{\alpha} \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_{\alpha} \frac{2U_i}{Z_{i\alpha}} \cos\delta_{i\alpha} -$$

$$- 2 Y_{ii} U_i$$

Para a obtenção das derivadas de I_α e K_α em relação θ_i e U_i, parte-se das expressões análogas às (4.7)

$$I_\alpha = \sum_{j} \frac{U_i U_j}{Z_{\alpha j}} \operatorname{sen}(\theta_\alpha - \theta_j - \delta_{\alpha j}) + \sum_{j} \frac{U_\alpha^2}{Z_{\alpha j}} \operatorname{sen}\delta_{\alpha j} \qquad (4.35)$$

$$K_\alpha = -\sum_{j} \frac{U_\alpha U_j}{Z_{\alpha j}} \cos(\theta_\alpha - \theta_j - \delta_{\alpha j}) + \sum_{j} \frac{U_\alpha^2}{Z_{\alpha j}} \cos\delta_{\alpha j} - Y_{\alpha\alpha} U_\alpha^2$$

nas quais, o índice j indica os nós vizinhos do nó α, entre os quais figura também o nó i. Logo, teremos entre os termos das $\sum_j$, aquele para o qual j = i, ou seja,

$$\theta_j = \theta_i \qquad \delta_{\alpha j} = \delta_{\alpha i} = \delta_{i\alpha}$$

$$U_j = U_i \qquad Z_{\alpha j} = Z_{\alpha i} = Z_{i\alpha}$$

Isto posto, derivando-se as expressões (4.35) em relação a θ_i e U_i, resulta:-

$$\frac{\partial I_\alpha}{\partial \theta_i} = - \frac{U_\alpha U_i}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial K_\alpha}{\partial \theta_i} = - \frac{U_\alpha U_i}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial I_\alpha}{U_i} = \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial K_\alpha}{\partial U_i} = - \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha})$$

Substituindo as derivadas de I_i, K_i, I_α, K_α, calculadas, em (4.33) e (4.34), tem-se finalmente:-

$$\lambda_i \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) - \sum_\alpha \lambda_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$+ \mu_i \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) - \sum_\alpha \mu_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$+ \sum_\alpha (t_{i\alpha} - t_{\alpha i}) = 0 \qquad (4.36$$

$$\lambda_i \sum_{\alpha} \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \lambda_i \sum_{\alpha} \frac{2U_i}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}\delta_{i\alpha} +$$

$$+ \sum_{\alpha} \lambda_\alpha \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha}) - \mu_i \sum_{\alpha} \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) +$$

$$+ \mu_i \sum_{\alpha} \frac{2U_i}{Z_{i\alpha}} \cos\delta_{i\alpha} - 2\mu_i Y_{ii} U_i - \sum_{\alpha} \mu_\alpha \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha}) +$$

$$+ (v_i - v_i') = 0 \qquad 4.37)$$

(aplicáveis em todos os nós).

4.3.e - Equações resultantes do estudo do despacho econômico

O conjunto das equações que solucionam o problema do despacho econômico é constituído pelas relações de injeção, aplicáveis em qualquer condição, e pelas equações que definem a condição econômica, ou seja, as equações obtidas pela derivação da função geral, L, e as equações de exclusão correspondentes à condição $\frac{\partial L}{\partial X_i} = 0$ e $\beta_m G_m = 0$, respectivamente, do teorema de Kuhn e Tucker.

Relações de Injeção

$$\sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_{\alpha} \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}\delta_{i\alpha} - P_i + C_i = 0 \qquad (4.8)$$

$$-\sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_{\alpha} \frac{U_i^2}{Z_{i\alpha}} \cos\delta_{i\alpha} - Y_{ii} U_i^2 - Q_i + D_i = 0$$

Relações do despacho econômico

$$\lambda_i = \frac{\partial F}{\partial P_i} + 2 M_i P_i - M_i' \tag{4.26}$$

$$\mu_i = 2 M_i Q_i + e_i - e_i' \tag{4.27}$$

$$\lambda_i \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) - \sum_\alpha \lambda_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha}) +$$

$$+ \mu_i \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) - \sum_\alpha \mu_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha}) +$$

$$+ \sum_\alpha (t_{i\alpha} - t_{\alpha i}) \tag{4.36}$$

$$\lambda_i \sum_\alpha \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \lambda_i \sum_\alpha \frac{2U_i}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}\delta_{i\alpha} +$$

$$+ \sum_\alpha \lambda_\alpha \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha}) - \mu_i \sum_\alpha \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) +$$

$$+ \mu_i \sum_\alpha \frac{2U_i}{Z_{i\alpha}} \cos\delta_{i\alpha} - 2\mu_i Y_{ii} U_i - \sum_\alpha \mu_\alpha \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha}) +$$

$$+ (v_i - v_i') = 0 \tag{4.37}$$

$$(P_i^2 + Q_i^2 - S_{iM}^2) \leq 0 \tag{4.38}$$

$$M_i \geq 0$$

$$M_i (P_i^2 + Q_i^2 - S_{iM}^2) = 0$$

$$(P_{im} - P_i) \leq 0$$

$$M_i' \geq 0 \qquad (4.39)$$

$$M_i' (P_{im} - P_i) = 0$$

$$(Q_i - Q_{iM}) \leq 0$$

$$e_i \geq 0 \qquad (4.40)$$

$$e_i (Q_i - Q_{iM}) = 0$$

$$(Q_{im} - Q_i) \leq 0$$

$$e_i' \geq 0 \qquad (4.41)$$

$$e_i' (Q_{im} - Q_i) = 0$$

$$(U_i - U_{iM}) \leq 0$$

$$v_i \geq 0 \qquad (4.42)$$

$$v_i (U_i - U_{iM}) = 0$$

$$(U_{im} - U_i) \leq 0$$

$$v_i' \geq 0 \qquad (4.43)$$

$$v_i'(U_{im} - U_i) = 0$$

$$(\theta_i - \theta_\alpha - T_{i\alpha}) \leq 0$$

$$t_{i\alpha} \geq 0 \qquad (4.44)$$

$$t_{i\alpha}(\theta_i - \theta_\alpha - T_{i\alpha}) = 0$$

Nos nós de produção, as incógnitas são:- θ_i, U_i, λ_i, μ_i, P_i, Q_i, mais as variáveis duais não nulas. As equações disponíveis são:- (4.26), (4.27), (4.36), (4.37), (4.8), mais uma equação para cada variável dual positiva.

Nos nós de consumo puro, as incógnitas são:- θ_i, U_i, λ_i, μ_i, mais as variáveis duais diferentes de zero. As equações disponíveis são:- (4.8), (4.36), (4.37), mais uma equação para cada variável dual positiva.

Pode-se contar, sempre, com um número de equações, igual ao número de incógnitas, para cada nó:- o sistema de equações correspondente, portanto, é teoricamente susceptível de solução.

4.3.f - Interpretação das variáveis duais

Tendo-se constante os consumos de potência ativa e reativa, a expressão dL, diferencial da função geral L, assumirá a

seguinte forma na condição ótima:-

$$dL = dF + \sum_i \lambda_i \cdot d(I_i - P_i) + \sum_i \mu_i \cdot d(K_i - Q_i) +$$

$$+ \sum_i M_i \cdot d(P_i^2 + Q_i^2) - \sum_i M_i' \, dP_i + \sum_i e_i \, dQ_i - \sum_i e_i' \, dQ_i +$$

$$+ \sum_i v_i \, dU_i - \sum_i v_i' \, dU_i + \sum_\alpha t_{i\alpha} \cdot d(\Theta_i - \Theta_\alpha) = 0 \qquad (4.45)$$

4.3.f.1 - Interpretação de λ_i

Da relação de injeção

$$I_i (\bar{\Theta}, \bar{U}) - P_i + C_i = 0$$

supondo uma variação de ΔC_i no consumo de potência ativa e supondo constante todas as outras grandezas, tem-se a equação:-

$$\Delta (I_i - P_i) = - \Delta C_i \qquad (4.46)$$

Fazendo-se as mesmas suposições e passando-se para o campo das diferenças finitas da expressão (4.45), tem-se que:-

$$\Delta F + \lambda_i \Delta (I_i - P_i) = 0$$

$$\Delta (I_i - P_i) = - \frac{\Delta F}{\lambda_i} \qquad (4.47)$$

Logo, de (4.46) e (4.47), igualando os segundos membros, tem-se o valor de λ_i

$$\lambda_i = \frac{\Delta F}{\Delta C_i} \qquad (4.48)$$

Portanto, na condição de ótimo e sem atingir os vínculos, λ_i é o custo marginal ou incremental da energia ativa produzida em relação ao consumo, no ponto i.

Se a potência ativa tiver um valor limite superior, isto é, se for verificada a condição (4.38), então, de (4.45) ter-se-ia que:-

$$\Delta F + \lambda_i \Delta(I_i - P_i) + M_i \Delta(P_i^2 + Q_i^2) = 0$$

$$\Delta(I_i - P_i) = - \frac{\Delta F + M_i \Delta(P_i^2 + Q_i^2)}{\lambda_i}$$

e a nova expressão para λ_i se torna

$$\lambda_i = \frac{\Delta F}{\Delta C_i} + M_i \frac{\Delta(P_i^2 + Q_i^2)}{\Delta C_i}$$

portanto.-

$$\lambda_i \geq \frac{\Delta F}{\Delta C_i} \qquad (4.49)$$

Se, por outro lado, a potência ativa for limitada inferiormente pelo vínculo (4.39), então, de (4.45)

$$\Delta F + \lambda_i \cdot \Delta(I_i - P_i) - M_i' \Delta P_i = 0$$

Logo:-

$$\lambda_i = - \frac{\Delta F}{\Delta C_i} - M_i' \frac{\Delta P_i}{\Delta C_i}$$

e

$$\lambda_i \leq \frac{\Delta F}{\Delta C_i} \qquad (4.50)$$

4.3.f.2 - Interpretação de μ_i

Ao invés de ΔC_i, supõe-se agora uma variação ΔD_i, do consumo de reativo, ficando sem alterar todos os outros elementos. Tem-se pela relação de injeção

$$K_i(\bar{\theta}, \bar{U}) - Q_i + D_i = 0$$

que

$$\Delta(K_i - Q_i) = - \Delta D_i \qquad (4.51)$$

e pela expressão (4.45)

$$\Delta(K_i - Q_i) = - \frac{\Delta F}{\mu_i} \qquad (4.52)$$

Igualando-se os segundos membros de (4.51) e (4.52):-

$$\mu_i = \frac{\Delta F}{\Delta D_i} \qquad (4.53)$$

μ_i, representa, portanto, o custo incremental da energia reativa em relação ao centro gerador i.

No caso de haver o vínculo superior (4.40), a expressão (4.52) se torna:-

$$\Delta(K_i - Q_i) = - \frac{\Delta F + e_i \Delta Q_i}{\mu_i}$$

portanto

$$\mu_i = \frac{\Delta F}{\Delta D_i} + e_i \frac{\Delta Q_i}{\Delta D_i}$$

$$\mu_i \geq \frac{\Delta F}{\Delta D_i} \qquad (4.54)$$

No caso de ser verificada entretanto a condição de vínculo inferior (4.41), (4.52) toma a forma:-

$$\Delta(K_i - Q_i) = - \frac{\Delta F - e_i' \Delta Q_i}{\mu_i}$$

logo:-

$$\mu_i = \frac{\Delta F}{\Delta D_i} - e_i' \frac{\Delta Q_i}{\Delta D_i}$$

$$\mu_i \leq \frac{\Delta F}{\Delta D_i} \qquad (4.55)$$

Deve-se observar finalmente, que se a produção de reativo não tiver limitações, uma variação ΔD_i de consumo, pode ser compensada, por um acréscimo ΔQ_i de produção, que por hipótese, não acarreta um aumento de custo.

Nesta condição, evidentemente

$$\mu_i = 0$$

Analogamente, a falta de reativo (limitação superior) dá-se $\mu_i \geq 0$ e o excesso (limitação inferior) $\mu_i \leq 0$.

Para um nó de consumo puro, μ_i é diferente de zero, pois a demanda de reativo modifica o transporte de energia e consequentemente as perdas por transmissão, acarretando uma variação no custo total de produção.

4.3.f.3 - Interpretação das outras variáveis duais

Através de um procedimento análogo ao dos itens precedentes; admitindo-se variações - na condição ótima - respecti

vamente, para as magnitudes de:-

S^2_{iM}, P_{im}, Q_{iM}, Q_{im}, U_{iM}, U_{im}, $T_{i\alpha}$, tem-se que:-

$$M_i = - \frac{\Delta F}{\Delta S^2_{iM}} \qquad (4.56)$$

$$M'_i = \frac{\Delta F}{\Delta P_{im}} \qquad (4.57)$$

$$e_i = - \frac{\Delta F}{\Delta Q_{iM}} \qquad (4.58)$$

$$e'_i = \frac{\Delta F}{\Delta Q_{im}} \qquad (4.59)$$

$$v_i = - \frac{\Delta F}{\Delta Q_{iM}} \qquad (4.60)$$

$$v'_i = \frac{\Delta F}{\Delta U_{im}} \qquad (4.61)$$

$$t_{i\alpha} = - \frac{\Delta F}{\Delta T_{i\alpha}} \qquad (4.62)$$

As variáveis duais, portanto, se identificam com os custos incrementais de produção, em relação aos respectivos vínculos, e evidentemente, valores excessivos dos referidos custos marginais, podem justificar a entrada em serviço de outros elementos no sistema.

CAPÍTULO V

RESOLUÇÃO NUMÉRICA DAS RELAÇÕES DO DESPACHO ECONÔMICO

5.1 - INTRODUÇÃO

Pelas relações de injeção e pela aplicação do teorema de Kuhn e Tucker, o cálculo da condição econômica do funcionamento de um sistema elétrico de potência, resume-se na resolução de seis equações para cada barra do sistema (Vide item 4.3.e), observando-se que para os nós de consumo puro duas das equações podem ser eliminadas, e ainda que, para cada variável, as limitações físicas do sistema devem ser consideradas.

O processo de cálculo, sugerido pelos franceses para o sistema de equações resultante, é o processo das aproximações sucessivas, visando utilizar as equações relativas ao ponto i, para efetuar a correção de θ_i, U_i, λ_i, μ_i e eventualmente P_i e Q_i. Às vezes, as limitações impostas pelas condições de exclusão, sugerem corrigir as magnitudes θ_i, U_i, λ_i, μ_i, P_i e Q_i, relativas ao nó i e as magnitudes λ_α, μ_α, P_α e Q_α, dos nós vizinhos, deixando porém, sem alterar, θ_α e U_α. Tais variáveis sofreriam acréscimos, somente no caso em que não fossem satisfeitas as relações de injeção.

Com este procedimento, análogo ao de Gauss-Seidel, são determinados os valores das variáveis de um nó do sistema, em seguida o do nó vizinho, e assim sucessivamente, para todos os nós do sistema, completando uma iteração. São executadas tantas iterações quanto as necessárias até que os valores das variáveis, para todos os nós do sistema, tenham se estabilizado dentro de uma precisão desejada.

Apesar da relativa simplicidade da idéia sugerida, não se conseguiu descobrir a sequência exata de variação das variáveis, e das equações respectivamente aplicadas, seguida pelos franceses.

Devido ao fato de que, os valores pré-calculados são utilizados nos cálculos seguintes e pelas características das equações, acredita-se que exista uma sequência ótima de cálculo, e provavelmente seja aquela dos franceses, tendo-se em conta os resultados por eles obtidos, com um pequeno número de iterações. Esta hipótese não foi verificada com muita exatidão; apenas algumas outras sequências foram tentadas, obtendo-se porém resultados muito inferiores.

Abandonando-se a sugestão de Carpentier, um outro processo de cálculo foi tentado, obtendo-se os mesmos resultados dos franceses.

Este processo consiste na aplicação do teorema de Newton-Raphson nas equações do despacho econômico, porém, não de nó em nó, mas para todos os nós do sistema simultaneamente, ou seja, a aplicação do teorema no conjunto de equações, resultados da aplicação das equações do despacho econômico, em todos os nós do network.

2 - TEOREMA DE NEWTON-RAPHSON (5)

O teorema de Newton-Raphson, também denominado método de Newton é um método geral para a resolução de um conjunto de equações não-lineares simultâneas, utilizando-se técnicas iterativas.

Considerando-se um conjunto de equações da forma:-

$$\begin{aligned} f_1(X_1, X_2, X_3 \ldots\ldots X_n) &= 0 \\ f_2(X_1, X_2, X_3 \ldots\ldots X_n) &= 0 \\ \vdots \qquad\qquad\qquad\qquad & \vdots \\ f_n(X_1, X_2, X_3 \ldots\ldots X_n) &= 0 \end{aligned} \tag{5.1}$$

e um conjunto de valores, aleatórios ou estimados, X_1^o, X_2^o, X_3^o, ..., X_n^o e cujas diferenças, em relação aos valores exatos, são respectivamente $-\Delta X_1^o$, $-\Delta X_2^o$, $-\Delta X_3^o$, ..., $-\Delta X_n^o$, os exatos valores, portanto, assumem a forma:-

$$\begin{aligned} X_1^o &+ \Delta X_1^o \\ X_2^o &+ \Delta X_2^o \\ X_3^o &+ \Delta X_3^o \\ \vdots & \quad \vdots \\ X_n^o &+ \Delta X_n^o \end{aligned} \tag{5.2}$$

substituindo-se (5.2) em (5.1)

$$\begin{aligned} f_1(X_1^o + \Delta X_1^o, X_2^o + \Delta X_2^o, X_3^o + \Delta X_3^o, \ldots\ldots, X_n^o + \Delta X_n^o) &= 0 \\ f_2(X_1^o + \Delta X_1^o, X_2^o + \Delta X_2^o, X_3^o + \Delta X_3^o, \ldots\ldots, X_n^o + \Delta X_n^o) &= 0 \\ f_3(X_1^o + \Delta X_1^o, X_2^o + \Delta X_2^o, X_3^o + \Delta X_3^o, \ldots\ldots, X_n^o + \Delta X_n^o) &= 0 \\ \vdots & \quad \vdots \\ f_n(X_1^o + \Delta X_1^o, X_2^o + \Delta X_2^o, X_3^o + \Delta X_3^o, \ldots\ldots, X_n^o + \Delta X_n^o) &= 0 \end{aligned} \tag{5.3}$$

expandindo-se as equações obtidas pela aplicação da série geral, de Taylor, em relação aos valores estimados $X_1^{(o)}$, $X_2^{(o)}$, $X_3^{(o)}$, ..., $X_n^{(o)}$

$$f_1(X_1^o, X_2^o, \ldots, X_n^o) + \frac{\partial f_1^o}{\partial X_1}\Delta X_1^o + \frac{\partial f_1^o}{\partial X_2}\Delta X_2^o + \ldots + \frac{\partial f_1^o}{\partial X_n}\Delta X_n^o = 0$$

$$f_2(X_1^o, X_2^o, \ldots, X_n^o) + \frac{\partial f_1^o}{\partial X_1}\Delta X_1^o + \frac{\partial f_2^o}{\partial X_2}\Delta X_2^o + \ldots + \frac{\partial f_2^o}{\partial X_n}\Delta X_n^o = 0$$

$$\vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots$$

$$f_n(X_1^o, X_2^o, \ldots, X_n^o) + \frac{\partial f_n^o}{\partial X_1}\Delta X_1^o + \frac{\partial f_n^o}{\partial X_2}\Delta X_2^o + \ldots + \frac{\partial f_n^o}{\partial X_n}\Delta X_n^o = 0$$

(5.4)

Tendo-se negligenciado os termos de ordem superior, pode-se escrever de forma simbólica que:-

$$\left[f^o \right] + \left[J^o \right] \cdot \left[\Delta X^o \right] = 0 \qquad (5.5)$$

onde:-

$$\left[f^o\right] = \begin{bmatrix} f_1(X_1^o, X_2^o, \ldots\ldots, X_n^o) \\ \vdots \\ f_n(X_1^o, X_2^o, \ldots\ldots, X_n^o) \end{bmatrix} \qquad (5.6)$$

onde:-

$$\left[J^o\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_1^o}{\partial X_2} & \ldots\ldots & \frac{\partial f_1^o}{\partial X_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_n^o}{\partial X_2} & \ldots\ldots & \frac{\partial f_n^o}{\partial X_n} \end{bmatrix} \qquad (5.7)$$

$$\left[f^o\right] = \begin{bmatrix} \Delta X_1^o \\ \vdots \\ \Delta X_n^o \end{bmatrix} \qquad (5.8)$$

multiplicando-se ambos os lados de (5.5) por $\left[J^o\right]^{-1}$

$$\left[\Delta X^o\right] = - \left[J^o\right]^{-1} \cdot \left[f^o\right] \qquad (5.9)$$

Estas equações dão, aproximadamente, as correções requeridas para os valores iniciais estimados X_1^o, X_2^o, ... X_n^o. As correções são apenas aproximadas devido ao fato de se ter desprezado os termos de ordem superior na obtenção de (5.4). Então, a fim de se conseguir uma solução com uma determinada precisão, precisa ser utilizado um processo iterativo; os valores X_1^1, X_2^1, ..., X_n^1 obtidos de $\Delta X_n^o + X_n^o$, são utilizados na aplicação seguinte das equações (5.9).

Note-se que a matriz quadrada $\left[J\right]$, n x n, terá que ser recalculada e invertida em cada etapa do processo iterativo.

$\left[J\right]$ é conhecido como sendo a matriz Jacobiana do conjunto de equações $\left[f\right]$.

O processo dá uma rápida convergência, desde que, os termos de ordem superior nas equações (5.4) se tornem rapidamente muito pequenos.

5.3 - PROGRAMA OPEC

Para a resolução das equações do despacho econômico de carga, através da aplicação do teorema de Newton-Raphson, escreveu-se um programa em FØRTRAN IV do Computador Digital TR-86,da Telefunken (com 32 K palavras no CPU).

Haja visto a complexidade das equações, a política de se tentar a resolução por etapas de empreendimento dessa nature

za, dificuldade de se conferir a exatidão dos resultados obtidos pelos programas e dificuldade de obtenção de todos os dados práticos necessários de um sistema pequeno para os testes, achou-se por bem atacar o problema, nesta etapa inicial, fazendo-se as seguintes considerações simplificativas:-

a) Considerar fixas as magnitudes das tensões nas barras.

b) Não se considerar as potências reativas.

c) Não se considerar as limitações físicas do sistema.

Com estas considerações, o conjunto de 6 equações para cada nó do sistema, fica diminuído para 3 equações, sendo que, para os nós de consumo puro, este conjunto fica reduzido de 3 para 2 equações, isto, sem considerar naturalmente as equações de restrição.

5.3.1 - Equações utilizadas

As equações do despacho econômico, item 4.3.e, ficam reduzidas às formas abaixo, após as considerações feitas.

Assumindo-se que a expressão do custo de cada nó de produção do sistema seja do tipo:-

$$F_i = A_0 + A_1 P_i + A_2 P_i^2 + A_3 P_i^3 + \ldots\ldots + A_p P_i^p$$

fixando-se:-

$$P_{max} = 4$$

$$F_i = A_0 + A_1 P_i + A_2 P_i^2 + A_3 P_i^3 + A_4 P_i^4 \qquad (5.10)$$

O conjunto de equações fica:-

$$f_1 = \lambda_i - (A_1 + 2A_2 P_i + 3A_3 P_i^2 + 4A_4 P_i^3) = 0 \qquad (5.11)$$

$$f_2 = \lambda_i \sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) - \sum_{\alpha} \lambda_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\Theta_\alpha - \Theta_i - \delta_{i\alpha}) = 0$$

(5.12)

$$f_3 = \sum_{\alpha} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\Theta_i - \Theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_{\alpha} \frac{U_i^2 \operatorname{sen} \delta_{i\alpha}}{Z_{i\alpha}} - P_i + C_i = 0$$

(5.13)

As derivadas de f_1, f_2 e f_3 em relação a P_i, P_α, Θ_i, Θ_α, λ_i, λ_α, são dadas pelas expressões:-

- Derivadas de f_1

$$\frac{\partial f_1}{\partial P_i} = -2 A_2 - 6 A_3 P_i - 12 A_4 P_i^2$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial P_\alpha} = 0$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \Theta_i} = 0 \qquad (5.14)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \Theta_\alpha} = 0$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \lambda_i} = 1$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \lambda_\alpha} = 0$$

- Derivadas de f_2

$$\frac{\partial f_2}{\partial P_i} = 0$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial P_\alpha} = 0$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_i} = -\lambda_i \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) - \sum_\alpha \lambda_\alpha \frac{U_\alpha U_i}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_\alpha} = \lambda_i \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + \sum_\alpha \lambda_\alpha \frac{U_\alpha U_i}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha}) \qquad (5.15)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \lambda_i} = \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \lambda_\alpha} = - \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha})$$

- Derivadas de f_3

$$\frac{\partial f_3}{\partial P_i} = -1$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial P_\alpha} = 0$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \theta_i} = \sum_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) \qquad (5.16)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \theta_\alpha} = - \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha})$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \lambda_i} = 0$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \lambda_\alpha} = 0$$

Para um sistema de K barras com N barras geradoras, a aplicação das equações (5.11), (5.12) e (5.13), simultaneamente, para todas as barras do sistema, resultaria em um sistema de Z equações com Z incógnitas, onde $Z = 2K + N$

- as incógnitas seriam:-

$$N \cdot f_1 + K \cdot f_2 + K \cdot f_3$$

Porém, notou-se que, a equação f_2 apresenta uma característica, tal que, a soma das equações f_2, aplicada a K - 1 nó do sistema, é igual à equação f_2 aplicada ao nó K, ou seja:-

$$\sum_{i=1}^{K-1} \left[\lambda_i \sum_{\alpha}^{k} \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) - \sum_{\alpha}^{k} \lambda_\alpha \frac{U_i U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \cos(\theta_\alpha - \theta_i - \delta_{i\alpha}) \right.$$

$$= \left. \lambda_k \sum_{\alpha}^{k} \frac{U_k U_\alpha}{Z_{k\alpha}} \cos(\theta_k - \theta_\alpha - \delta_{k\alpha}) - \sum_{\alpha}^{k} \lambda_\alpha \frac{U_k U_\alpha}{Z_{k\alpha}} \cos(\theta_\alpha - \theta_k - \delta_{ik}) \right] \quad (5.17)$$

diante deste fato uma das K . f_2 equações não poderia ser utilizada.

Convencionou-se, portanto que a barra de número 1,

seria a referência com respeito ao ângulo de tensão, na qual θ_1 é fixado, sempre igual a zero, e o número de equações e incógnitas passaram a

$$Z = 2K + N - 1 \qquad (5.18)$$

tendo-se como:- incógnitas : $- N.P_i + (K - 1).\theta_i + N.\lambda_i$

equações : $- N.f_2 + (K - 1).f_2 + N.f_3$

As $N.f_1 + (K - 1) . f_2 + Kf_3$ equações resultantes são dadas pelas equações (5.19), nas quais f_{ki}, o índice k corresponde o tipo de função e o índice i o número da barra.

(Vide próxima fôlha a equação (5.19)).

$$
\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_N \\ \hline \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_K \\ \hline \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \\ \vdots \\ \Delta\lambda_K \end{bmatrix} =
\begin{bmatrix}
\frac{\partial \delta_{11}}{\partial P_1} & 0 \cdots 0 & 0 & 0 \cdots 0 & 1 & 0 \cdots 0 \\
0 & \frac{\partial \delta_{12}}{\partial P_2} \cdots 0 & 0 & 0 \cdots 0 & 0 & 1 \cdots 0 \\
\vdots & \vdots \quad \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots \\
0 & 0 \cdots \frac{\partial \delta_{1N}}{\partial P_N} & 0 & 0 \cdots 0 & 0 & 0 \cdots 0 \\
\hline
0 & 0 \cdots 0 & \frac{\partial \delta_{22}}{\partial Q_2} & \frac{\partial \delta_{22}}{\partial Q_3} \quad \frac{\partial \delta_{22}}{\partial Q_K} & \frac{\partial \delta_{22}}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial \delta_{22}}{\partial \lambda_2} \cdots \frac{\partial \delta_{22}}{\partial \lambda_K} \\
0 & 0 \cdots 0 & \frac{\partial \delta_{23}}{\partial Q_2} & \frac{\partial \delta_{23}}{\partial Q_3} \cdots \frac{\partial \delta_{23}}{\partial Q_K} & \frac{\partial \delta_{23}}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial \delta_{23}}{\partial \lambda_2} \cdots \frac{\partial \delta_{23}}{\partial \lambda_K} \\
\vdots & \vdots \quad \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots \\
0 & 0 \cdots 0 & \frac{\partial \delta_{2K}}{\partial Q_2} & \frac{\partial \delta_{2K}}{\partial Q_3} \cdots \frac{\partial \delta_{2K}}{\partial Q_K} & \frac{\partial \delta_{2K}}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial \delta_{2K}}{\partial \lambda_2} \cdots \frac{\partial \delta_{2K}}{\partial \lambda_K} \\
\hline
-1 & 0 \cdots 0 & \frac{\partial \delta_{32}}{\partial Q_2} & \frac{\partial \delta_{32}}{\partial Q_3} \cdots \frac{\partial \delta_{32}}{\partial Q_K} & 0 & 0 \cdots 0 \\
0 & -1 \cdots 0 & \frac{\partial \delta_{33}}{\partial Q_2} & \frac{\partial \delta_{33}}{\partial Q_3} \cdots \frac{\partial \delta_{33}}{\partial Q_K} & 0 & 0 \cdots 0 \\
\vdots & \vdots \quad \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots \\
0 & 0 \cdots -1 & \frac{\partial \delta_{3K}}{\partial Q_2} & \frac{\partial \delta_{3K}}{\partial Q_3} \cdots \frac{\partial \delta_{3K}}{\partial Q_K} & 0 & 0 \cdots 0
\end{bmatrix}^{-1}
\begin{bmatrix} \delta_{11} \\ \delta_{12} \\ \vdots \\ \delta_{1N} \\ \hline \delta_{22} \\ \delta_{23} \\ \vdots \\ \delta_{2K} \\ \hline \delta_{31} \\ \delta_{32} \\ \vdots \\ \delta_{3K} \end{bmatrix}
\qquad (5.19)
$$

5.3.b - Objetivo do Programa OPEC

A partir dos dados:-

a) Coeficientes das equações dos custos de produção
b) Resistência e Reatância das linhas
c) Magnitude das tensões nas barras
d) Consumos de potência ativa
e) Valores das potências ativas de pré-iteração
f) Valores dos ângulos das tensões de pré-iteração
g) Valores dos custos incrementais de pré-iteração

rograma OPEC, calcula, na "condição econômica" os valores de:-

a) Potências ativas de geração
b) Ângulos das tensões nas barras
c) Custos incrementais
d) Potência ativa total de geração
e) Potência ativa total de consumo
f) Custo total de produção
g) Correntes transmitidas nas linhas
h) Potências aparentes transmitidas
i) Perdas nas linhas
j) Queda de tensão
l) Perda total do sistema

5.3.c - Descrição do programa

Consta o programa OPEC das seguintes partes:-

- Programa Principal - E/S de dados e transferência às sub rotinas
- Sub-rotina (OPEC 1) - Montagem da matriz das funções

- Sub-rotina (OPEC 2) - Montagem da matriz Jacobiano
- Sub-rotina(INMAT e INMP) - Inversão de Matriz
- Sub-rotina (FLUXO 1) - Cálculo dos fluxos de corrente e potência, e também das perdas.

5.3.c.1 - Programa Principal

No programa principal constam como comentário, os esclarecimentos básicos sobre o programa OPEC, as declarações para leitura e impressão dos dados de entrada, montagem da matriz de impedância das linhas, montagem da matriz dos ângulos $\delta_{i\alpha}$, leitura do número máximo de iterações permissível, da precisão desejada, transferência para a sub-rotina OPEC 1, para a sub-rotina OPEC 2, para a sub-rotina INMAT, para a sub-rotina FLUXO 1, cálculo dos incrementos das variáveis, dos novos valores das variáveis, teste da convergência, cálculo do custo total de produção e impressão dos resultados.

O programa foi confeccionado, de forma que, a ordem dos cartões de um determinado dado de entrada possa ser qualquer, isto é, não é necessário colocar os cartões na ordem dos números das barras, inclusive pode-se enumerar as barras de qualquer maneira, observando apenas que à barra de referência de ângulo, deve ser dado sempre o número 1.

No caso das quantidades de dados fornecidos não forem coerentes, o computador comandará através da impressora uma mensagem de erro: - "HÁ ERRO NOS DADOS FORNECIDOS".

A cada iteração, o programa verifica se os resultados dos cálculos estão convergindo; caso isto não estiver ocorrendo, é impressa a mensagem:- "O SISTEMA NÃO CONVERGE".

O maior dentre os valores absolutos dos incremen tos das variáveis é comparado com a precisão desejada; quando o primeiro se tornar menor do que o segundo, os cálculos iterativos são interrompidos dando início à impressão dos resultados finais. Uma outra forma desses cálculos serem interrompidos é através do número de iterações máximo permissível. Tanto a precisão desejada, como o número máximo de iterações, são valores de entrada do programa.

Quando os resultados intermediários de cálculo são desejados, deve-se fornecer o número código 1, caso contrário, deve-se deixar em branco este campo do cartão.

5.3.c.2 - Sub-rotina OPEC 1

Nesta sub-rotina são calculados os valores das funções f, com os últimos valores das variáveis, montando-se a matriz das funções, sem entretanto efetuar os cálculos das funções f_1 para os nós de consumo puro e nem da função f_2 para o nó número 1, eliminando-os portanto da matriz.

5.3.c.3 - Sub-rotina OPEC 2

A montagem da matriz Jacobiano é executada nesta sub-rotina, na qual são calculados os valores das derivadas das funções em relação às variáveis, porém, sem efetuar os cálculos das derivadas f_1 relativos aos nós de consumo puro e nem da derivada de f_2 relativo ao nó de referência.

5.3.c.4 - Sub-rotinas INMAT e INMP

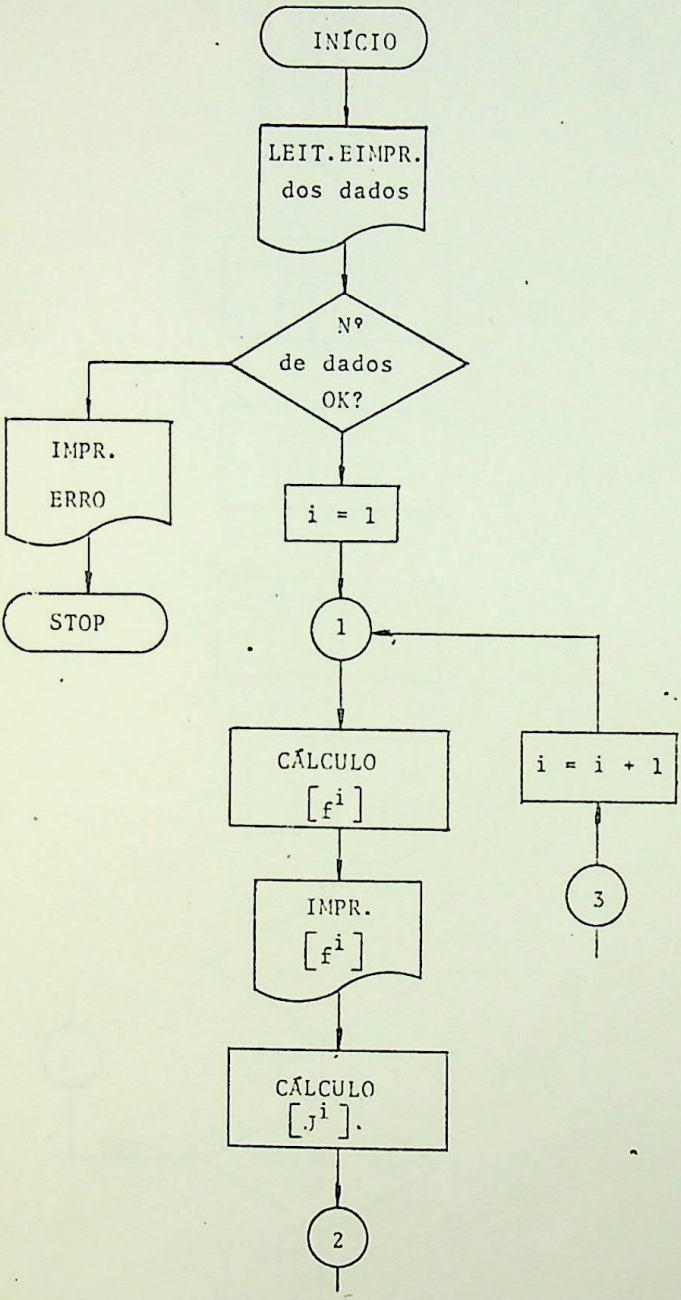
Estas sub-rotinas têm por finalidade a inversão da matriz Jacobiano, montada na sub-rotina anterior. O método utiliza

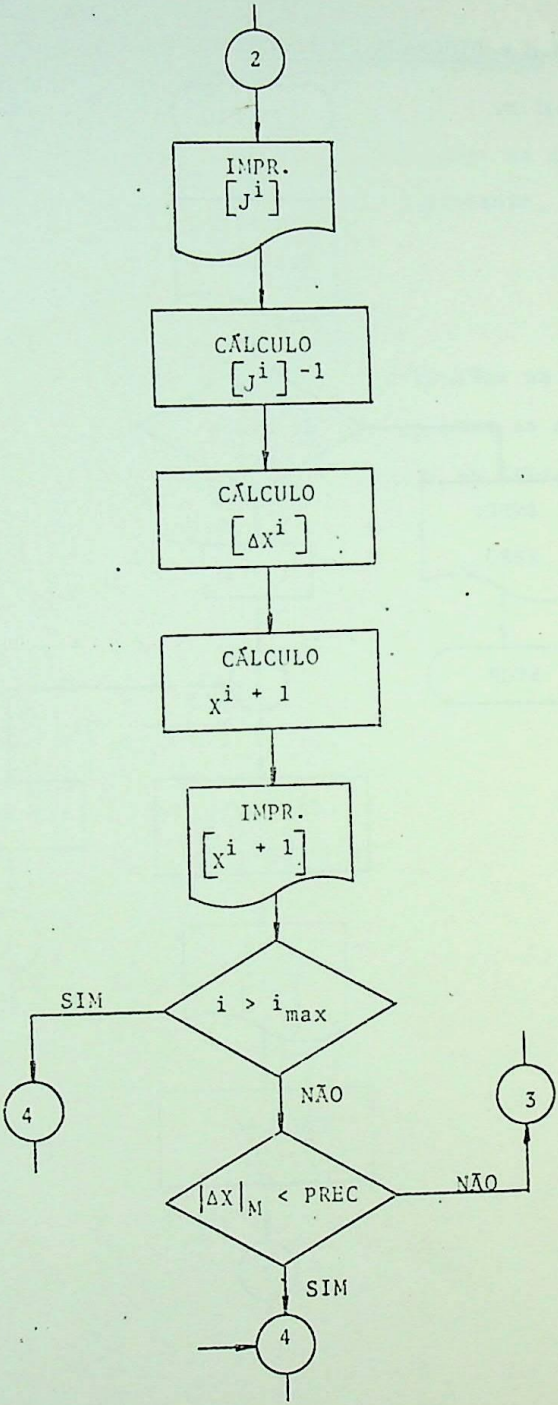
do é o dos operadores β, para o qual foi elaborado um algoritmo complementar. Este algoritmo torna possível a aplicação dos operadores em matrizes, que possuem elementos nulos na diagonal principal; lembre-se que, a matriz Jacobiana resultante, recai neste caso, devido à compactação efetuada.

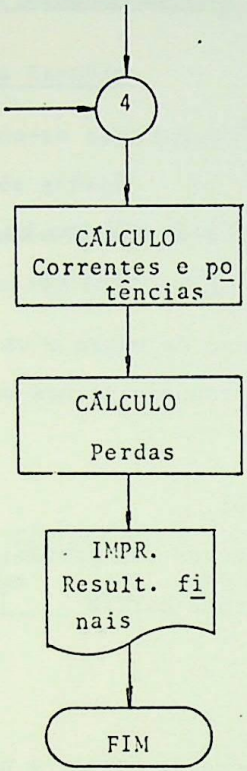
5.3.c.5 - Sub-rotina FLUXO 1

Tendo-se determinado as tensões na condição econômica, através desta sub-rotina, são calculadas as magnitudes das correntes nas linhas, as perdas, as quedas de tensão e a perda total do sistema.

5.3.d - DIAGRAMA EM BLOCOS




2
IMPR.
[J^i]
CÁLCULO
[J^i]^-1
CÁLCULO
[ΔX^i]
CÁLCULO
X^i + 1
IMPR.
[X^i + 1]
i > i_max
SIM
4
NÃO
3
|ΔX|_M < PREC
NÃO
SIM
4


4
CÁLCULO
Correntes e potências
CÁLCULO
Perdas
IMPR.
Result. finais
FIM

5.3.e - Instrução para Entrada de Dados no Programa

1) FØRMAT(3A4)

- Um cartão com a data

2) FØRMAT(20A4)

- Um cartão com o título do sistema em estudo

3) FØRMAT(A4,I6,5F14.0)

- m cartões com o número da barra e os coeficientes das equações dos custos de produção de uma barra, em cada cartão
- Um cartão com ****

4) FØRMAT(A4,I6,I5,2F10.0)

- ℓ cartões com os números das barras, a resistência e a reatância da linha em cada cartão
- Um cartão com ****

5) FØRMAT(A4,I6,5F10.0)

- n cartões com o número da barra, a potência de preiteração, o consumo, custo incremental de preiteração, magnitude da tensão, ângulo da tensão de preiteração
- Um cartão com ****

6) FØRMAT(I5,F10.0,I5)

- Um cartão com o número de iteração máxima permissível, a precisão desejada nos resultados, isto é, o maior valor absoluto da variação das variáveis, e o número 1 caso desejar a impressão dos resultados intermediários de cálculo, caso contrário, não perfurar nada neste último campo.

Sendo:-

m - quantidade de barras de geração

ℓ - quantidade de linhas

n - quantidade total de barras

5.3.f - Sistema Exemplo

Utilizou-se como exemplo um sistema de três barras, sendo duas delas de geração e uma de consumo puro. Este sistema foi usado por Carpentier, como exemplo, em seu "paper", havendo portanto, o que é muito importante, maneira de se conferir os resultados obtidos.

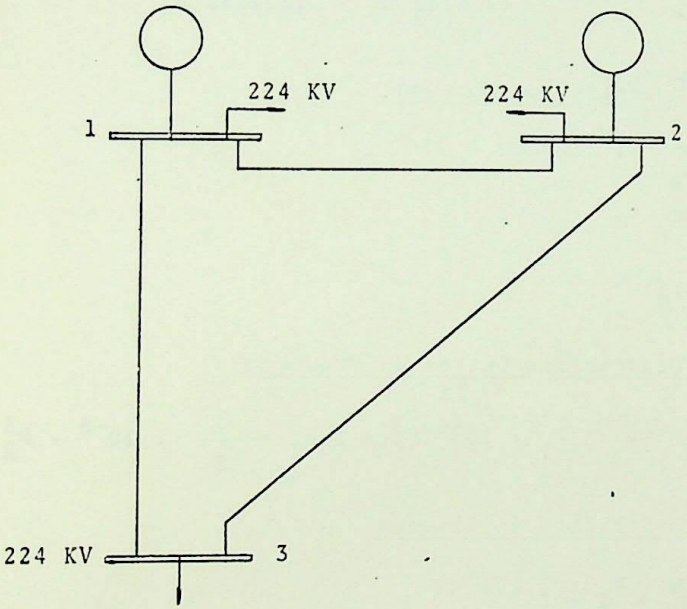


Fig. 5.1 - Sistema de 3 barras, 2 Ger. e 1 Cons. Puro

a) Módulo das Tensões

V_1 = 224 KV

V_2 = 224 KV

V_3 = 224 KV

b) Resistências e Reatâncias

1	2	48.6142 Ω	12.4132 Ω
1	3	48.6142 Ω	12.4132 Ω
2	3	48.6142 Ω	12.4132 Ω

c) Potências de Consumo

C_1 = 400 MW

C_2 = 400 MW

C_3 = 800 MW

d) Equação dos Custos de Produção

$$F = 3 P_1 + 10^{-6} P_1^3 + 2 P_2 + \frac{2}{3} \cdot 10^{-6} \cdot P_2^3$$

e) Restrições do Sistema

$0 \leq P_1 \leq 1.200$ MW

$0 \leq P_2 \leq 1.200$ MW

$T_{ia} \leq 0,55$ sobre todas as linhas

5.3.f.1 - Valores de Preiteração

BARRA	POT. GERAÇÃO	ÂNG. TENSÃO	C. INCREMENTAL
1	400.0	0.0	3.48

BARRA	POT. GERAÇÃO	ÂNG. TENSÃO	C. INCREMENTAL
2	400.0	0.0	2.32
3	0.0	0.0	2.90

5.3.f.2 - Resultado obtido por Carpentier, pelo método das aproximações sucessivas (Vide tabela anexa - Tableau I)

TABLEAU 1.

	o_1	o_2	o_3	λ_1	λ_2	λ_3	$10^3\lambda'_3$	P_1	P_2
Valeurs de départ	0	0	0	3,48	2,32	2,900		400	400
1ère itération Point 3	0	0	-0,413	4,967	3,311	5,181	5,067	809,7	809,7
1ère itération Point 1	-0,083	0	-0,413	4,259	3,587	5,846		647,8	890,9
1ère itération Point 2	-0,083	+0,061	-0,413	4,047	4,045	5,609		590,8	1011,1
Résultats 1ère itération	0	0,144	-0,330	4,047	4,045	5,609		590,8	1011,1
2ème itération Point 3	0	0,144	-0,383	4,247	4,258	5,463	5,210	643,5	1062,5
2ème itération Point 1	0,020	0,144	-0,383	4,395	4,174	5,591		681,9	1042,6
2ème itération Point 2	0,020	0,136	-0,383	4,425	4,109	5,420		689,3	1027,0
Résultats 2ème itération	0	0,116	-0,403	4,425	4,109	5,420		689,3	1027,0
3ème itération Point 3	0	0,116	-0,398	4,405	4,089	5,466	5,268	684,4	1022,1
3ème itération Point 1	-0,002	0,116	-0,398	4,390	4,098	5,471		680,6	1024,1
3ème itération Point 2	-0,002	0,117	-0,398	4,396	4,106	5,468		679,6	1026,1
Résultats 3ème itération	0	0,119	-0,396	4,386	4,106	5,468		679,6	1026,1
4ème itération Point 3	0	0,119	-0,396	4,386	4,106	5,462		679,6	1026,1
4ème itération Point 1	0	0,119	-0,396	4,386	4,106	5,462		679,6	1026,1
4ème itération Point 2	0	0,119	-0,396	4,386	4,106	5,462		679,6	1026,1
Résultats 4ème itération	0	0,119	-0,396	4,386	4,106	5,462		679,6	1026,1

A l'optimum, F = 5125,2 - Des solutions voisines ont été calculées: on vérifie bien que F est minimale au point trouvé.

U.F.M.G. — LABORATÓRIO DE COMPUTAÇÃO E SIMULAÇÃO

PROGRAMA: [illegible] — PERFURADOR: TN — PÁGINA: 1

PROGRAMADOR: [illegible] — ENTRADA: 3-11-72 SAÍDA: 3-11-72 — UNIDADE: 9

DECLARAÇÃO FORTRAN — IDENTIFICAÇÃO

```
3-11-
      7
      SISTEMA C/ 2 DIFERENTES BOMBAS DE GERAÇÃO E UMA BOMBA DE CONSUMO PURO
     1                0.0                 8.0                 0.0          0.000001                 0.0
     2                0.0                 8.0                 0.0          0.0000016667             0.0
     3                0.0                 0.0                 0.0          0.0                      0.0
C*****
     1    3      95.6333          6.4133
     2    3      89.6133         13.4133
     3    3      79.6133         23.4133
C*****
     1          300.0            300.0            3.53          229.0          0.0
     2          300.0            300.0            2.32          229.0          0.0
     3            0.0            300.0            9.30          229.0          0.0
C*****
    -3          0.0001
```

```
VR 85 FORTRAN COMPILER MV 04 (70)   FORA.

      TATUO NAKANISHI

      OPERACAO ECONOMICA DE SISTEMAS ELETRICOS

      PROGRAMA  *****  OPEC  *****

          OBJETIVO
                    O PROGRAMA DETERMINA AS POTENCIAS DE GERACAO DO SISTEMA
                    BEM COMO O ANGULO DAS TENSOES EM TODAS AS BARRAS EM RELACAO
                    A BARRA DE REFERENCIA DE MODO QUE O CUSTO TOTAL DE PRODUCAO
                    SEJA MINIMIZADO UTILIZANDO OS TEOREMAS DE KUHN-TUCKER E DE
                    NEWTON-RAPHSON

          DESCRICAO
                    PROGRAMA PRINCIPAL
                         ENTRADA E SAIDA DE DADOS E TRANSFERENCIA AS SUBROTINAS
                         CALCULO DOS INCREMENTOS E NOVOS VALORES DAS VARIAVEIS
                         MONTAGEM DA MATRIZ DOS MODULOS E ANGULO DAS IMPEDANCIAS
                    SUBROTINA OPEC1
                         MONTAGEM DA MATRIZ DAS FUNCOES
                    SUBROTINA OPEC2
                         MONTAGEM DA MATRIZ JACOBIANO
                    SUBROTINAS INVAT E INVP
                         INVERSAO DA MATRIZ JACOBIANO
                    SUBROTINA FLUXOT
                         CALCULO DO FLUXO DE POTENCIA E DE CORRENTE
                         CALCULO DAS PERDAS

          CONSIDERACOES
                    A BARRA DE REFERENCIA DEVE SER SEMPRE A BARRA NUM.  1
                    O MODULO DA TENSAO EM TODAS AS BARRA SAO MANTIDAS CONS-
                    TANTES

      REAL LAMD
      DIMENSION ITITUL(20),IAST(21),DF1(30,30),P(30),DVAR(30),IDAT(3)
      COMMON DF(30,30),F(30),A0(30),A1(30),A2(30),A3(30),A4(30),PI(30),C
     C(30),V(30),TETA(30),LAMD(30),Z(20,20),DELTA(20,20),P
      COMMON LB1(20),LB2(20),RES(20),REAT(20),PITOT
      DATA IFLAG/4H****/
      READ(2,1004) IDAT
 1004 FORMAT(3A4)
      DO 10 I = 1,21
   10 IAST(I) = IFLAG
      READ(2,1) (ITITUL(I),I = 1,20)
    1 FORMAT(20A4)
      WRITE(1,2) (IAST(I),I=1,21),(ITITUL(I),I=1,20),(IAST(I),I=1,21)
    2 FORMAT(1H1,3X,21A4/14X,'*',11X,'OPERACAO ECONOMICA DE SISTEMAS EL
     C'TRICOS - PROGRAMA  OPEC',14X,'*'/14X,'* ',20A4,' *'/14X,21A4///)
      DO 30 I = 1,500
      READ(2,3) IM,NBUS,A0(NBUS),A1(NBUS),A2(NBUS),A3(NBUS),A4(NBUS)
    3 FORMAT(A4,I6,5F14.0)
      IF(IM.EQ.IFLAG) GO TO 21
   30 CONTINUE
   21 M = I - 1
      WRITE(1,14)
   14 FORMAT(/34X,'***** PARAMETROS DO SISTEMA *****'///6X,'BARRA',27X,'
     CPARAMETROS DAS EQUACOES DOS CUSTOS DE PRODUCAO'/9X,'NUM',15X,'A0',
     C15X,'A1',15X,'A2',15X,'A3',15X,'A4'/)
      WRITE(1,4) (I,A0(I),A1(I),A2(I),A3(I),A4(I), I = 1,N8)
    4 FORMAT(1X,I10,F22.9,4F17.9)
      DO 22 I = 1,500
```

```
      IF(IM.EQ.IFLAG) GO TO 23
   22 CONTINUE
   23 NL = I - 1
      WRITE(1,6)
    6 FORMAT(//8X,'LINHAS',9X,'ENTRE BARRAS',21X,'RESISTENCIA',9X,'REATA
     CNCIA'/)
      WRITE(1,7) (I,LB1(I),LB2(I),RES(I),REAT(I), I = 1,NL)
    7 FORMAT(1X,I10,I14,I9,F31.4,F19.4)

C     MONTAGEM DA MATRIZ DE IMPEDANCIA DAS LINHAS

      DO 20 L = 1,NL
      Z(L)=(I),LB2(L)) = SQRT(RES(L)**2 + (XT(L)**2)
      DELTA(LB1(L),LB2(L)) = ATAN(REAT(L)/RES(L))
      Z(LB2(L),LB1(L)) = Z(LB1(L),LB2(L))
   20 DELTA(LB2(L),LB1(L)) = DELTA(LB1(L),LB2(L))
      WRITE(1,12)
   12 FORMAT(//8X,'LINHAS',9X,'ENTRE BARRAS',19X,'MOD.IMPEDANCIA',6X,'AN
     CG.IMPEDANCIA'/)
      WRITE(1, 7) (I,LB1(I),LB2(I),Z(LB1(I),LB2(I)),DELTA(LB1(I),LB2(I))
     C,I = 1,NL)
      DO 24 I = 1,500
      READ(12,8) IN,NBUS,P(NBUS),C(NBUS),LAMB(NBUS),V(NBUS),TETA(NBUS)
    8 FORMAT( 4,I6,5F10.0)
      IF(IN.EQ.IFLAG) GO TO 25
   24 CONTINUE
   25 NV = I - 1
      IF(NV.EQ.NB) GO TO 26
      WRITE(1,9) NV,P(I),C(I),LAMB(I),V(I),TETA(I),I = 1,NV)
    9 FORMAT(///1X,'UMA ERRO NOS DADOS FORNECIDOS'//30(/1X,I10,5F10.4))
      STOP
   26 WRITE(1,10)
   10 FORMAT(///29X,'***** MODULO DA TENSAO E VALORES DE PRESTRACAO ***
     C**'//8X,'BARRA',10X,'MOD.TENSAO',8X,'ARG.TENSAO',6X,'POT.GERACAO',
     C6X,'POT.CONSUMO',6X,'G.INCREMENTAL'/)
      WRITE(1,11) (I,V(I),TETA(I),P(I),C(I),LAMB(I), I = 1,NB)
   11 FORMAT(1X,I10,F22.3,4F17.3)
      DO 30 I = 1,NB
   30 PI(I) = P(I)
      ITER = 0

      READ(12,1009) ITESS,PRESC,IMPP
 1009 FORMAT(I5,F10.6,I2)
      WRITE(1,1010) ITESS,PRESC
 1010 FORMAT(///31X,'NUMERO MAXIMO DE ITERACOES PERMISSIVEL',I7,//31X,'P
     RECISAO DESEJADA NOS RESULTADOS FINAIS',F8.4)
C
C     TRANSFERENCIA PARA A SUBROTINA OPEC1
C
 2000 CALL OPEC1(NB,NF,UFCI)
      IF(IMPP.NE.1) GO TO 2002
      WRITE(1,1000) ITER,(FI(I), I = 1,NF)
 1000 FORMAT(1H1,20X,'***** VALOR DAS FUNCOES COM OS RESULTADOS DA ITERA
     CAO',I3,' *****'//(/1X,7F15.6))
C
C     TRANSFERENCIA PARA A SUBROTINA OPEC2
C
 2002 CALL OPEC2(NB,NF,UFCI)
      IF(IMPP.NE.1) GO TO 2003
      WRITE(1,1001) ((DF(I,J), J = 1,NF),I = 1,NF)
 1001 FORMAT(///35X,'***** MATRIZ JACOBIANA *****'//(/1X,7F15.6))
```

```
C
C     TRANSFERENCIA PARA A SUBROTINA INMAT
C
 2003 CALL INMAT(NF)
C
C     CALCULO DA MATRIZ DOS INCREMENTOS DAS VARIAVEIS E DOS NOVOS
C     VALORES DAS VARIAVEIS
C
      DMAXA = DMAXB
      DMAXB = 0.0
      DO 102 I = 1,NF
      DVAR(I) = 0.0
      DO 113 J = 1,NF
  113 DVAR(I) = DVAR(I) + DF(I,J)*F(J)
      IF(ABS(DVAR(I)).LT.DMAXB) GO TO 102
      DMAXB = ABS(DVAR(I))
  102 CONTINUE
      IF(DMAXA) 109,109,112
  112 IF(DMAXA.GT.DMAXB) GO TO 109
      WRITE(1,1008) ITER
 1008 FORMAT(////20X,'O SISTEMA NAO CONVERGE',20X,'ITERACAO NUM.',I3)
      STOP
C
  109 IF(IMPR.NE.1) GO TO 110
      WRITE(1,1002) (DVAR(I),I = 1,NF),DMAXB
 1002 FORMAT(///25X,'*****  VALOR DA VARIACAO DAS VARIAVEIS *****'//1X,7F
     C15.6,//31X,'VALOR ABSOLUTO DA VARIACAO MAXIMA',F15.6//)
C
  110 DO 103 I = 1,NFCI
  103 PI(I) = PI(I) - DVAR(I)
      DO 105 J = 2,NB
      TETA(J) = TETA(J) - DVAR(I)
  105 I = I + 1
      DO 104 J = 1,NB
      LAMB(J) = LAMB(J) - DVAR(I)
  104 I = I + 1
      ITER = ITER + 1
      IF(IMPR.NE.1) GO TO 111
      WRITE(1,13) ITER
   13 FORMAT(1H0,31X,'*****  VALORES DA ITERACAO NUMERO',I3,' *****'///8X
     C,'BARRA',10X,'MOD.TENSAO',8X,'ANG.TENSAO',6X,'POT.GERACAO',6X,'POT
     C.CONSUMO',6X,'C.INCREMENTAL'/)
      WRITE(1,11) (I,V(I),TETA(I),PI(I),C(I),LAMB(I), I = 1,NB)
C     CALCULO DO CUSTO TOTAL DE PRODUCAO
  111 CUST = 0.0
      DO 106 I = 1,NB
      IF(PI(I)) 107,106,107
  107 CUST = CUST + A0(I) + A1(I)*PI(I) + A2(I)*PI(I)**2 + A3(I)*PI(I)**
     C3 + A4(I)*PI(I)**4
  106 CONTINUE
      IF(ITER.GT.ITEST) GO TO 2001
      IF(IAX3.LT.PRESO) GO TO 2001
      GO TO 2000
 2001 WRITE(1,10 3) IAST,IDAT,ITITUL,IAST
 1003 FORMAT(1H1,10X,2I4,/14X,'*',10X,'VALORES RESULTANTES DA CONDICAO
     C ',10X,3A4,9X,'*',/14X,'*',20A4,'  *'/14X,21A4///)
      WRITE(1,1005)
 1005 FORMAT(//,'BARRA',10X,'MOD.TENSAO',8X,'ANG.TENSAO',6X,'POT.GERACAO
     1',6X,'POT.CONSUMO',6X,'C.INCREMENTAL'/)
      WRITE(1,111)(I,V(I),TETA(I),PI(I),C(I),LAMB(I),I=1,NB)
      PITOT=0.0
```

```
      CITOT=0.0
      DO 108 I=1,N9
      PITOT=PITOT+PI(I)
  108 CITOT=CITOT+C(I)
      WRITE(1,1006) PITOT,CITOT,CUST
 1006 FORMAT(///8X,'TOTAL',13X,'*******',12X,'*****',2F17.3///20X,'CUSTO
     1TOTAL DE PRODUCAO',F15.2)
      WRITE(1,1007)ITER
 1007 FORMAT(///80X,'NUM.DE ITERACOES',I4)
      CALL PLOTXY(0.0,-1.)
      STOP
      END
```

```
      SUBROUTINE OPEC1(NB,NF,NFC1)
      REAL LAMB
      COMMON CF(30,30),F(30),A0(10),A1(10),A2(10),A3(10),A4(10),PI(10),C
     C(10),V(10),TETA(10),LAMB(10),Z(20,20),DELTA(20,20),P(30)
C     MONTAGEM DA MATRIZ DE FUNCOES
C     CALCULO DAS FUNCOES DOS CUSTOS INCREMENTAIS
      NF = 1
      DO 27 I = 1,NB
      IF(PI(I))25,27,26
   25 STOP 1
   26 F(NF) = (LAMB(I) - A1(I) - 2.*A2(I)*PI(I) - 3.*A3(I)*PI(I)**2
      NF = NF + 1
   27 CONTINUE
      NFC1 = NF - 1
C     CALCULO DAS FUNCOES DERIVADAS DO CUSTO EM RELACAO AOS ANGULOS TETAI
      DO 30 I = 2,NB
      S1 = 0.
      S2 = 0.
      DO 29 J = 1,NB
      IF(Z(I,J)) 60,29,60
   60 IF(I.EQ.J) GO TO 29
      S1 = S1 + V(I)*V(J)*COS(TETA(I) - TETA(J) - DELTA(I,J))/Z(I,J)
      S2 = S2 + LAMB(J)*V(I)*V(J)*COS(TETA(J) - TETA(I) - DELTA(I,J))/Z(
     CI,J)
   29 CONTINUE
      F(NF) = LAMB(I)*S1 - S2
      NF = NF + 1
   30 CONTINUE
C     CALCULO DAS FUNCOES DE INJECAO
      DO 32 I = 1,NB
      S1 = 0.
      S2 = 0.
      DO 31 J = 1,NB
      IF(Z(I,J)) 61,31,61
   61 IF(I.EQ.J) GO TO 31
      S1 = S1 + V(I)*V(J)*SIN(TETA(I) - TETA(J) - DELTA(I,J))/Z(I,J)
      S2 = S2 + V(I)**2*SIN(DELTA(I,J))/Z(I,J)
   31 CONTINUE
      F(NF) = S1 + S2 - PI(I) + C(I)
      NF = NF + 1
   32 CONTINUE
      NF = NF - 1
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE DPFC2(NA,NF,NFCI)
      REAL LAMB
      DIMENSION DF1(30,30)
C     CALCULO DAS DERIVADAS DA FUNCAO DOS CUSTOS INCREMENTAIS
      COMMON DF(30,30),F(30),A0(10),A1(10),A2(10),A3(10),A4(10),PI(10),C
     C(10),V(10),TETA(10),LAMB(10),Z(20,20),DELTA(20,20),P(30)
C     MONTAGEM DA MATRIZ JACOBIANO
      I = 1
      DO 35 K = 1,NFCI
      IF(I.GT.NA) I = 1
      DO 35 L = 1,NFCI
      IF(P(I).EQ.0.0) I = I + 1
      IF (I.GT.NA) I = 1
      IF(K.EQ.L) GO TO 33
      DF(K,L) = -2.*A2(I) - 6.*A3(I)*PI(I)
      GO TO 34
   33 DF(K,L) = 0.0
   34 I = I+1
   35 CONTINUE
      NF1 = NFCI + 1
      NF2 = NFCI + NA - 1
      DO 38 K = 1,NFCI
      DO 38 L = NF1,NF2
   38 DF(K,L) = 0.0
      DO 37 K = 1,NFCI
      DO 37 L = 1,NA
      IF(K.EQ.L) GO TO 36
      DF1(K,L) = 0.0
      GO TO 37
   36 DF1(K,L) = 1.0
   37 CONTINUE
      I = 0
      DO 77 K = 1,NA
      IF(P(K).EQ.0.0) GO TO 77
      I = I + 1
      DO 78 L = 1,NA
   78 DF(I,L + NFCI + NA - 1) = DF1(K,L)
   77 CONTINUE
C     CALCULO DAS DERIVADAS AA FUNCAO DERIVADA DO CUSTO EM RELACAO AO
C     ANGULO TETAI
      NFD1 = NFCI + 1
      NFD2 = NFCI + NA - 1
      DO 39 K = NFD1,NFD2
      DO 39 L = 1,NFCI
   39 DF(K,L) = 0.0
      DO 66 K = 2,NA
      DO 66 L = 2,NA
      IF(K.EQ.L) GO TO 43
      IF(Z(K,L)) 66,65,66
   65 DF1(K,L) = 0.0
      GO TO 45
   66 DF1(K,L) = (LAMB(K)*V(K)*V(L)*SIN(TETA(K) - TETA(L) - DELTA(K,L))
     C + LAMB(L)*V(K)*V(L)*SIN(TETA(L) - TETA(K) - DELTA(K,L)))/Z(K,L)
      GO TO 45
   43 S1 = 0.0
      S2 = 0.0
      DO 44 I = 1,NA
      IF(I.EQ.K) GO TO 44
      IF(Z(K,I).EQ.0.0) GO TO 44
      S1 = S1 + (V(K)*V(I)*SIN(TETA(K) - TETA(I) - DELTA(K,I)))/ Z(K,I)
      S2 = S2 + LAMB(I)*V(K)*V(I)*SIN(TETA(I) - TETA(K) - DELTA(K,I))/Z(
```

```
      CK,I)
   44 CONTINUE
      DF1(K,L) = -LAND(K)*S1 - S2
   45 DF1(NFCI + K - 1,L + NFCI - 1) = DF1(K,L)
   46 CONTINUE
      DO 42 K = 2,NB
      DO 42 L = 1,NB
      IF(K.EQ.L) GO TO 63
      IF(Z(K,L)) 62,40,62
   62 DF1(K,L) = -V(K)*V(L)*COS(TETA(L) - TETA(K) - DELTA(K,L))/Z(K,L)
      GO TO 60
   40 DF1(K,L) = 0.0
      GO TO 60
   63 DF1(K,L) = 0.0
      DO 41 I = 1,NB
      IF(I.EQ.K) GO TO 41
      IF(Z(K,I)) 64,41,64
   64 DF1(K,L) = DF1(K,L) + V(K)*V(I)*COS(TETA(K) - TETA(I) - DELTA(K,I)
     C)/Z(K,I)
   41 CONTINUE
   60 DF1(K + NFCI - 1,L + NFCI + NB - 1) = DF1(K,L)
   42 CONTINUE
      DO 50 I = 1,NB
      DO 50 J = 1,NB
      IF(I.EQ.J) GO TO 49
      DF1(I,J) = 0.0
      GO TO 50
   49 DF1(I,J) = -1.0
   50 CONTINUE
      DO 79 L = 1,NB
      IF(D(L)) 46,79,46
   46 DO 53 I = 1,NB
      DF1(I + NFCI + NB - 1,L) = DF1(I,L)
   53 CONTINUE
   79 CONTINUE
      DO 58 I = 1,NB
      DO 58 J = 2,NB
      IF(I.NE.J) GO TO 70
      DF1(I,J) = 0.0
      GO TO 58
   70 IF(I.EQ.1) GO TO 66
      IF(Z(I,IJ)) 67,66,67
   67 DF1(I,J) = DF1(I,J) + V(I)*V(J)*COS(TETA(I) - TETA(IJ) - DELTA(I,I
     C))/Z(I,IJ)
   66 CONTINUE
      GO TO 73
   70 IF(Z(I,J)) 71,72,71
   71 DF1(I,J) = -V(I)*V(J)*COS(TETA(I) - TETA(J) - DELTA(I,J))/Z(I,J)
      GO TO 73
   72 DF1(I,J) = 0.0
   73 K = I - 1 + NFCI + NB
      L = NFCI + J - 1
      DF(K,L) = DF1(I,J)
   58 CONTINUE
      NFD1 = NFCI + NB
      DO 51 K = NFD1,NF
      DO 51 L = NFD1,NF
   51 DF(K,L) = 0.0
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE INMAT(N)
      DIMENSION IAUX(30)
      COMMON A(30,30)
      DO 208 K = 1,N
  200 IAUX(K) = 0
      J = 0
      DO 200 K = 1,N
      IF(A(K,K)) 202,201,202
  201 IAUX(K) = K
      GO TO 200
  202 CALL INMP(K,N)
      J = J + 1
      IF(J.EQ.N) GO TO 207
  200 CONTINUE
  205 DO 203 K = 1,N
      IF(IAUX(K) - K) 203,204,203
  204 IF(A(K,K)) 206,203,206
  206 CALL INMP(K,N)
      J = J + 1
      IF(J - N) 205,207,207
  203 CONTINUE
  207 RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE INMP(K,N)
      COMMON A(30,30)
      A(K,K) = 1./A(K,K)
      DO 60 I = 1,N
      IF(I.EQ.K) GO TO 50
      A(I,K) = A(I,K)*A(K,K)
   50 CONTINUE
      DO 65 I = 1,N
      IF(I.EQ.K) GO TO 65
      DO 60 J = 1,N
      IF(J.EQ.K) GO TO 60
      A(I,J) = A(I,J) - A(I,K)*A(K,J)
   60 CONTINUE
   65 CONTINUE
      DO 70 J = 1,N
      IF(J.EQ.K) GO TO 70
      A(K,J) = -A(K,J)*A(K,K)
   70 CONTINUE
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE FLUXO1(NP,NL)
      COMPLEX IC(10,10),VC(6),OAUX
      DIMENSION PERO(10,10),APAR(10,10),QUED(10,10),CORR(10,10)
      COMMON /E1/(30,30),E(30),A0(10),A1(10),A2(10),A3(10),A4(10),PI(10),
     C(10),V(10),TETA(10),LA1(10),Z(20,20),DELTA(20,20),P(30)
      COMMON LA1(20),LA2(20),RES(20),REAT(20),PITOT
      DO 20 I = 1,NP
   20 VC(I) = CMPLX(V(I)*COS(TETA(I)),V(I)*SIN(TETA(I)))
      PERTOT = 0.0
      WRITE(1,1011)
 1011 FORMAT(/////8X,'LINHA',10X,'ENTRE BARRAS',8X,'CORRENTE(KA)',2X,'P.
     CT.TRANSM(MVA)',5X,'PERDA(MW)',9X,'QUEDA(%)'/)
      DO 21 K = 1,NL
      I = LA1(K)
      J = LA2(K)
      IC(I,J) = (VC(I) - VC(J))/CMPLX(RES(K),REAT(K))/1.732
      CORR(I,J) = SQRT(REAL(IC(I,J))**2 + AIMAG(IC(I,J))**2)
      PERO(I,J) = RES(K)*CORR(I,J)**2
      PERTOT = PERTOT + PERO(I,J)
      APAR(I,J) = 1.732*V(I)*CORR(I,J)
      OAUX = CMPLX(RES(K),REAT(K))*IC(I,J)
      QUED(I,J) = SQRT(REAL(OAUX)**2 + AIMAG(OAUX)**2)/V(J)*100.0
      PERC = PERTOT*100.0/PITOT
   21 WRITE(1,1012) K,I,J,CORR(I,J),APAR(I,J),PERO(I,J),QUED(I,J)
 1012 FORMAT(1X,I10,I14,I10,4F17.3)
      WRITE(1,1013) PERTOT,PERC
 1013 FORMAT(///49X,'PERDA TOTAL DO SISTEMA',F13.3,' MW   =',F7.2,' %')
      RETURN
      END
```

```
UP          FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:  5102 ZELLEN OHNE COMMON


UP OPEC1  FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   576 ZELLEN OHNE COMMON


UP OPEC2  FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:  3390 ZELLEN OHNE COMMON


UP I*MAT  FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   202 ZELLEN OHNE COMMON


UP I*MP   FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   189 ZELLEN OHNE COMMON


UP FLUXO1 FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:  1859 ZELLEN OHNE COMMON
```

```
**********************************************************************
*        OPERACAO ECONOMICA DE SISTEMAS ELETRICOS - PROGRAMA OPEC    *
*     SISTEMA COM TRES BARRAS DE GERACAO E UMA BARRA DE CONSUMO PURO *
**********************************************************************
```

***** PARAMETROS DO SISTEMA *****

PARAMETROS DAS EQUACOES DOS CUSTOS DE PRODUCAO

BARRA NUM	A0	A1	A2	A3	A4
1	0.000000000	3.000000000	0.000000000	0.000001000	0.000000000
2	0.000000000	2.000000000	0.000000000	0.000000666	0.000000000
3	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000

LINHAS	ENTRE BARRAS		RESISTENCIA	REATANCIA
1	1	2	48.6142	12.4132
2	1	3	48.6142	12.4132
3	2	3	48.6142	12.4132

LINHAS	ENTRE BARRAS		MOD.IMPEDANCIA	ANG.IMPEDANCIA
1	1	2	50.1740	0.2500
2	1	3	50.1740	0.2500
3	2	3	50.1740	0.2500

***** MODULO DA TENSAO E VALORES DE PREITERACAO *****

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	400.000	400.000	3.480
2	224.000	0.000	400.000	400.000	2.320
3	224.000	0.000	0.000	800.000	2.900

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES PERMISSIVEL 5

PRECISAO DESEJADA NOS RESULTADOS FINAIS 0.0001

```
**********************************************************************
*     VALORES RESULTANTES DA CONDICAO ECONOMICA          25-11-1972  *
*     SISTEMA COM DUAS BARRAS DE GERACAO E UMA BARRA DE CONSUMO PURO  *
**********************************************************************
```

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	679.760	400.000	4.386
2	224.000	-0.119	1024.307	400.000	4.105
3	224.000	-0.396	0.000	800.000	5.462
TOTAL	*******	*****	1706.047	1600.000	

CUSTO TOTAL DE PRODUCAO 5125.86

NUM.DE ITERACOES 5

LINHA	ENTRE BARRAS		CORRENTE(KA)	POT.TRANSM(MVA)	PERDA(MW)	QUEDA(%)
1	1	2	0.307	118.966	4.571	6.865
2	1	3	1.014	393.600	50.030	22.723
3	2	3	1.313	509.543	83.846	29.416

PERDA TOTAL DO SISTEMA 138.447 MW -- 8.12 %

STOP :

```
*****************************************************************
*        OPERACAO ECONOMICA DE SISTEMAS ELETRICOS - PROGRAMA  EPEC      *
*        SISTEMA COM DUAS BARRAS DE GERACAO E UMA BARRA DE CONSUMO FIXO *
*****************************************************************
```

**** PARAMETROS DO SISTEMA ****

BARRA NUM	PARAMETROS DAS EQUACOES DOS CUSTOS DE PRODUCAO A0	A1	A2	A3	A4
1	0.000000000	3.000000000	0.000000000	0.000001000	0.000000000
2	0.000000000	2.000000000	0.000000000	0.000000666	0.000000000
3	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000

LINHAS	ENTRE BARRAS		RESISTENCIA	REATANCIA
1	1	2	48.6142	12.4132
2	1	3	48.6142	12.4132
3	2	3	48.6142	12.4132

LINHAS	ENTRE BARRAS		MOD.IMPEDANCIA	ANG.IMPEDANCIA
1	1	2	50.1740	0.2500
2	1	3	50.1740	0.2500
3	2	3	50.1740	0.2500

***** MODULO DA TENSAO E VALORES DE PREITERACAO *****

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	400.000	400.000	3.480
2	224.000	0.000	400.000	400.000	2.320
3	224.000	0.000	0.000	800.000	2.900

NUMERO MAXIMO DE ITERACOES PERMISSIVEL 5

***** VALOR DAS FUNCOES COM OS RESULTADOS DA ITERACAO 0 *****

-0.000000	0.000320	-1685.975946	0.000000	0.000000	0.000000	800.000000

***** MATRIZ JACOBIANO *****

-0.002400	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-0.001598	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
0.000000	0.000000	2726.492641	-1291.496514	-968.951693	1937.903386	-968.951693
0.000000	0.000000	-1291.496514	2869.992253	-968.951693	-968.951693	1937.903386
0.000000	0.000000	-968.951693	-968.951693	0.000000	0.000000	0.000000
-1.000000	0.000000	1937.903386	-968.951693	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-1.000000	-968.951693	1937.903386	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000					

***** VALOR DA VARIACAO DAS VARIAVEIS *****

-96.709109	-703.290891	-0.208673	0.308481	-0.232102	-1.123820	-1.273862

VALOR ABSOLUTO DA VARIACAO MAXIMA 703.290891

***** VALORES DA ITERACAO NUMERO 1 *****

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	496.709	400.000	3.712
2	224.000	0.209	1103.291	400.000	3.444
3	224.000	-0.308	0.000	800.000	4.174

pag. 11

***** VALOR DAS FUNCOES COM OS RESULTADOS DA ITERACAO 1 *****

-0.028858	-0.950247	429.392337	-482.905138	13.792209	14.217795	70.790697

***** MATRIZ JACOBIANO ******

-0.002980	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-0.004409	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
0.000000	0.000000	3773.910273	-1987.996434	-896.677407	1963.751327	-719.918765
0.000000	0.000000	-1987.996434	3982.841544	-998.330683	-964.564854	1568.014487
-1.000000	0.000000	-896.677407	-998.330683	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-1.000000	1963.751327	-964.564854	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	-719.918765	1568.014487	0.000000	0.000000	0.000000

***** VALOR DA VARIACAO DAS VARIAVEIS *****

-193.166358	92.976503	0.099114	0.090653	-0.603743	-0.578337	-1.152783

VALOR ABSOLUTO DA VARIACAO MAXIMA 193.166358

***** VALORES DA ITERACAO NUMERO 2 *****

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	689.875	400.000	4.316
2	224.000	0.110	1010.314	400.000	4.022
3	224.000	-0.399	0.000	800.000	5.327

***** VALOR DAS FUNCOES COM OS RESULTADOS DA ITERACAO 2 *****

-0.111940	-0.017272	-34.737576	-47.237805	1.663681	0.355479	2.305946

***** MATRIZ JACOBIANO *****

-0.004139	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-0.004037	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
0.000000	0.000000	4717.444620	-2635.767244	-936.090038	1956.958455	-725.765925
0.000000	0.000000	-2635.767244	5214.560152	-988.939962	-966.764024	1522.406524
-1.000000	0.000000	-936.090038	-988.939962	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-1.000000	1956.958455	-966.764024	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	-725.765925	1522.406524	0.000000	0.000000	0.000000

***** VALOR DA VARIACAO DAS VARIAVEIS *****

10.225547	-16.049059	-0.009511	-0.003019	-0.069614	-0.082065	-0.134487

VALOR ABSOLUTO DA VARIACAO MAXIMA 16.049059

***** VALORES DA ITERACAO NUMERO 3 *****

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	679.650	400.000	4.385
2	224.000	0.119	1026.343	400.000	4.104
3	224.000	-0.396	0.000	800.000	5.461

***** VALOR DAS FUNCOES COM OS RESULTADOS DA ITERACAO 3 *****

-0.000314	-0.000515	0.807939	-0.249968	0.0.5377	0.000755	0.017281

***** MATRIZ JACOBIANO ******

-0.004078	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-0.004101	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
0.000000	0.000000	4825.171119	-2707.214442	-932.701057	1956.563960	-721.284460
0.000000	0.000000	-2707.214442	5356.910199	-989.384107	-965.092939	1519.746742
-1.000000	0.000000	-932.701057	-989.384107	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-1.000000	1956.563960	-965.092939	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	-721.284460	1519.746742	0.000000	0.000000	0.000000

***** VALOR DA VARIACAO DAS VARIAVEIS *****

-0.090491	0.056518	0.000046	0.000033	-0.000683	-0.000283	-0.000824

VALOR ABSOLUTO DA VARIACAO MAXIMA 0.090491

***** VALORES DA ITERACAO NUMERO 4 *****

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	679.740	400.000	4.386
2	224.000	0.119	1026.307	400.000	4.105
3	224.000	-0.396	0.000	800.000	5.462

***** VALOR DAS FUNCOES COM OS RESULTADOS DA ITERACAO 4 *****

-0.000000	-0.000000	-0.000019	-0.000007	0.000000	0.000000	0.000000

***** MATRIZ JACOBIANO *****

-0.004078	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-0.004101	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
0.000000	0.000000	4825.950060	-2707.711143	-932.717487	1956.561304	-721.293158
0.000000	0.000000	-2707.711143	5357.864155	-939.379304	-965.086230	1519.735578
-1.000000	0.000000	-932.717487	-939.379304	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-1.000000	1956.561304	-965.086230	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	-721.293158	1519.735578	0.000000	0.000000	0.000000

***** VALOR DA VARIACAO DAS VARIAVEIS *****

0.000003	-0.000004	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000

VALOR ABSOLUTO DA VARIACAO MAXIMA 0.000004

***** VALORES DA ITERACAO NUMERO 5 *****

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	679.740	400.000	4.356
2	224.000	0.119	1026.307	400.000	4.105
3	224.000	-0.396	0.000	800.000	5.462

VALORES RESULTANTES DA CONDICAO ECONOMICA 30-11-1972

SISTEMA COM DUAS BARRAS DE GERACAO E UMA BARRA DE CONSUMO PURO

BARRA	MOD.TENSAO	ANG.TENSAO	POT.GERACAO	POT.CONSUMO	C.INCREMENTAL
1	224.000	0.000	679.740	400.000	4.386
2	224.000	0.119	1026.307	400.000	4.105
3	224.000	-0.396	0.000	800.000	5.462
TOTAL	*******	*****	1706.047	1600.000	

CUSTO TOTAL DE PRODUCAO 5125.86

NUM.DE ITERACOES 5

STOP !

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

Pelos resultados obtidos dos programas confeccionados, devidamente conferidos, a meta que tinha sido pré-definida para este trabalho de mestrado foi atingida, apesar de que, reconhecidamente, um trabalho paralelo à linha traçada, mais ampla, tivesse a necessidade de ser desenvolvido para se conseguir uma completa solução do problema.

Outros programas seriam necessários para a aplicação do método dos coeficientes B, de maneira eficiente, em sistema reais, pois com apenas os dois programas desenvolvidos, apresenta-se uma série de inconvenientes, principalmente devido ao fato de que, um exaustivo trabalho manual é necessário na preparação dos dados de entrada dos programas.

De acordo com os dados de entrada necessários ao programa COEFB, tornam-se necessários os cálculos do load-flow do sistema em estudo, não só no caso base, como também em vários outros pontos de funcionamento. Note-se que os valores das relações características entre potências ativa e reativa de geração, são valores obtidos de curvas da potência reativa em relação à ativa, curvas estas, obtidas dos estudos de load-flow do sistema.

Cálculos que são extremamente trabalhosos para um sistema complexo e que poderiam ser feitos pelo computador, são os cálculos necessários para a obtenção das resistências próprias e mútuas, em circuito aberto, entre as gerações e as cargas.

A confecção do programa capaz disso, teria também como re

sultado, os valores das reatâncias próprias e mútuas, em circuito aberto, e com isto a determinação dos valores característicos das relações entre potência reativa e ativa de cada geração estaria consequentemente solucionado, pois estas relações seriam calculadas por:-

$$S_m = - \frac{R_{mm}}{X_{mm}} \qquad (6.1)$$

onde:-

R_{mm} - resistência própria da geração m, para um ponto de carga hipotético.

X_{mm} - reatância própria da geração m, para um ponto de carga hipotético.

Esta parte do trabalho poderá ser desenvolvida segundo o roteiro proposto por L. K. Kirchmayer, H. H. Happ, G. W. stagg e J. W. Mohenstein, publicado no IEEE, dez. 1960, "Cálculo direto da fórmula de perdas de transmissão".

Confeccionando-se os programas de maneira compatíveis entre si, com o acoplamento dos mesmos, obter-se-ia um trabalho realmente profissional.

A aplicação deste método em sistemas reais poderia ser realizada imediatamente, porém no momento, um problema que se enfrenta é a dificuldade na obtenção dos dados necessários para tal empreendimento, principalmente com relação aos custos de produção das potências de geração (equação 2.63). No caso das Usinas Hidráulicas os custos de produção devem ser levantados levando-se em conta dados estatísticos das previsões pluviométricas, o tipo de aproveitamento de água, além das despesas de operação, manutenção, amorti

zação do capital, depreciação, etc.

Lembre-se que, a otimização da operação do reservatório, a pesar de fazer parte do estudo econômico do sistema, não foi abordado neste trabalho, uma vez que somente este assunto em si, consistiria um outro trabalho de mestrado.

SOLUÇÃO GENERALIZADA

Fazendo-se as considerações simplificativas de resolução do problema generalizado, tais como, supor fixo o módulo da tensão nos nós do sistema, não considerar as potências reativas e os limites físicos do sistema, conseguiu-se através de uma solução geral de cálculo os mesmos resultados conseguidos pelos franceses. A continuação do assunto com meta à resolução completamente generalizada do problema, utilizando-se o mesmo método de cálculo é o caminho que poderá ser percorrido futuramente.

Por ordem crescente de dificuldade:-

- A próxima etapa, seria a inclusão dos limites físicos no que diz respeito à capacidade de transporte das linhas. Deve-se acrescentar no programa já pronto (OPEC):-

a) Na equação f_2 (5.12) as parcelas $\Sigma(t_{i\alpha} - t_{\alpha i})$.

b) Declaração de leitura dos valores $t_{i\alpha}$ de preiteração.

c) Teste a cada iteração da condição.

$$(\theta_i - \theta_\alpha - T_{i\alpha}) \leq 0$$

d) Se a condição b for verificada, o programa deverá assumir $t_{i\alpha} = 0$, recaindo-se exatamente no caso em que o problema já se encontra resolvido. (Nº equações = nº in

cógnitas = m + 2 n - 1).

e) Se a condição b não for verificada, o programa deverá adicionar a equação

$$t_{i\alpha}(\theta_i - \theta_\alpha - T_{i\alpha}) = 0$$

e a incógnita $t_{i\alpha}$, dos dois nós, onde surgir a restrição.

f) Neste segundo caso, o programa montaria as matrizes das funções e do Jacobiano considerando uma equação e uma incógnita a mais para cada linha onde atingisse o limite pré-fixado.

Essa primeira tentativa de inclusão dos limites físicos, antes de se tentar outras generalizações, é importante para testar se a rápida convergência do Método de Newton conseguida vai continuar acontecendo, pois existe a possibilidade do sistema não convergir, porque a inclusão de uma equação a mais, pode acarretar alterações muito bruscas, principalmente com respeito aos valores resultantes antes de acontecer a restrição, e que seriam os valores iniciais para o sistema, após o acontecimento da restrição.

- A segunda etapa, seria a consideração da variação da magnitude das tensões dos nós do sistema e das limitações quanto à tensão máxima e mínima permissível.

a) Acrescentar a equação 4.37 modificada (Vide 6.1 abaixo) no sistema de equações para cada nó do sistema, e como variável a magnitude da tensão do nó.

$$\lambda_i \sum_{\alpha} \frac{U_\alpha}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_\alpha - \delta_{i\alpha}) + 2 \frac{U_i}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}\delta_{i\alpha} +$$

$$\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \frac{U_{\alpha}}{Z_{i\alpha}} \operatorname{sen}(\theta_{\alpha} - \theta_i - \delta_{i\alpha}) + (v_i - v_i') = 0 \qquad (6.1)$$

b) Ao invés dos valores das magnitudes das tensões fornecidos ao programa, e considerados constantes, seriam usados valores iniciais de preiteração.

c) A inclusão das limitações de tensão máxima e mínima seriam feitas de modo análogo à limitação de transporte, devendo ser testadas as condições

$$U_i - U_{iM} \leq 0$$

$$U_{im} - U_i \leq 0$$

para cada iteração realizada.

d) Se ambas forem verificadas então o programa deverá assumir que $v_i = v_i' = 0$.

e) Caso uma das condições não for verificada o programa deverá acrescentar uma das equações

$$v_i (U_i - U_{iM}) = 0 \quad \text{ou}$$

$$v_i' (U_{im} - U_i) = 0$$

fixando-se praticamente o valor da magnitude da tensão e incluindo se as variáveis v_i ou v_i', dependendo do caso.

- A etapa final seria a consideração da potência reativa, de maneira análoga às etapas anteriores, incluindo porém as limitações quanto à capacidade de geração da potência ativa, utilizando-se dessa forma todas as equações desenvolvidas no item 4.3.e, cap. 4.

Neste ponto do problema ou talvez já na etapa anterior, o problema da capacidade de memória do computador torna-se problema muito sério, em confronto com a eficiência do programa, e por isso, a tentativa de se compactar as matrizes, principalmente a Matriz Jacobiano, se torna necessária, talvez, através da manipulação de matrizes unidimensionais, ao invés de de duas dimensões, eliminando os espaços nas quais os elementos têm o valor nulo, pois deve-se lembrar que a matriz Jacobiano resultante é uma matriz muito esparsa.

Os valores iniciais de preiteração das chamadas variáveis duais $t_{i\alpha}$, v_i, v_i', e_i, e_i', M_i e M_i', poderiam ser estimadas da seguinte maneira:-

De acordo com o item 4.3.f, cap. 4, tem-se que:

$$t_{i\alpha} = - \frac{\Delta F}{\Delta T_{i\alpha}} \qquad (4.62)$$

isto é, $t_{i\alpha}$ se torna igual à variação que sofrerá o custo total de produção devido a uma variação no limite da capacidade de geração, tendo permanecido inalterado todo o resto do sistema. Em outras palavras, seria o valor do investimento, por unidade, para a alteração do sistema a fim de aumentar a capacidade, talvez com a construção de uma nova linha ou outras providências, e isto poderá ser levantado através de um pré-orçamento de construção. Assim como o aumento da capacidade de limite de transporte, outros custos para aumento ou diminuição dos limites físicos podem ser estimados; por exemplo, no caso do limite mínimo de geração, seria o custo de uma Usina fora de funcionamento, custo este possível de ser levantado.

Ressaltando-se que a etapa imediatamente posterior ao já

executado é relativamente muito simples, conclui-se que, com este passo inicial, uma perspectiva de trabalho muito grande encontra-se em aberto. Conveniente seria, um intercâmbio intenso com as Companhias de Eletricidade e a constituição de uma equipe de Engenheiros, Matemáticos e Programadores, para o desenvolvimento das duas frentes de trabalho, o desenvolvimento do software e a aplicação prática dos mesmos.



SÍMBOLOS UTILIZADOS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
A_{mn}	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
A_{pn}	- Coeficiente da equação dos custos de produção.
A_m	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
B_{mn}	- Coeficiente de perdas do sistema elétrico.
C_i	- Consumo de potência ativa no nó i.
C_t	- Consumo total de potência ativa do sistema.
$\dot{C}$	- Matriz de transformação (elementos complexos).
$\dot{C}_1^2$	- Matriz de transformação da forma 1 para a forma 2
$\dot{C}_2^3$	- Matriz de transformação da forma 2 para a forma 3
D_m	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
D_i	- Consumo de potência reativa no nó i.
E_m	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
F	- Custo total de produção por hora do sistema.
F_n	- Custo total de produção por hora da instalação de geração n.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
f	- Funções do despacho econômico para aplicação do Método de Newton-Raphson.
G_n	- Geração n.
H_{mn}	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
I_i	- Fluxo total da potência ativa do nó i (injeção de potência ativa).
$\dot{I}_{G_n}$	- Corrente complexa de geração da instalação n.
I'_{G_n}	- Corrente ativa de geração da instalação n.
I''_{G_n}	- Corrente reativa de geração da instalação n.
I_{Lk}	- Corrente equivalente de carga na barra k.
I_L	- Corrente equivalente total de carga do sistema.
i	- Nó genérico do sistema elétrico (índice).
J	- Matriz Jacobiano.
K	- Número total de barras do sistema.
K_{mn}	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
m	- Nó de produção (índice).
M	- Número total de barras de geração do sistema.
n	- Nó de produção (índice).

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
P_n	- Potência ativa de geração da instalação n.
P_m	- Potência ativa de geração da instalação m.
P_t	- Potência ativa total de geração do sistema.
P_L	- Potência ativa total de perda do sistema.
P_R	- Potência ativa total de carga do sistema.
Q_n	- Potência reativa de geração da instalação n.
Q_m	- Potência reativa de geração da instalação m.
$R_{i\alpha}$	- Resistência do ramo entre os nós i e α.
$R_{G_m-G_n}$	- Resistência mútua em circuito aberto entre os nós n e m de geração.
$R_{G_n-L_k}$	- Resistência mútua em circuito aberto entre o nó de geração n e o nó de consumo k.
$R_{L_s-L_k}$	- Resistência mútua em circuito aberto entre os nós s e k de consumo.
R_{mn}	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
s_m	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
S_{i_M}	- Potência aparente máxima permissível.
T_m	- Potência aparente máxima permissível.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$T_{i\alpha}$	- Diferença máxima permissível entre os ângulos das tensões dos nós i e α.
$t_{i\alpha}$	- Variável dual associada à capacidade de transporte de energia.
$\dot{U}_i$	- Tensão complexa no nó i.
U_i	- Módulo da tensão no nó i.
$\dot{U}_{G_n}$	- Tensão complexa no nó de geração n.
$\dot{U}_{L_k}$	- Tensão complexa no nó de consumo k.
$\dot{U}_R$	- Tensão complexa no nó de referência R.
U_M	- Módulo da tensão mínima permissível.
U_n	- Módulo da tensão máxima permissível.
X_i	- Variável genérica no Método de Newton-Raphson.
$\bar{X}$	- Vetor variável genérica no Método de Newton - Raphson de componentes X_i.
$X_{i\alpha}$	- Reatância do ramo entre os nós i e α.
$Z_{G_m-G_n}$	- Impedância mútua em circuito aberto entre os nós m e n de geração.
$Z_{G_n-L_k}$	- Impedância mútua em circuito aberto entre o nó de geração n e o nó de consumo k.
$Z_{L_s-L_k}$	- Impedância mútua em circuito aberto entre os nós k e s de consumo.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$\dot{w}$	- Variável auxiliar simplificativa utilizada no desenvolvimento da fórmula das perdas de transmissão.
Y_{ii}	- Admitância total entre o nó i e a terra.
α	- Nós vizinhos do nó i (índice).
$\delta_{i\alpha}$	- $\text{arctg} \frac{R_{i\alpha}}{X_{i\alpha}}$
θ_i	- Ângulo da tensão no nó i.
θ_n	- Ângulo da tensão no nó de geração n.
$\bar{\theta}$	- Vetor ângulo da tensão com as componentes θ_i.
e_i	- Variável dual associada à limitação máxima de produção de reativo.
e_i'	- Variável dual associada à limitação mínima de produção de reativo.
M_i	- Variável dual associada à limitação máxima de produção da potência aparente.
M_i'	- Variável dual associada à limitação mínima de produção da potência ativa.
v_i	- Variável dual associada à limitação máxima do módulo da tensão.
v_i'	- Variável dual associada à limitação mínima do módulo da tensão.
λ_i	- Custo incremental de geração de potência ativa.
μ_i	- Custo incremental de geração de potência reativa.

REFERÊNCIAS

1 - Leon K. KIRCHMAYER - "ECONOMIC OPERATION OF POWER SYSTEMS" - John Wiley & Sons, INC.

2 - Prof. Alfredo Bandini - "Operação Econômica", apostila do curso DEL 821 da EFEI.

3 - Notas de Aula do curso DEL 821.

4 - Bull. de la Societé Française des Electriciens.

5 - Mr. Colin David Sparrow, apostila do curso DEL 822.

6 - IEEE Transactions, Power.

DATA ...../...../19.....
PROC. .....
PED. .....
LIV. .....
FS .....

I V NTÁRIO
BIM - EFEI

DATA	Rubrica

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200011
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA