

TESE

382

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



"OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS
INDUSTRIAIS COM AUTO-GERAÇÃO"

ORIENTADOR: JOÃO ROBERTO COGO

CO-ORIENTADOR: HECTOR ARANGO

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS

APRESENTAÇÃO GERAL DO TRABALHO DESENVOLVIDO

1. Introdução
2. Descrição Geral do Trabalho

PARTE I - OTIMIZAÇÃO DA DEMANDA MÉDIA NECESSÁRIA EM UM SISTEMA INDUSTRIAL COM AUTO-GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

1. Introdução
2. Modelo Básico
3. Determinação dos Valores das Potências Elétrica e de Vapor Ótimos requeridos pelo Sistema, pelo Método de Lagrange - Desprezando-se as Perdas nas Transmissões de Energia Elétrica e na Transmissão de Vapor
4. Determinação dos Valores das Potências Elétrica e de Vapor Ótimos requeridos pelo Sistema, pelo Método de Lagrange - Considerando-se, agora, as Perdas nas Transmissões de Energia Elétrica e de Distribuição de Vapor
5. Metodologia utilizada para o Cálculo dos Valores de Potências Elétricas requeridas pelas Cargas, oriundas da Concessionária e da Auto-Geração, levando-se em Conta o Vapor Requerido

CLASS. 621.311:67(0432)
CUT. G 934 0
TOME 382

PARTE II - DETERMINAÇÃO DOS VALORES ÓTIMOS DE ENERGIA COM-
PRADA E AUTO-GERADA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

1. Introdução
2. Considerações Gerais
3. Método Utilizado
4. Análise do Programa

PARTE III - DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA DIGITAL DESENVOLVIDO

1. Introdução
2. Estrutura Geral
3. Leitura e Impressão dos Dados
4. Cálculo dos Coeficientes das Funções de Custo
5. Cálculo dos Valores Ótimos Médios para o Período Global de Operação
6. Cálculo dos Valores Ótimos de Auto-Geração e Compra de Energia Elétrica por Subperíodo de Operação
7. Impressão dos Resultados

PARTE IV - RESULTADOS E CONCLUSÕES

PARTE V - APÊNDICES

Apêndice A1

Apêndice A2

Apêndice A3

Apêndice A4

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LISTA DE SÍMBOLOS

P_A	- potência auto-gerada
H	- entalpia do vapor
H_S	- entalpia do vapor na extração
H_B	- entalpia do vapor na contrapressão
C	- consumo de combustível
P_D	- demanda de energia elétrica
H_d, HD	- demanda de vapor
λ	- multiplicador de Lagrange
ξ	- função lagrangeano
P_L	- perdas no sistema elétrico
H_L	- perdas no sistema de vapor
P_C	- valor médio da parcela de potência suprida pela concessionária
E, V	- elementos de penalização
\underline{J}	- matriz Jacobiana
PC_{ot}	- potência média ótima no período considerado
PAGMNT	- capacidade mínima de auto-geração
PAGMXT	- capacidade máxima de auto-geração
P_M	- preço médio de KWh
FC	- fator de carga
TC	- tarifa de consumo (normal)
TD	- tarifa de demanda (normal)
TCS	- tarifa de consumo para ESNG
TD\$	- tarifa de demanda para ESNG
TCG	- tarifa de consumo para EGTD
TDG	- tarifa de demanda para EGTD
EC	- Empréstimo Compulsório à Eletrobrás
TI	- imposto único

- ∇f - gradiente da função f
- (-) - um traço sob uma letra indica que a variável é um vetor
- (=) - dois traços sob uma letra indica que a variável é uma matriz
- (') - indica transposta de matriz

Outros símbolos são apresentados a medida que aparecem no texto.

APRESENTAÇÃO GERAL DO TRABALHO DESENVOLVIDO

1 - INTRODUÇÃO

A auto-geração industrial de energia elétrica apareceu, no decorrer do desenvolvimento da indústria em nosso País, por dois motivos básicos. O primeiro deles foi decorrente da implantação das primeiras indústrias usando eletricidade, onde a auto-geração era indispensável, tendo em vista a não existência de concessionária na região da fábrica ou, pelo fato de as existentes serem deficientes, tanto sob o aspecto de capacidade limitada, quanto sob o aspecto da qualidade e confiabilidade do suprimento.

O segundo motivo foi o aparecimento de processos industriais com consumo de calor em quantidades suficientemente grandes, de tal forma que justificavam a instalação de turbinas de contra-pressão, permitindo desta forma a auto-geração, evitando que se perdesse em um condensador a maior parte daquela energia. Desta forma, a própria necessidade de calor do processo passou a desempenhar o papel de condensador. O custo desta energia assim gerada era, até recentemente, tão inferior ao da energia comprada da concessionária que um grande número de indústrias passou a implantar usinas deste tipo.

A partir de 1973, como consequência das sucessivas elevações nos preços do petróleo, surgiram mudanças significati

vas neste quadro, muito embora o custo unitário da eletricidade produzida em turbinas de contra-pressão [17], ainda fosse menor do que aquela adquirida das concessionárias. Embora tal inversão ocorresse, ainda assim, a auto-geração se justificaria, pois passaria a partir desse momento a atuar como fonte de emergência.

Desta forma, tendo em vista a quantidade existente de instalações industriais com auto-geração e, considerando-se que a auto-geração é função das necessidades do processo, muito mais que do custo do combustível, é razoável procurar-se um ponto de operação, para as indústrias que possuam auto-geração, onde exista um equilíbrio ótimo entre a energia auto-gerada e a energia adquirida da concessionária.

Este trabalho pretende encontrar este ponto de operação ótimo, além de mostrar a possibilidade de estender as técnicas de despacho econômico de energia elétrica para este caso de sistemas industriais.

2 - DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO

O objetivo de otimizar os processos industriais com a intenção de atingir um custo mínimo na produção final, é uma necessidade fundamental no competitivo mercado industrial regido pelas regras da livre iniciativa do mundo capitalista.

Tendo em vista o aumento da participação da energia elétrica como insumo de produção, constituindo-se desta forma em um dos elementos de formação na estrutura de custos, foi desenvolvido neste trabalho uma rotina, utilizando-se de metodologias

de otimização, no sentido de encontrar um ponto ótimo de operação com a finalidade de minimizar os gastos com energia elétrica e, indiretamente, diminuir o custo final de produção.

A formulação do método empregado no programa desenvolvido para encontrar o ponto ótimo de operação desejado implica em algumas hipóteses que de certa forma limitam a sua utilização. Entre estas condições limitadoras, está o fato de que o procedimento de otimização utilizado, somente poderá ser aplicado sobre períodos onde a carga seja constante. Da mesma forma, a geração de energia elétrica e a extração de vapor deverão ser supostas constantes. Como na realidade estes valores variam ao longo do tempo, deverão ser introduzidas condições para superar as limitações decorrentes do método utilizado.

A dissertação está dividida em 5 (cinco) partes, sendo que as duas partes iniciais tratam da otimização em si. A terceira dá uma descrição do programa desenvolvido. A quarta parte trata da análise de alguns exemplos de aplicação do programa, apresentando conclusões a respeito dos resultados obtidos. Finalmente, a quinta parte (Apêndices) da dissertação é referente aos fundamentos das técnicas utilizadas no decorrer do desenvolvimento das duas primeiras partes do trabalho.

Na PARTE I, procura-se encontrar valores ótimos médios de demanda em sistemas com auto-geração de eletricidade. O procedimento de otimização empregado é o método dos Multiplicadores de Lagrange. A otimização será feita, primeiramente, sobre um modelo simplificado onde todas as perdas serão desconsideradas. Os valores ótimos assim encontrados serão usados como valores iniciais do processo iterativo, que terá que ser resolvido quando da consideração das perdas no modelo anterior. Serão analisadas, nes

PARTE I

OTIMIZAÇÃO DA DEMANDA MÉDIA NECESSÁRIA EM UM SISTEMA INDUSTRIAL COM AUTO-GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

1 - INTRODUÇÃO

Esta primeira parte da dissertação procura mostrar como é possível estender as técnicas convencionais de despacho econômico de energia elétrica aos sistemas industriais. Toda técnica necessária para os procedimentos e desenvolvimentos aqui utilizados estão descritos na quinta parte do trabalho.

Inicialmente, faz-se a análise utilizando-se um modelo básico, bastante simples, de geração mista de vapor e energia elétrica, utilizando-se sistema de contrapressão. Feita a análise do modelo básico simplificado e encontradas as equações que regem o comportamento deste, é mostrada a organização das funções de custo para a utilização do método dos multiplicadores de Lagrange, já para um modelo mais elaborado.

Nesta parte, o estudo é feito desprezando-se as perdas na transmissão do vapor e na transmissão de energia elétrica, perdas estas denominadas de perdas de distribuição do sistema. No entanto, as perdas internas da turbina e do gerador são consideradas nas funções de custo e estão incorporadas na representação matemática utilizada para as funções de custo. Em uma etapa seguinte, serão incluídas também as perdas de distribuição, o que implicará em alterações no equacionamento a partir do modelo básico

co.

Feitas todas as considerações de cálculo e preparadas as equações necessárias, parte-se, finalmente, para encontrar a solução ótima. Para tanto, será necessária a solução de um sistema de equações que visam a determinação dos valores corrigidos das variáveis que estão sendo avaliadas. A solução deste sistema é feita pelo método de Newton-Raphson, pois este método tem se mostrado, na prática, adequado para a solução de tal sistema de equações.

Enfim, após obedecido um critério de convergência pré-estabelecido, fica resolvido o problema e conhecidos os valores pretendidos ótimos.

2 - MODELO BÁSICO

O modelo básico de geração mista (energia elétrica-vapor), em análise neste trabalho, está ilustrado na figura 1. Tal modelo pretende representar um caso típico de uma unidade de auto-geração de energia elétrica, através de turbina de contra-pressão. Aqui são desprezadas as perdas de distribuição (perda nas transmissões de vapor e de energia elétrica), muito embora as perdas inerentes ao modelo estejam incorporadas na própria formulação matemática deste.

A característica básica da unidade consiste na extração de uma parcela variável de vapor para suprir o consumo próprio de calor necessário ao processo industrial. Em cada nível esta parcela de vapor saída da turbina será quantizada através do

seu valor de entalpia (H), pois é a forma mais adequada para representar a quantidade de energia contida em uma determinada quantidade de vapor.

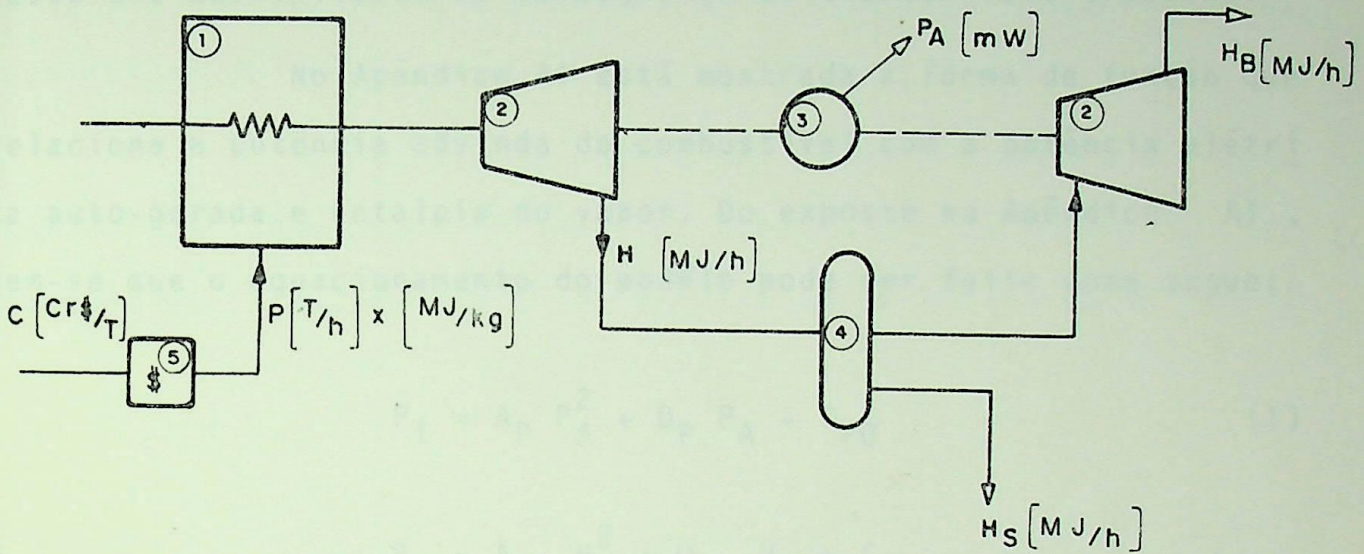


Figura 1 - Modelo básico de auto-geração com turbina a vapor

Onde, na figura 1, tem-se:

- 1 caldeira
- 2 turbina de contrapressão
- 3 gerador
- 4 trocador de calor
- 5 preço atual do combustível [Cr\$/T]
- PA = potência elétrica auto-geração [MW]
- H = entalpia do vapor [MJ/h]
- H_S = entalpia do vapor - nível de pressão de extração [MJ/h]
- H_B = entalpia do vapor - nível de contrapressão [MJ/h]
- P = potência introduzida com o combustível [MW]
- C = custo do combustível [Cr\$/T]

O equacionamento do modelo em termos de custo de produção procura ligar as variáveis P_A , H_B e H_S com a potência advinda do combustível (P). A maneira mais simples de representar tal ligação é, sem dúvida, o ajuste linear, porém, na prática, o ajuste quadrático tem sido mais conveniente para associar ao processo dos multiplicadores de Lagrange utilizado neste trabalho.

No Apêndice A1 está mostrada a forma de função que relaciona a potência advinda do combustível com a potência elétrica auto-gerada e entalpia do vapor. Do exposto no Apêndice A1, tem-se que o equacionamento do modelo pode ser feito como segue:

$$P_1 = A_P P_A^2 + D_P P_A + C_{PO} \quad (1)$$

$$P_2 = A_{HB} H_B^2 + D_{HB} H_B + C_{HBO} \quad (2)$$

$$P_3 = A_{HS} H_S^2 + D_{HS} H_S + C_{HSO}$$

$A_P, A_{HB}, A_{HS}, D_P, D_{HB}, D_{HS}, C_{PO}, C_{HBO}, C_{HSO}$ = coeficientes a determinar

As unidades dos coeficientes das funções de custo deverão manter o equilíbrio dimensional destas.

P_A = potência elétrica auto-gerada [MW]

H_B = entalpia do vapor (nível de contrapressão) [MJ/h]

H_S = entalpia do vapor (nível de pressão de extração) [MJ/h]

P_1 = parcela de potência advinda do combustível para gerar P_A [MJ/h]

P_2 = parcela de potência advinda do combustível para extrair H_B [MJ/h]

P_3 = parcela de potência advinda do combustível para extrair H_S [MJ/h]

É bastante evidente que além destas equações (1) e (2) deva-se procurar uma equação que estabeleça a parcela adicional de potência, advinda do combustível, para levar em conta a interação existente entre a potência elétrica auto-gerada (P_A) e as quantidades de vapor liberadas para o processo (H_S/H_B).

Tal interação poderá ser melhor entendida se for considerada sob o seguinte aspecto: suponha que na figura 2 (representações esquemáticas do modelo básico em análise), as variáveis

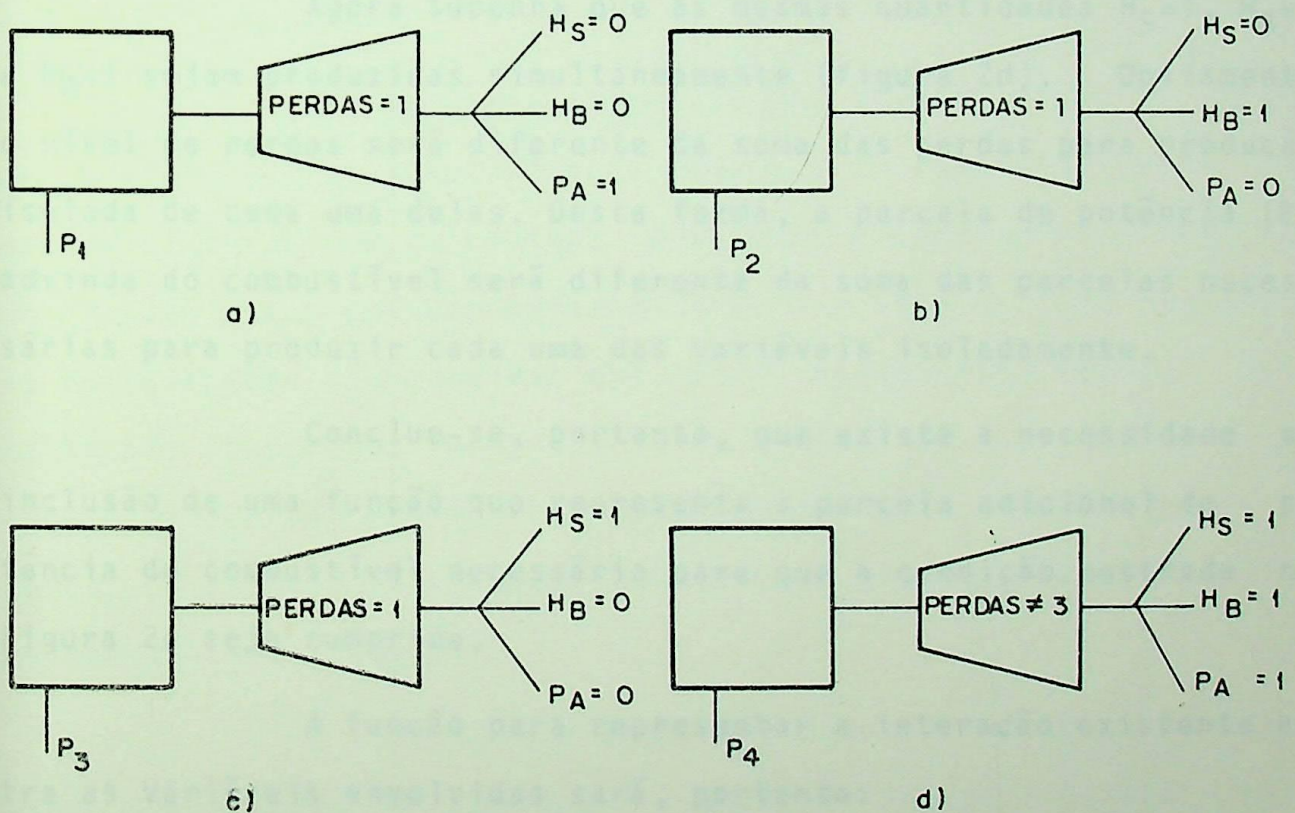


Figura 2 - Representação esquemática do modelo básico mostrado na Figura 1

veis P_A , H_S e H_B possam ser produzidas isoladamente, isto é, possa ser gerada potência elétrica sem extração de vapor e, da mesma forma, possa ser extraído vapor sem gerar potência elétrica.

Desta forma, tem-se que para gerar uma parcela de potência elétrica $P_A=1$ (figura 2a), será necessária uma parcela de potência do combustível P_1 , implicando um certo valor de perdas internas ao modelo.

Para extrair uma quantidade de vapor $H_B=1$ (figura 2b), será necessária uma parcela de potência do combustível P_2 , implicando também em um certo valor de perdas.

O mesmo ocorrendo para o caso esquematizado na figura 2c.

Agora suponha que as mesmas quantidades $H_S=1$, $H_B=1$ e $P_A=1$ sejam produzidas simultaneamente (figura 2d). Obviamente o nível de perdas será diferente da soma das perdas para produção isolada de cada uma delas. Desta forma, a parcela de potência (P_4) advinda do combustível será diferente da soma das parcelas necessárias para produzir cada uma das variáveis isoladamente.

Conclue-se, portanto, que existe a necessidade de inclusão de uma função que represente a parcela adicional de potência do combustível necessária para que a condição mostrada na Figura 2d seja cumprida.

A função para representar a interação existente entre as variáveis envolvidas será, portanto:

$$P_4 = P_A A_{PHB} H_B + P_A A_{PHS} H_S + H_B A_{HBS} H_S \quad (3)$$

onde: A_{PHB} , A_{PHS} e A_{HBS} = coeficientes a determinar

P_4 = parcela adicional de potência advinda do combustível para representar a interação entre P_A , H_S e H_B

A determinação dos coeficientes das funções (1), (2) e (3) pode ser feita através de ensaios no sistema real, de modo bastante simples ou através de observações e registro dos dados de interesse, durante a operação normal do sistema. A forma de determinação dos coeficientes está exposta no Apêndice A1.

Conhecidas as funções de consumo dadas em (1), (2) e (3) pode-se estabelecer a função de consumo global para o modelo em análise como uma composição destas quatro parcelas. Assim sendo, tem-se:

$$P = P(P_A, H_S, H_B) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (4)$$

Inicialmente efetua-se uma simplificação no sistema em análise. Tal simplificação consiste em desprezar-se as perdas de distribuição do sistema. A solução encontrada com tal simplificação é uma solução aproximada para o caso no qual as perdas de distribuição são consideradas. Sendo assim, este valor será utilizado como ponto de partida para o processo iterativo que aparecerá quando for analisado o mesmo sistema, considerando-se as perdas de distribuição, ou seja, devido à transmissão de vapor e de energia elétrica.

O fato de que as perdas de distribuição estejam sendo desprezadas faz com que o equilíbrio energético seja estabelecido entre a potência elétrica requerida pela carga (P_D) e a potência elétrica auto-gerada (P_A). Da mesma forma, deverá haver equilíbrio entre a potência térmica do vapor do nível de extração (H_S) e a potência térmica requerida pelo processo em nível supe

rior de entalpia (H_{DS}), assim como entre a potência térmica do vapor do nível de contrapressão (H_B) e a potência térmica requerida pelo processo em nível inferior de entalpia (H_{DB}).

Obedecendo-se então o equilíbrio energético do sistema, pode-se escrever as equações a seguir:

$$P_A - P_D = 0 \quad (5)$$

$$H_B - H_{DB} = 0 \quad (6)$$

$$H_S - H_{DS} = 0$$

onde: P_D = potência elétrica requerida pela carga [MW]

H_{DB} = potência térmica requerida pelo processo em nível inferior de pressão [MJ/h]

H_{DS} = potência térmica requerida pelo processo em nível superior de pressão [MJ/h]

As equações (5) e (6) são conhecidas como restrições de carga, significando que os valores ótimos para P_A , H_B e H_S deverão satisfazer as restrições estabelecidas no processo industrial.

Como o objetivo pretendido é o de minimizar os custos referentes a consumo de combustível, tem-se a seguinte formulação, no aspecto global do problema:

$$\text{Minimizar: } P = P(P_A, H_S, H_B) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$\text{Sujeito a: } P_A - P_D = 0$$

$$H_B - H_{DB} = 0$$

$$H_S - H_{DS} = 0$$

(7)

Para a solução deste problema (não-linear) pode-se aplicar um método de otimização qualquer dentre os existentes. Como o aspecto do problema a ser resolvido é tipicamente de otimização quadrática sujeita a restrições, pode-se lançar mão dos métodos já consagrados, do despacho econômico, em Sistemas Elétricos de Potência.

Desta forma, o problema será resolvido pela aplicação do método dos multiplicadores de Lagrange, que é um método usualmente empregado para encontrar o mínimo de funções convexas sujeitas a restrições (vide Apêndice A2).

O fato de as equações de consumo P_1 , P_2 , P_3 e P_4 serem convexas assegura a aplicação eficiente do método de Lagrange.

Para que o método de Lagrange seja aplicado, uma condição restritiva deverá ser observada para a função que será minimizada. Tal restrição, que está implícita na própria formulação do método (vide Apêndice A2), refere-se a condição de que a potência requerida pela carga deve ser constante para o intervalo sobre o qual o método será empregado.

Da mesma forma, a potência elétrica auto-gerada e a potência térmica do vapor deverão permanecer em níveis fixos.

3 - DETERMINAÇÃO DOS VALORES DAS POTÊNCIAS ELÉTRICA E DE VAPOR ÓTIMOS REQUERIDAS PELO SISTEMA, PELO MÉTODO DE LAGRANGE - DESPREZANDO-SE AS PERDAS NAS TRANSMISSÕES DE ENERGIA ELÉTRICA E NA TRANSMISSÃO DE VAPOR

Para resolver, matematicamente, o problema em aná

lise, como já mencionado, convém utilizar o método dos Multiplicadores de Lagrange. Os fundamentos básicos deste método estão abordados no Apêndice A2 da dissertação.

O Lagrangeano poderá ser obtido das equações (7):

$$\mathcal{L} = P(P_A, H_S, H_B) - \lambda_1(P_A - P_D) - \lambda_2(H_B - H_{DB}) - \lambda_3(H_S - H_{DS}) \quad (8)$$

onde: \mathcal{L} = função Lagrangeano

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ = multiplicadores de Lagrange

As derivadas de \mathcal{L} com relação a P_A, H_S e H_B serão

dadas por:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_A} = \frac{\partial P}{\partial P_A} - \lambda_1 = 2A_P P_A + D_P + A_{PHB} H_B + A_{PHS} H_S - \lambda_1 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial H_B} = \frac{\partial P}{\partial H_B} - \lambda_2 = 2A_{HB} H_B + D_{HB} + A_{PHB} P_A + A_{HBS} H_S - \lambda_2 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial H_S} = \frac{\partial P}{\partial H_S} - \lambda_3 = 2A_{HS} H_S + D_{HS} + A_{PHS} P_A + A_{HBS} H_B - \lambda_3 \quad (11)$$

Uma condição de primeira ordem para que um determinado ponto, de uma dada função convexa, seja um ponto onde essa função atinge um valor mínimo é que a sua derivada deve se anular. Logo, as equações (9) a (11) deverão satisfazer essa condição. Portanto, elas tornam-se:

$$2A_P P_A + A_{PHB} H_B + A_{PHS} H_S - \lambda_1 = - D_P \quad (12)$$

$$2A_{HB} H_B + A_{PHB} P_A + A_{HBS} H_S - \lambda_2 = - D_{HB} \quad (13)$$

$$2A_{HS} H_S + A_{PHS} P_A + A_{HBS} H_B - \lambda_3 = - D_{HS} \quad (14)$$

Seguindo a metodologia dos Multiplicadores de Lagrange, a solução ótima deverá satisfazer as equações (12) a (14), assim como as equações (5) e (6). Logo, o conjunto de equações a ser resolvido será:

$$\frac{\partial P}{\partial P_A} - \lambda_1 = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial P}{\partial H_B} - \lambda_2 = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial P}{\partial H_S} - \lambda_3 = 0 \quad (17)$$

$$P_A - P_D = 0 \quad (18)$$

$$H_B - H_{DB} = 0 \quad (19)$$

$$H_S - H_{DS} = 0 \quad (20)$$

Ou de forma mais compacta:

$$\underline{F} = \underline{0} \quad (21)$$

$$\underline{\phi} = \underline{0} \quad (22)$$

onde: \underline{F} = vetor que contém o primeiro membro das equações (15) a (17)

$\underline{\phi}$ = vetor que contém o primeiro membro das equações (18) a (20).

O problema está reduzido à solução de um sistema de equações, o qual é constituído de equações não-lineares. O sistema em consideração é aquele formado pelas equações (21) e (22) anteriores. Para a obtenção da solução das equações (21) e (22) utiliza-se a equação (23) que fornece o processo iterativo para a solução do problema em análise, já empregando a metodologia de Newton-Raphson:

$$\begin{array}{c} \left| \begin{array}{c} P_A \\ H_B \\ H_S \\ \hline \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{array} \right|^{(K+1)} = \left| \begin{array}{c} P_A \\ H_B \\ H_S \\ \hline \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{array} \right|^K - (\underline{J}^{(K)})^{-1} \left| \begin{array}{c} \underline{F} \\ \hline \underline{\phi} \end{array} \right|^K \end{array} \quad (23)$$

onde: K = passo de iteração

\underline{J} = matriz Jacobiana do conjunto de equações (21) e (22)

A matriz Jacobiana terá a forma:

$$\underline{J}^{(K)} = \left| \begin{array}{ccc|ccc} \frac{\partial \underline{F}}{\partial P_A} & \frac{\partial \underline{F}}{\partial H_B} & \frac{\partial \underline{F}}{\partial H_S} & \frac{\partial \underline{F}}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial \underline{F}}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial \underline{F}}{\partial \lambda_3} \\ \hline \frac{\partial \underline{\phi}}{\partial P_A} & \frac{\partial \underline{\phi}}{\partial H_B} & \frac{\partial \underline{\phi}}{\partial H_S} & \frac{\partial \underline{\phi}}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial \underline{\phi}}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial \underline{\phi}}{\partial \lambda_3} \end{array} \right| \quad (24)$$

Ou calculando-se as derivadas:

$$J^{(K)} = \begin{bmatrix} 2A_P & A_{PHB} & A_{PHS} & -1 & 0 & 0 \\ A_{PHB} & 2A_{HB} & A_{HBS} & 0 & -1 & 0 \\ A_{PHS} & A_{HBS} & 2A_{HS} & 0 & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} P_A \\ H_B \\ H_S \\ \hline \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix}^{(K+1)} = \begin{bmatrix} P_A \\ H_B \\ H_S \\ \hline \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix}^{(K)} - \left(\begin{bmatrix} 2A_P & A_{PHB} & A_{PHS} & -1 & 0 & 0 \\ A_{PHB} & 2A_{HB} & A_{HBS} & 0 & -1 & 0 \\ A_{PHS} & A_{HBS} & 2A_{HS} & 0 & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{(K)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 2A_P P_A + D_P + A_{PHB} H_B + A_{PHS} H_S - \lambda_1 \\ 2A_{HB} H_B + D_{HB} + A_{PHB} P_A + A_{HBS} H_S - \lambda_2 \\ 2A_{HS} H_S + D_{HS} + A_{PHS} P_A + A_{HBS} H_B - \lambda_3 \\ \hline P_A - P_D \\ H_B - H_{DB} \\ H_S - H_{DS} \end{bmatrix}$$

(26)

Resolvendo-se o sistema dado em (26) pode-se obter os valores da quantidade de energia elétrica auto-gerada e a quantidade de vapor extraída para se operar a mínimo custo. Todavia, até este ponto utilizou-se de uma simplificação (desconsideração das perdas de distribuição) no sistema analisado. No entanto, como mencionado anteriormente, estes valores encontrados (desprezando-se as perdas) têm sua importância, pois servirão como valor inicial para o caso mais real, ou seja, o caso de considerar-se as perdas, pois como será visto, o cálculo dos valores ótimos será efetuado através de um processo iterativo.

Na seção seguinte, é feita a análise do problema

com a introdução das perdas na formulação anterior, para a obtenção dos valores ótimos desejados.

4 - DETERMINAÇÃO DOS VALORES DAS POTÊNCIAS ELÉTRICA E DE VAPOR ÓTIMOS REQUERIDOS PELO SISTEMA, PELO MÉTODO DE LAGRANGE - CONSIDERANDO-SE, AGORA, AS PERDAS NAS TRANSMISSÕES DE ENERGIA ELÉTRICA E DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

Simultaneamente à introdução destas perdas nas equações de coordenação, será considerado um modelo de sistema mais completo e mais real. Neste modelo, serão representadas não só aquelas perdas, como também a parcela de energia elétrica comprada da concessionária (pressupõe-se que o sistema opere em paralelo com a concessionária). A representação esquemática deste novo modelo pode ser vista na figura 3.

A inclusão das perdas de distribuição no modelo não oferece dificuldades; apenas deve-se ressaltar que serão incluídas tanto as perdas elétricas como também as térmicas. É certo que deverão ser desenvolvidas funções para a representação de ambos os tipos de perdas, a fim de se poder avaliar quantitativamente os resultados. No entanto, deve ser levado em conta que, nesta seção, o interesse estará voltado para o emprego dos valores numéricos das perdas e das variações das perdas com as variações de carga e não com a forma pela qual tais valores foram obtidos. Considerando-se este fato, o equacionamento das perdas não será feito nesta parte da dissertação, será feito no Apêndice A1, limitando-se nesta seção à utilização dos resultados lá obtidos.

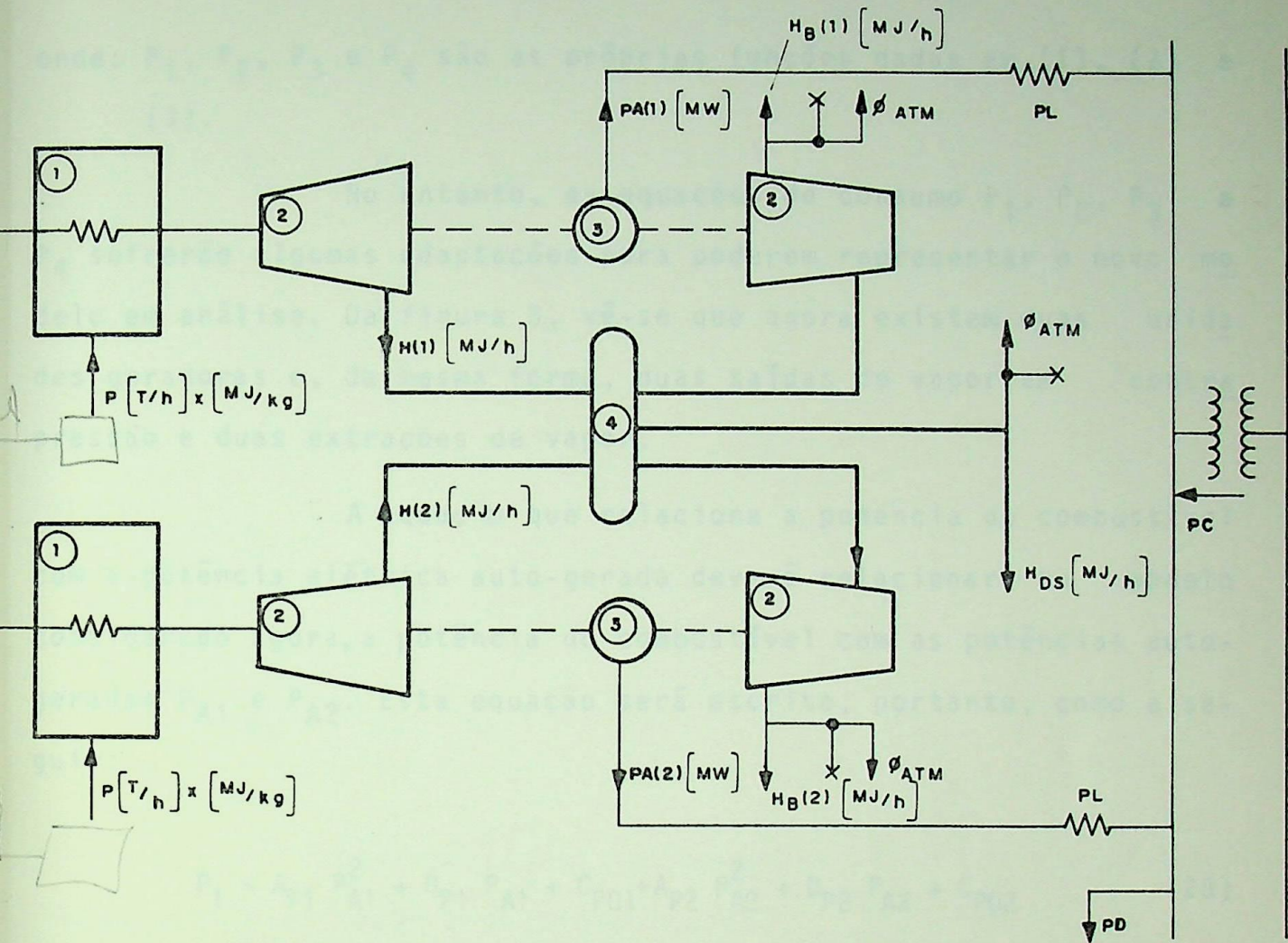


Figura 3 - Sistema utilizado com introdução de perdas de distribuição e parcela referente à energia comprada

onde: P_L = perdas elétricas de transmissão de energia elétrica

H_L = perdas térmicas de distribuição de vapor

P_C = potência comprada

A introdução das perdas de distribuição não altera a função a otimizar, sendo assim, a função objetivo continua sendo a (4), aqui repetida por comodidade:

$$P = P(P_A, H_S, H_B) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (27)$$

onde: P_1 , P_2 , P_3 e P_4 são as próprias funções dadas em (1), (2) e (3).

No entanto, as equações de consumo P_1 , P_2 , P_3 e P_4 sofrerão algumas adaptações para poderem representar o novo modelo em análise. Da figura 3, vê-se que agora existem duas unidades geradoras e, da mesma forma, duas saídas de vapor em contra pressão e duas extrações de vapor.

A equação que relaciona a potência do combustível com a potência elétrica auto-gerada deverá relacionar, no modelo considerado agora, a potência do combustível com as potências auto-geradas P_{A1} e P_{A2} . Esta equação será escrita, portanto, como a seguir:

$$P_1 = A_{P1} P_{A1}^2 + D_{P1} P_{A1} + C_{P01} + A_{P2} P_{A2}^2 + D_{P2} P_{A2} + C_{P02} \quad (28)$$

A equação (28) pode ser escrita de forma mais simples se for usada a seguinte notação matricial:

$$P_1 = [P_{A1} \ P_{A2}] \begin{vmatrix} A_{P1} & 0 \\ 0 & A_{P2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} P_{A1} \\ P_{A2} \end{vmatrix} + [D_{P1} \ D_{P2}] \begin{vmatrix} P_{A1} \\ P_{A2} \end{vmatrix} + [1 \ 1] \begin{vmatrix} C_{P01} \\ C_{P02} \end{vmatrix} \quad (29)$$

Ou de forma compacta:

$$P_1 = \underline{P}'_A \underline{A}'_P \underline{P}_A + \underline{D}'_P \underline{P}_A + C_{P0} \quad (30)$$

onde: $C_{P0} = C_{P01} + C_{P02}$



$$\underline{P}_A = \begin{vmatrix} P_{A1} \\ P_{A2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{P}'_A = [P_{A1} \quad P_{A2}]$$

$$\underline{A}_P = \begin{vmatrix} A_{P1} & 0 \\ 0 & A_{P2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{D}_P = \begin{vmatrix} D_{P1} \\ D_{P2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{D}'_P = [D_{P1} \quad D_{P2}]$$

Da mesma forma, as equações (2) e (3) escritas na forma matricial terão o seguinte aspecto:

$$P_2 = \underline{H}'_B \underline{A}_{HB} \underline{H}_B + \underline{D}'_{HB} \underline{H}_B + C_{HBO} \quad (31)$$

$$P_3 = \underline{H}'_S \underline{A}_{HS} \underline{H}_S + \underline{D}'_{HS} \underline{H}_S + C_{HSO} \quad (32)$$

$$P_4 = \underline{P}'_A \underline{A}_{PHB} \underline{H}_B + \underline{P}'_A \underline{A}_{PHS} \underline{H}_S + \underline{H}'_B \underline{A}_{HBS} \underline{H}_S \quad (33)$$

onde, nas equações (31), (32) e (33), de forma análoga tem-se:

$$\underline{H}_B = \begin{vmatrix} H_{B1} \\ H_{B2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{A}_{HB} = \begin{vmatrix} A_{HB1} & 0 \\ 0 & A_{HB2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{D}_{HB} = \begin{vmatrix} D_{HB1} \\ D_{HB2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{H}_S = \begin{vmatrix} H_{S1} \\ H_{S2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{A}_{HS} = \begin{vmatrix} A_{HS1} & 0 \\ 0 & A_{HS2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{D}_{HS} = \begin{vmatrix} D_{HS1} \\ D_{HS2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{A}_{PHB} = \begin{vmatrix} A_{PHB1} & 0 \\ 0 & A_{PHB2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{A}_{PHS} = \begin{vmatrix} A_{PHS1} & 0 \\ 0 & A_{PHS2} \end{vmatrix}$$

$$\underline{A}_{HBS} = \begin{vmatrix} A_{HBS1} & 0 \\ 0 & A_{HBS2} \end{vmatrix}$$

A função de consumo global para o modelo será da da por:

$$P = P(\underline{P}_A, \underline{H}_S, \underline{H}_B) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (34)$$

As únicas equações que realmente sofrerão mudan ças em sua forma são as relativas às restrições de carga. Estas passarão a ser as seguintes:

$$\underline{1}' \underline{P}_A - P_D - P_L + P_C = 0 \quad (35)$$

$$\underline{1}' \underline{H}_B - H_{DB} - H_{LB} = 0 \quad (36)$$

$$\underline{1}' \underline{H}_S - H_{DS} - H_{LS} = 0 \quad (37)$$

onde: P_L = perdas de transmissão de energia elétrica

H_{LB} = perdas de distribuição do vapor do nível de contra-
pressão

H_{LS} = perdas de distribuição do vapor no nível de extração

P_C = potência elétrica comprada

Utilizando-se o Método de Lagrange, o novo Lagran

geano será:

$$\mathcal{L} = P(P_A, H_S, H_B) - \lambda_1 (1 - P_A - P_D - P_L + P_C) - \lambda_2 (1 - H_B - H_{DB} - H_{LB}) - \lambda_3 (1 - H_S - H_{DS} - H_{LS}) \quad (38)$$

onde: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ = multiplicadores de Lagrange

As derivadas de \mathcal{L} com relação a P_A , H_B e H_S são dadas por:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_A} = \frac{\partial P}{\partial P_A} - \lambda_1 \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_A} \right) \quad (39)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial H_B} = \frac{\partial P}{\partial H_B} - \lambda_2 \left(1 - \frac{\partial H_{LB}}{\partial H_B} \right) \quad (40)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial H_S} = \frac{\partial P}{\partial H_S} - \lambda_3 \left(1 - \frac{\partial H_{LS}}{\partial H_S} \right) \quad (41)$$

Sendo que os vetores $\frac{\partial P_L}{\partial P_A}$, $\frac{\partial H_{LB}}{\partial H_B}$ e $\frac{\partial H_{LS}}{\partial H_S}$ repre-

sentam as perdas incrementais do sistema, o primeiro sendo referente a geração de energia elétrica, o segundo refere-se às perdas incrementais no sistema de distribuição de vapor de contrapressão e o terceiro no sistema de distribuição de vapor no nível de extração.

Se for realizada a seguinte modificação:

$$\left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_A} \right) = \underline{E} \quad (42)$$

$$\left(1 - \frac{\partial H_{LB}}{\partial H_B} \right) = \underline{V}_B \quad (43)$$

$$\left(1 - \frac{H_{LS}}{H_S}\right) = \underline{V}_S \quad (44)$$

e feita a devida substituição, as equações (39), (40) e (41) tornam-se:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_A} = \frac{\partial P}{\partial P_A} - \lambda_1 \underline{E} \quad (45)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial H_B} = \frac{\partial P}{\partial H_B} - \lambda_2 \underline{V}_B \quad (46)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial H_S} = \frac{\partial P}{\partial H_S} - \lambda_3 \underline{V}_S \quad (47)$$

Aplicando a condição necessária para a obtenção do consumo mínimo, as equações (45) a (47) transformam-se em:

$$\frac{\partial P}{\partial P_A} = \lambda_1 \underline{E} \quad (48)$$

$$\frac{\partial P}{\partial H_B} = \lambda_2 \underline{V}_B \quad (49)$$

$$\frac{\partial P}{\partial H_S} = \lambda_3 \underline{V}_S \quad (50)$$

Assim, os componentes dos vetores \underline{E} , \underline{V}_B e \underline{V}_S representam uma forma de medir a dificuldade (vetores penalização)

para uma dada unidade contribuir para suprir a carga. Uma rápida análise das equações (48) a (50) mostra que quanto maiores forem os valores dos inversos dos componentes dos vetores de penalização, menores serão os respectivos consumos incrementais e maiores as perdas incrementais e, conseqüentemente, mais difícil para a unidade correspondente contribuir com uma parcela da potência para a carga.

Conclui-se que as unidades que operam com custos incrementais menores contribuem de forma menos significativa para o suprimento da carga, que as que operam com custos incrementais maiores.

De (30), (31), (32), (33), (45) e (47), obtêm-se:

$$2A_{=P} P_{-A} + D_{-P} + A_{=PHB} H_{-B} + A_{=PHS} H_{-S} - \lambda_1 E = 0 \quad (51)$$

$$2A_{=HB} H_{-B} + D_{-HB} + A_{=PHB} P_{-A} + A_{=HBS} H_{-S} - \lambda_2 V_{-B} = 0 \quad (52)$$

$$2A_{=HS} H_{-S} + D_{-HS} + A_{=PHS} P_{-A} + A_{=HBS} H_{-B} - \lambda_3 V_{-S} = 0 \quad (53)$$

De forma análoga ao caso sem as perdas de distribuição, a solução ótima deverá satisfazer às equações (51) a (53) bem como às equações de restrições de carga dadas pelas equações (35) a (37).

Assim, o conjunto de equações a serem satisfeitas deverá ser:

$$2A_{=P} P_{-A} + D_{-P} + A_{=PHB} H_{-B} + A_{=PHS} H_{-S} - \lambda_1 E = 0 \quad (54)$$

$$2A_{=HB} H_{-B} + D_{-HB} + A_{=HB} P_{-A} + A_{=HBS} H_{-S} - \lambda_2 V_{-B} = 0 \quad (55)$$

$$2A_{HS} H_S + D_{HS} + A_{PHS} P_A + A_{HBS} H_B - \lambda_3 V_S = 0 \quad (56)$$

$$1' P_A - P_D - P_L + P_C = 0 \quad (57)$$

$$1' H_B - H_{DB} - H_{LB} = 0 \quad (58)$$

$$1' H_S - H_{DS} - H_{LS} = 0 \quad (59)$$

Ou de forma compacta:

$$\underline{F}_P = \underline{0} \quad (60)$$

$$\underline{\phi}_P = \underline{0} \quad (61)$$

onde: \underline{F}_P = vetor contendo os primeiros membros da (54) a (56).

$\underline{\phi}_P$ = vetor contendo os primeiros membros de (57) a (59).

A solução será obtida pelo processo de Newton-Raphson, onde o passo de iteração será:

$$\begin{pmatrix} P_A \\ H_B \\ H_S \\ \dots \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix}^{(K+1)} = \begin{pmatrix} P_A \\ H_B \\ H_S \\ \dots \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix}^{(K)} - (J^{(K)})^{-1} \begin{pmatrix} F_P \\ \dots \\ \phi_P \end{pmatrix} \quad (62)$$

A matriz Jacobiana terá a seguinte forma:

$$\underline{J}^{(K)} = \begin{array}{|ccc|ccc|} \hline \frac{\partial F_P}{\partial P_A} & \frac{\partial F_P}{\partial H_B} & \frac{\partial F_P}{\partial H_S} & \frac{\partial F_P}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial F_P}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial F_P}{\partial \lambda_3} \\ \hline \frac{\partial \phi_P}{\partial P_A} & \frac{\partial \phi_P}{\partial H_B} & \frac{\partial \phi_P}{\partial H_S} & \frac{\partial \phi_P}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial \phi_P}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial \phi_P}{\partial \lambda_3} \\ \hline \end{array} \quad (63)$$

Ou substituindo-se as derivadas, a matriz Jacobiana torna-se:

$$\underline{J}^{(K)} = \begin{array}{|ccc|ccc|} \hline 2A_{=P} + \lambda_1 \frac{\partial P_L}{P_A^2} & A_{=PHB} & A_{=PHS} & -\underline{E} & \underline{0} & 0 \\ \hline A_{=PHB} & 2A_{=HB} + \lambda_2 \frac{\partial H_{LB}}{H_B^2} & A_{=HBS} & \underline{0} & -\underline{V}_B & 0 \\ \hline A_{=PHS} & A_{=HBS} & 2A_{=HS} + \lambda_3 \frac{\partial H_{LS}}{H_S^2} & \underline{0} & \underline{0} & -\underline{V}_S \\ \hline \underline{E}' & \underline{0}' & \underline{0}' & 0 & 0 & 0 \\ \underline{0}' & \underline{V}'_B & \underline{0}' & 0 & 0 & 0 \\ \underline{0}' & \underline{0}' & \underline{V}'_S & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \quad (64)$$

A solução do sistema de equações (62) fornecerá valores de \underline{P}_A , \underline{H}_B e \underline{H}_S . Tais valores serão usados para o cálculo de novas perdas e perdas incrementais e, novamente, o sistema (62) será resolvido. O processo iterativo deverá continuar até que um cri

tério de convergência seja cumprido. O critério de convergência poderá ser escolhido de acordo com a precisão desejada para as variáveis \underline{P}_A , \underline{H}_B e \underline{H}_S .

Algumas hipóteses estão implícitas nesta formulação. O processo é aplicado sobre um período onde tanto a demanda quanto a extração de vapor e energia elétrica são supostos constantes. Na realidade, esses valores variam ao longo do tempo e, portanto, é necessário superar de alguma forma esta limitação.

5 - METODOLOGIA UTILIZADA PARA O CÁLCULO DOS VALORES DE POTÊNCIAS ELÉTRICAS REQUERIDAS PELAS CARGAS, ORIUNDAS DA CONCESSIONÁRIA E DA AUTO-GERAÇÃO, LEVANDO-SE EM CONTA O VAPOR REQUERIDO

Em uma primeira etapa, o programa desenvolvido tem a finalidade de encontrar os valores ótimos de \underline{P}_A , \underline{H}_B e \underline{H}_S através da solução iterativa do sistema de equações (62) anterior. Como os valores ótimos em análise minimizam o custo, a cada passo do processo iterativo, será avaliado o custo para aquela condição de operação, sendo que este será comparado com o custo para o ponto de operação obtido na iteração anterior.

No entanto, para o cálculo da energia elétrica adquirida da concessionária, uma série de considerações suplementares terão que ser feitas, conforme referido no Apêndice A3 sobre o custo da energia elétrica comprada, surgindo, destas considerações, preços médios, por kWh consumido, diferentes, para condições diferentes de compra da mesma quantidade de energia.

Um fator decisivo na determinação do preço médio,

que será pago pelo kWh consumido da concessionária, é o valor do fator de carga. O prognóstico deste depende do valor da demanda média no período de referência. Portanto, para que o valor do fator de carga seja conhecido, é necessário prever-se de antemão o valor da demanda média no período de faturamento.

Considerando-se a hipótese referida na seção anterior, ou seja, a necessidade de se aplicar o Método de Lagrange sobre um período de demanda constante, não se pode, obviamente, aplicar este procedimento ao período global de operação, pois, normalmente, a curva de carga não é constante. A idéia, então, é dividir o período total considerado em subperíodos durante os quais a curva de carga possa ser considerada constante sem se cometer erros que comprometam a qualidade da otimização obtida. Criam-se, desta forma, condições para aplicação do método em cada

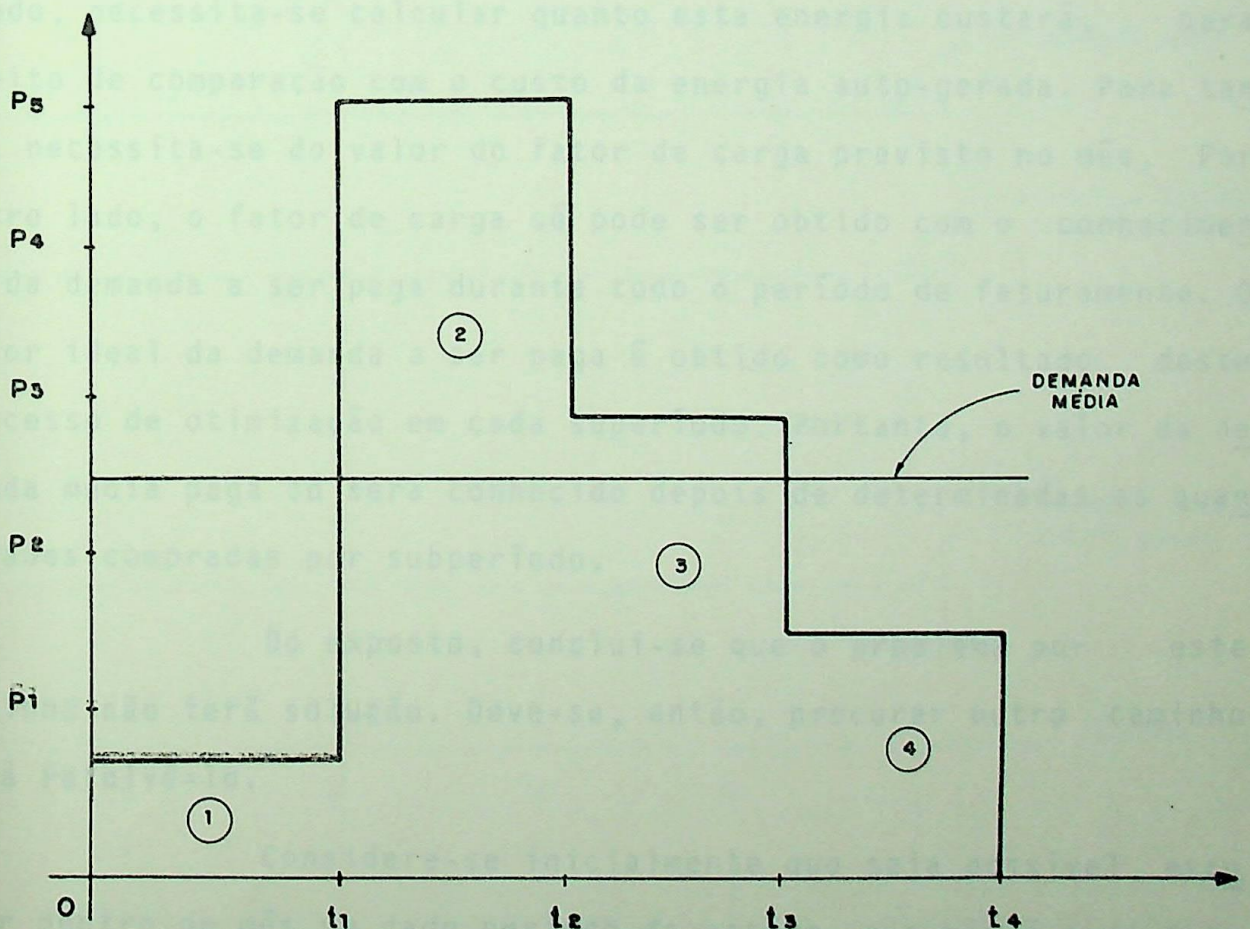


Figura 4 - Curva de carga para exemplificar a divisão de consumo de energia em subperíodos

subperíodo. A curva de carga (figura 4) mostra uma forma de se dividir em subperíodos um período global.

Como pode ser visto pela figura 4, com estas subdivisões, a curva de carga assume valores constantes em cada subperíodo e desta forma criam-se condições para a aplicação do Método de Lagrange. A divisão em subperíodos é feita pelo próprio programa, não precisando-se tomar maiores cuidados com este procedimento, além do fornecimento do número de subperíodos que se deseja.

Volta-se, então, à questão anterior de previsão da demanda média a ser comprada para efeito de cálculo do fator de carga.

Para se conseguir determinar a quantidade de energia elétrica que se deve comprar, por exemplo, no primeiro subperíodo, necessita-se calcular quanto esta energia custará, para efeito de comparação com o custo da energia auto-gerada. Para tanto, necessita-se do valor do fator de carga previsto no mês. Por outro lado, o fator de carga só pode ser obtido com o conhecimento da demanda a ser paga durante todo o período de faturamento. O valor ideal da demanda a ser paga é obtido como resultado deste processo de otimização em cada subperíodo. Portanto, o valor da demanda média paga só será conhecido depois de determinadas as quantidades compradas por subperíodo.

Dô exposto, conclui-se que o problema por este caminho não terá solução. Deve-se, então, procurar outro caminho para resolvê-lo.

Considere-se inicialmente que seja possível escolher dentro do mês um dado período de estudo, que não é o de faturamento e não é tampouco o subperíodo onde a carga é constante. Este

período será, por exemplo, um dia típico de operação da indústria, ou mesmo alguns dias ou algumas horas que caracterizem um ciclo operacional na indústria. Desde que os valores da carga variam durante este período, o dado a ser manipulado pelo programa será a potência média demandada que, logicamente, é um valor constante.

Deve-se tomar o cuidado de escolher, como já mencionado, um período cíclico de operação no mês, de tal forma que a demanda média nesse período possa representar a demanda média no período global (mês).

Na primeira etapa, o programa aplica o método de Lagrange para encontrar o ponto ótimo em termos de potências médias comprada e auto-gerada. A figura 5 mostra como se apresenta a solução nesta fase do programa.

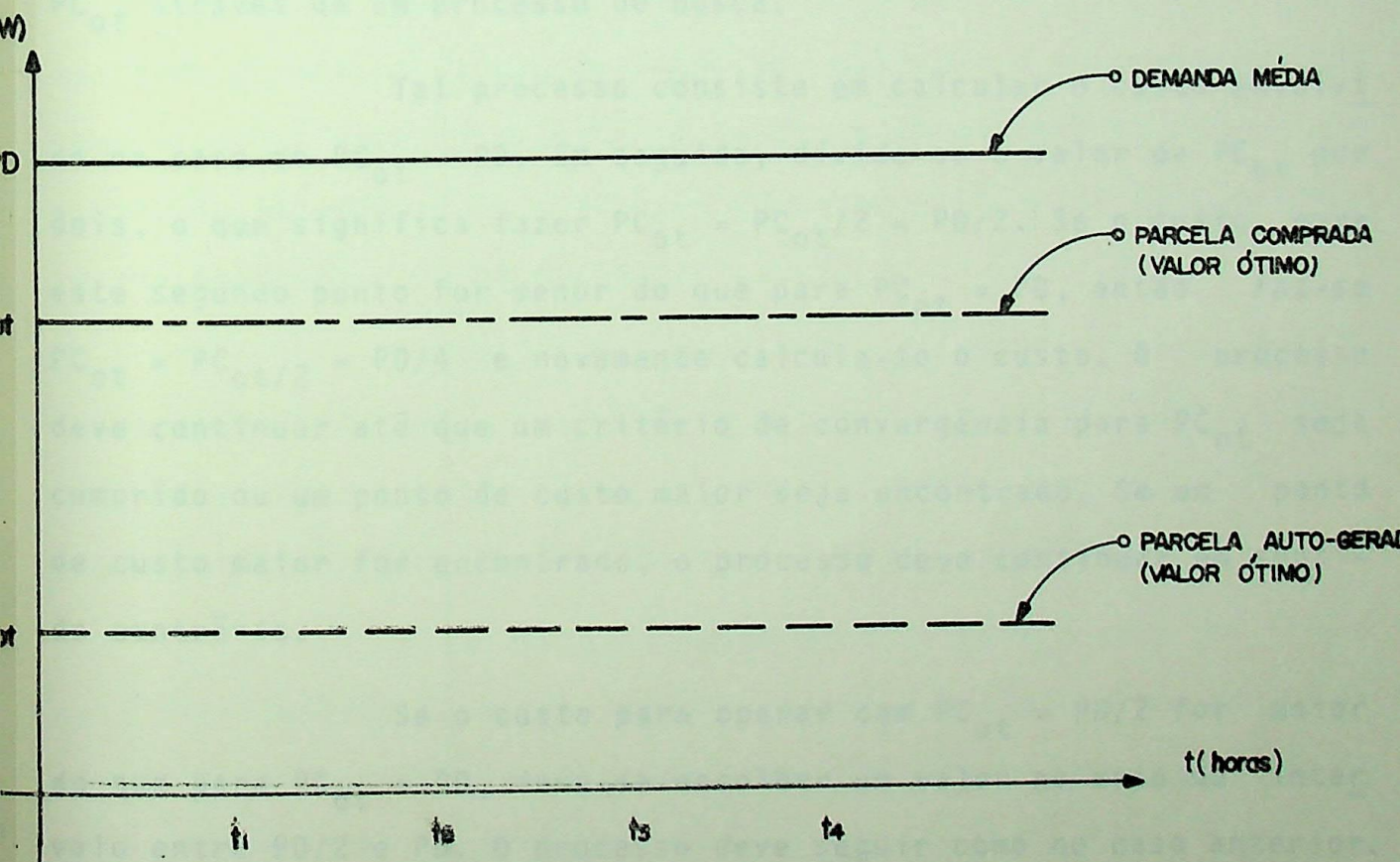


Figura 5 - Representação da solução na primeira etapa do programa (valores arbitrários)

onde na figura 5:

- P_D - potência média solicitada pela carga no período em estudo
- PC_{ot} - potência a ser comprada da concessionária no período em estudo
- PA_{ot} - potência média a ser auto-gerada pela indústria no período em estudo

Para encontrar estes valores médios ótimos, o programa resolve a equação (50). O valor de PC_{ot} (vide figura 4) é considerado, em uma primeira aproximação, igual ao valor da potência média solicitada pela carga no período em estudo, ou seja, considera-se inicialmente que toda a carga é suprida pela concessionária. A partir desta primeira aproximação, procura-se o valor de PC_{ot} através de um processo de busca.

Tal processo consiste em calcular o custo envolvido no caso de $PC_{ot} = PD$. Em seguida, divide-se o valor de PC_{ot} por dois, o que significa fazer $PC_{ot} = PC_{ot}/2 = PD/2$. Se o custo para este segundo ponto for menor do que para $PC_{ot} = PD$, então faz-se $PC_{ot} = PC_{ot}/2 = PD/4$ e novamente calcula-se o custo. O processo deve continuar até que um critério de convergência para PC_{ot} seja cumprido ou um ponto de custo maior seja encontrado. Se um ponto de custo maior for encontrado, o processo deve continuar em sentido contrário.

Se o custo para operar com $PC_{ot} = PD/2$ for maior do que para $PC_{ot} = PD$, deve-se escolher um valor no meio do intervalo entre $PD/2$ e PD . O processo deve seguir como no caso anterior.

O procedimento de busca descrito é chamado de busca por bissecção. Tal processo deverá ser interrompido quando uma

precisão previamente definida para PC_{ot} seja encontrada.

É claro que a capacidade de auto-geração, sendo uma função do consumo de calor pelo processo, ou seja, sendo uma função da quantidade de vapor extraída, as equações obtidas na seção anterior levam em consideração este fato. Logo, entre os valores ótimos conseguidos pela utilização da subrotina ÓTIMO, estão incluídos os valores ótimos de vapor que deverão ser extraídos, e os valores ótimos de vapor em contrapressão. Tais valores estão representados pelos vetores H_S e H_B respectivamente.

O que se deseja em termos práticos, é a quantidade de energia que se deve comprar e auto-gerar em um determinado instante durante a operação para se trabalhar com um custo mínimo, mantendo-se o nível do processo produtivo.

Para que se encontre esta solução, a partir das quantidades médias ótimas de potências comprada e auto-gerada, determinar-se-á como distribuí-las ao longo do período típico de operação, de tal modo a se conseguir um custo mínimo, estabelecendo-se uma estratégia ótima de operação.

Algumas características do sistema deverão ser levadas em consideração, tais como a máxima demanda da concessionária que se pode atingir em um determinado período de operação e as capacidades máxima e mínima dos equipamentos envolvidos.

Além disso, deve-se atentar para o fato de que essa distribuição apresenta características dinâmicas em decorrência da interdependência entre um dado instante de operação e os demais, no decorrer do período.

A segunda parte deste trabalho será dedicada ao estudo do método utilizado para encontrar a solução desejada.

PARTE II

DETERMINAÇÃO DOS VALORES ÓTIMOS DE ENERGIA COMPRADA

E AUTO-GERADA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

1 - INTRODUÇÃO

Esta parte da dissertação visa estudar a segunda etapa do programa desenvolvido, completando assim o processo de otimização de custos, objeto deste trabalho. Mostra-se o método utilizado para solucionar o problema de se encontrar a quantidade ótima de energia que deverá ser comprada e que deverá ser auto-gerada.

Inicialmente, o problema será analisado no sentido de não se perder o sentimento do objetivo que se quer atingir, que é minimizar o custo operacional do sistema no período de faturamento. Desta forma, dividem-se os valores da demanda ótima já calculada para valores médios em valores (discretos) de demanda por subperíodo de modo a atingir um efetivo custo mínimo operacional.

Em seguida, será feita uma análise do método utilizado para encontrar a solução desejada e da possibilidade de se resolver o problema por este método.

Os valores médios foram obtidos de forma a não superar as restrições operacionais do sistema em termos médios. Agora se faz necessário conseguir o mesmo por subperíodo.

No final desta Parte II será dado um exemplo com dados arbitrários, mas escolhidos de modo a possibilitarem compreensão adequada do modo de operação do método. A análise deste exemplo mostrará todos os passos importantes, resultando da aplicação da subrotina.

2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na primeira parte da dissertação, foi utilizado o método de Lagrange, sobre o período global de faturamento, encontrando-se, por conseguinte, os valores ótimos médios de potência auto-gerada e comprada, no período de estudo.

O objetivo desta segunda parte é distribuir as quantidades ótimas médias, entre os subperíodos pré-estabelecidos. Estes subperíodos caracterizam-se por manter a carga praticamente constante, de modo a se poder obter valores ótimos que deverão ser comprados e auto-gerados em cada um deles, de tal modo que se consiga um custo total mínimo. O que se pretende, em outras palavras, é fazer uma otimização a partir dos valores ótimos, porém médios, calculados na primeira parte.

Para se ter uma visão geral das características deste novo problema que se quer resolver, suponha que se tenha uma quantidade arbitrária de potência disponível para ser comprada (PC_{ot}) e pretenda-se que esta seja otimamente distribuída entre um número, também arbitrário, de subperíodos previamente definidos.

Uma primeira etapa do processo será determinar quanto comprar, por exemplo, no primeiro subperíodo.

Neste primeiro subperíodo (vide figura 1) poderá ser comprada qualquer quantidade de potência PC, desde que:

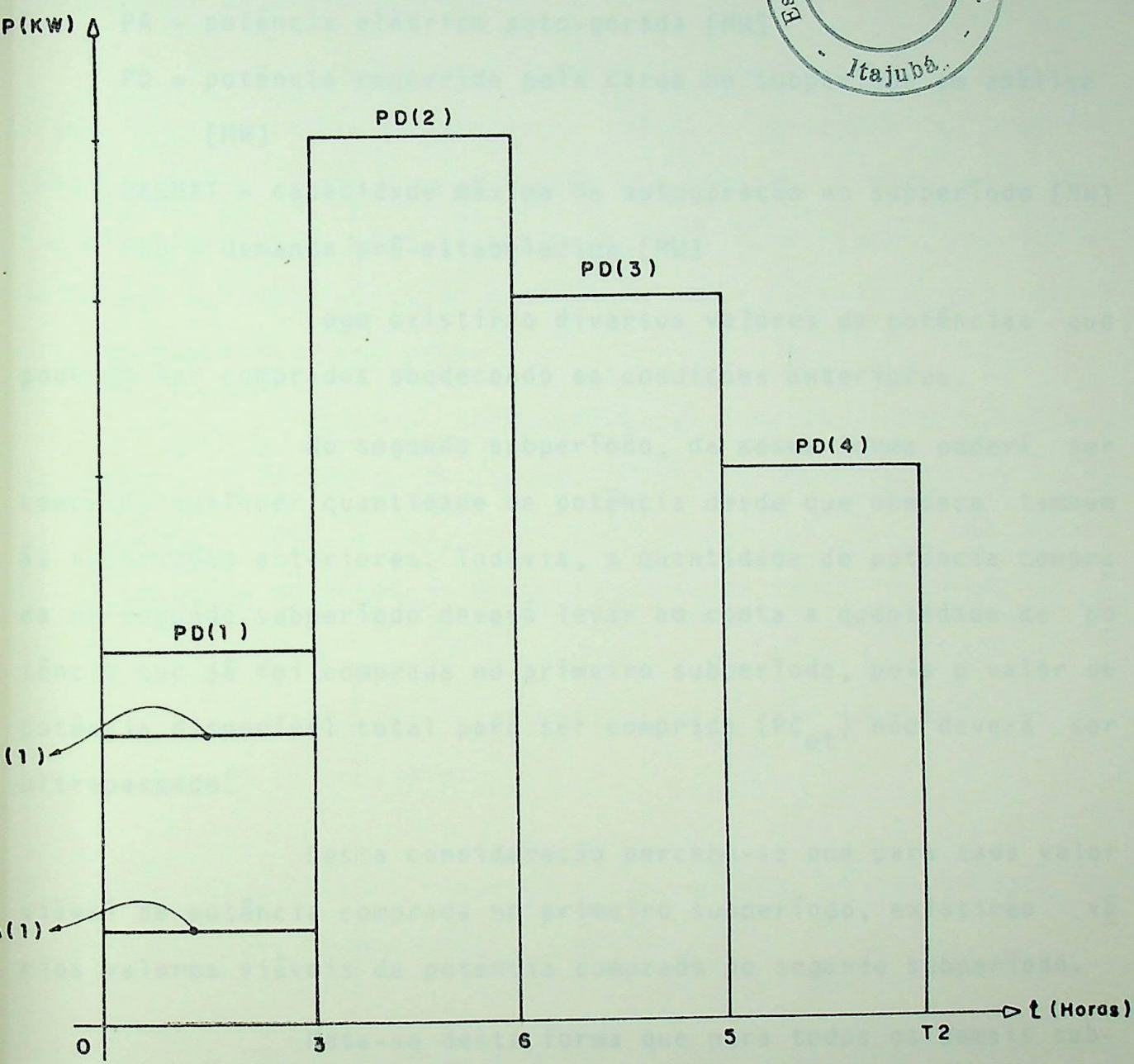


Figura 1 - Ilustração da primeira etapa no processo de distribuição do valor disponível PCOT

$$PC + PA = PD$$

$$PD - PC \leq PAGMXT$$

$$PC \leq PEB$$

onde: PC = potência elétrica comprada [MW]

PA = potência elétrica auto-gerada [MW]

PD = potência requerida pela carga no subperíodo em análise
[MW]

PAGMXT = capacidade máxima de autogeração no subperíodo [MW]

PEB = demanda pré-estabelecida [MW]

Logo existirão diversos valores de potências que poderão ser comprados obedecendo as condições anteriores.

No segundo subperíodo, da mesma forma poderá ser comprada qualquer quantidade de potência desde que obedeça também às restrições anteriores. Todavia, a quantidade de potência comprada no segundo subperíodo deverá levar em conta a quantidade de potência que já foi comprada no primeiro subperíodo, pois o valor de potência disponível total para ser comprada (PC_{ot}) não deverá ser ultrapassado.

Desta consideração percebe-se que para cada valor viável de potência comprada no primeiro subperíodo, existirão vários valores viáveis de potência comprada no segundo subperíodo.

Nota-se desta forma que para todos os demais subperíodos a mesma situação descrita anteriormente se repetirá e, assim, existirá uma infinidade de combinações possíveis para a distribuição da potência disponível para ser comprada (PC_{ot}) entre os subperíodos considerados.

Entretanto, entre as combinações consideradas na

exposição anterior, uma delas, pelo menos, fornecerá um custo menor do que as outras combinações. O objetivo é encontrar o conjunto de valores de potências compradas por subperíodo que forneça mínimo custo de operação, isto é, o objetivo é encontrar a combinação correspondente à distribuição de potência a ser comprada (PC_{ot}) que produza um custo mínimo.

A forma mais natural de encontrar tal conjunto ótimo de potências compradas seria a análise de todas as combinações possíveis. Todavia, não é esta com certeza, a forma mais inteligente, tampouco a mais elegante. A idéia é, portanto, encontrar um método que seja adequado para encontrar a combinação mais econômica de potências compradas.

Dadas as características expostas anteriormente, percebe-se, claramente, os aspectos dinâmicos do problema em análise. Tendo em vista, então, estas características, foi encontrado nos métodos de programação dinâmica a melhor forma de encontrar a solução desejada.

As restrições consideradas pelo programa aqui desenvolvido são as seguintes:

1. A soma das potências comprada e auto-gerada, no subperíodo, deverá ser igual à demanda no subperíodo:

$$PC(I) + PA(I) = PD(I) \quad (I=1,2,\dots,NP) \quad (1)$$

2. A diferença entre a potência requerida, no subperíodo, e a potência comprada não deverá exceder o total da capacidade de auto-geração no subperíodo:

$$PD(I) - PC(I) \leq PAGMXT(I) \quad (I=1,2,\dots, NP) \quad (2)$$

onde: $PAGMXT(I)$ é a capacidade máxima de auto-geração total no subperíodo.

3. A potência comprada, no subperíodo, não poderá ser maior do que o valor de demanda pré-estabelecido: este valor deverá ser ajustado de acordo com o valor mais conveniente para o usuário:

$$PC(I) \leq PEB \quad (I=1,2,\dots, NP) \quad (3)$$

onde: PEB = demanda pré-estabelecida

4. A somatória das potências adquiridas em cada subperíodo deverá ser igual à potência média comprada ótima para o período de estudo e conseqüentemente para o período de faturamento:

$$\sum_{I=1}^{NP} PC(I) = PC_{ot} \quad (I=1,2,\dots, NP) \quad (4)$$

O programa desenvolvido está dotado de uma condição de advertência, para o caso em que a diferença entre a carga, no subperíodo, e a máxima quantidade possível de ser comprada, em cada subperíodo, exceder à capacidade total de auto-geração, no subperíodo considerado. Se tal condição ocorrer, a quantidade com

prada deverá ser incrementada, violando, assim, ou a restrição 3 ou a restrição 4.

3 - MÉTODO UTILIZADO

Do exposto, verifica-se que o problema consiste em alocar, entre NP subperíodos, duas quantidades previamente conhecidas de potência (comprada e auto-gerada). São conhecidas também uma função que fornece o custo para a alocação de uma parcela da primeira quantidade (que pode ser, por exemplo PC_{ot}) e outra que fornece o custo para alocar uma parcela referente à segunda quantidade (que pode ser, por exemplo, PA_{ot}). O problema é distribuir toda a quantidade PC_{ot} e toda a quantidade PA_{ot} entre os NP subperíodos, isto é, escolher NP quantidades $PC(1), PC(2), \dots, PC(NP)$ e $PA(1), PA(2), \dots, PA(NP)$, que minimizem o custo total, sujeito às restrições. O programa desenvolvido utiliza um procedimento de programação dinâmica para resolver este problema.

O fundamento básico da programação dinâmica é o princípio de otimalidade de Bellman [4]. Este princípio pode ser enunciado da seguinte forma:

"Dado uma trajetória ótima de um ponto A para um ponto C, a parte da trajetória saindo de qualquer ponto intermediário B para o ponto C deve ser uma trajetória ótima de B para C".

Na figura 2, a seguir, o caminho 1-2 é o caminho ótimo de A para C, então, de acordo com o princípio de otimalidade, o caminho 2 é o ótimo de B para C. A prova por contradição para este caso é imediata. Se for considerado que algum outro caminho

$\underline{2}'$, por exemplo, \bar{e} o \bar{o} timo de \underline{B} para \underline{C} , ent \bar{a} o a trajet \bar{o} ria 1-2' tem menor custo que a trajet \bar{o} ria 1-2. Entretanto, isto contradiz o fato de que 1-2 \bar{e} a trajet \bar{o} ria \bar{o} tima de \underline{A} para \underline{C} e, assim, o caminho $\underline{2}$ tem de ser o caminho \bar{o} timo de \underline{B} para \underline{C} .

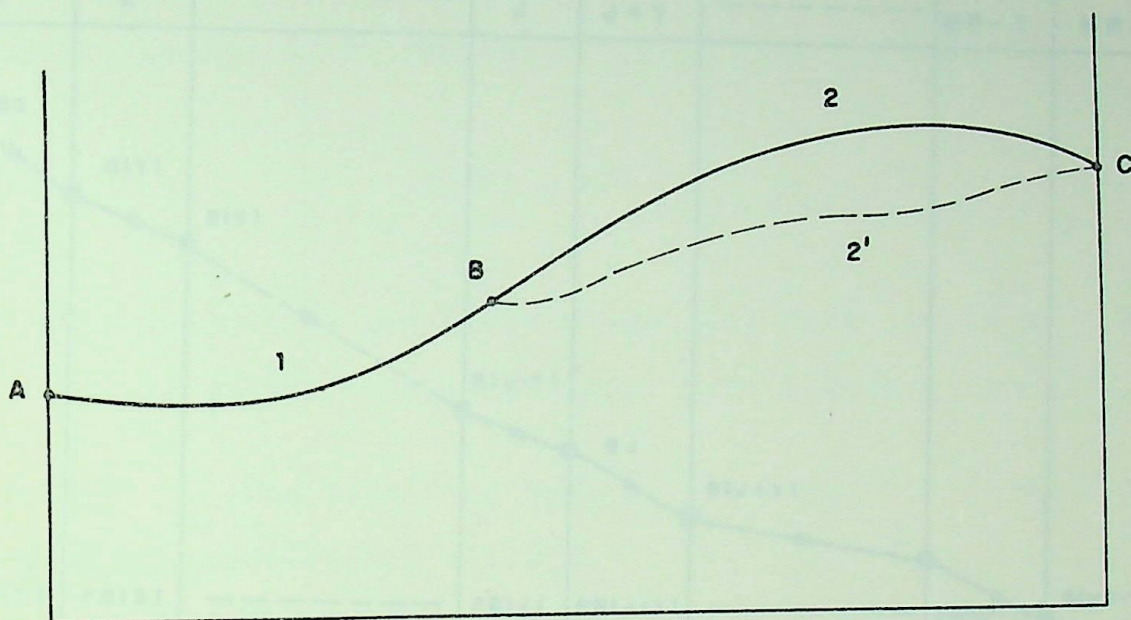


Figura 2 - Ilustração do princípio de otimalidade

O princípio da otimalidade de Bellman pode ser aplicado ao caso do modelo de auto-geração analisado a partir das seguintes considerações:

1. Seja $B(J)$ a quantidade de potência ainda disponível para ser comprada, restante no final do subperíodo J -ésimo (início do $(J+1)$ -ésimo).
2. A quantidade total existente no começo do primeiro subperíodo \bar{e} chamada B_1 , sendo que coincide com o próprio valor de PC_{ot} .

A figura 3 a seguir ilustra a sequência dos subperíodos, assim como a quantidade ainda restante para compra no final de cada um destes subperíodos e, também, as potências compradas em cada um deles.

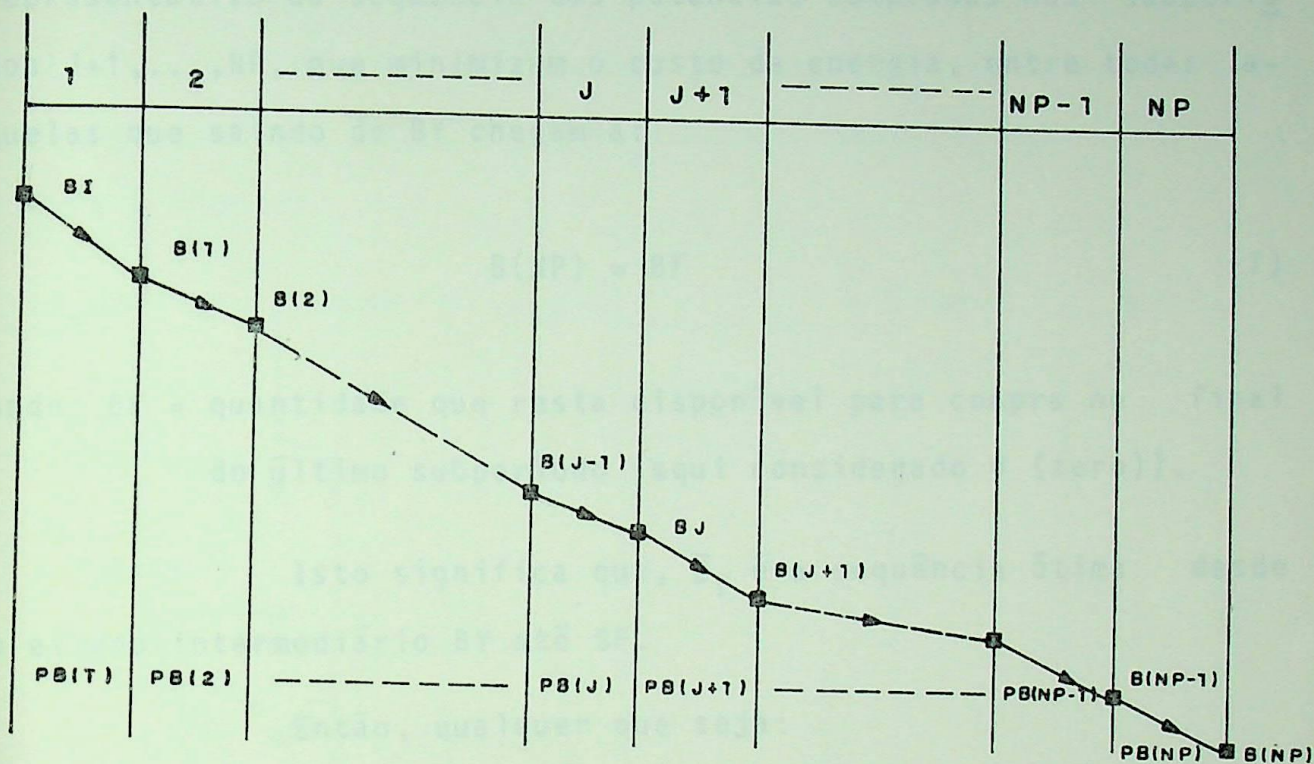


Figura 3 - Ilustração da divisão em subperíodos com a representação da quantidade disponível para ser comprada no final de cada um e potência comprada durante cada subperíodo

onde na figura 3, $P_B(I)$ corresponde à potência a ser comprada por subperíodo.

Considere que:

$$B(J) = BY \quad (5)$$

onde BY é a quantidade de potência ainda disponível para ser comprada no final do subperíodo J (início do $J+1$).

Seja ainda o conjunto:

$$\bar{\beta}_Y = \langle \bar{P}B_Y(J+1), \bar{P}B_Y(J+2), \dots, \bar{P}B_Y(NP) \rangle \quad (6)$$

representativo da sequência das potências compradas nos subperíodos $J+1, \dots, NP$, que minimizam o custo da energia, entre todas aquelas que saindo de BY chegam a:

$$B(NP) = BF \quad (7)$$

onde: BF = quantidade que resta disponível para compra no final do último subperíodo (aqui considerado 0 (zero)).

Isto significa que, $\bar{\beta}_Y$ é a sequência ótima desde o estado intermediário BY até BF .

Então, qualquer que seja:

$$B(J-1) = BX \quad (8)$$

a sequência ótima desde BX no final de $J-1$ até BF no final de NP e, passando por BY , no final de J será:

$$\langle PB_{XY}, \bar{P}B_Y(J+1), \bar{P}B_Y(J+2), \dots, \bar{P}B_Y(NP) \rangle = \langle PB_{XY} \rangle \bar{\beta}_Y \quad (9)$$

onde PB_{XY} é a quantidade comprada no subperíodo J .

De (9) pode-se perceber o sentido do princípio da otimalidade, aplicado ao problema em análise. Poderá desta forma ser formulada uma equação, para a aplicação do método, que será chamada fórmula recursiva da programação dinâmica.

Dado BX no final de $J-1$, a quantidade comprada $\bar{P}B_Y$

que, no final de J , faz parte da sequência ótima desde BX até BF é aquela que minimiza o custo da sequência:

$$\langle PB_{XY} \rangle > \bar{B}_Y \quad (10)$$

O valor \bar{B}_Y deve ser procurado entre todas as quantidades possíveis desde BX . Esse conjunto será chamado $\rho(BX)$. A figura 4 ilustra.

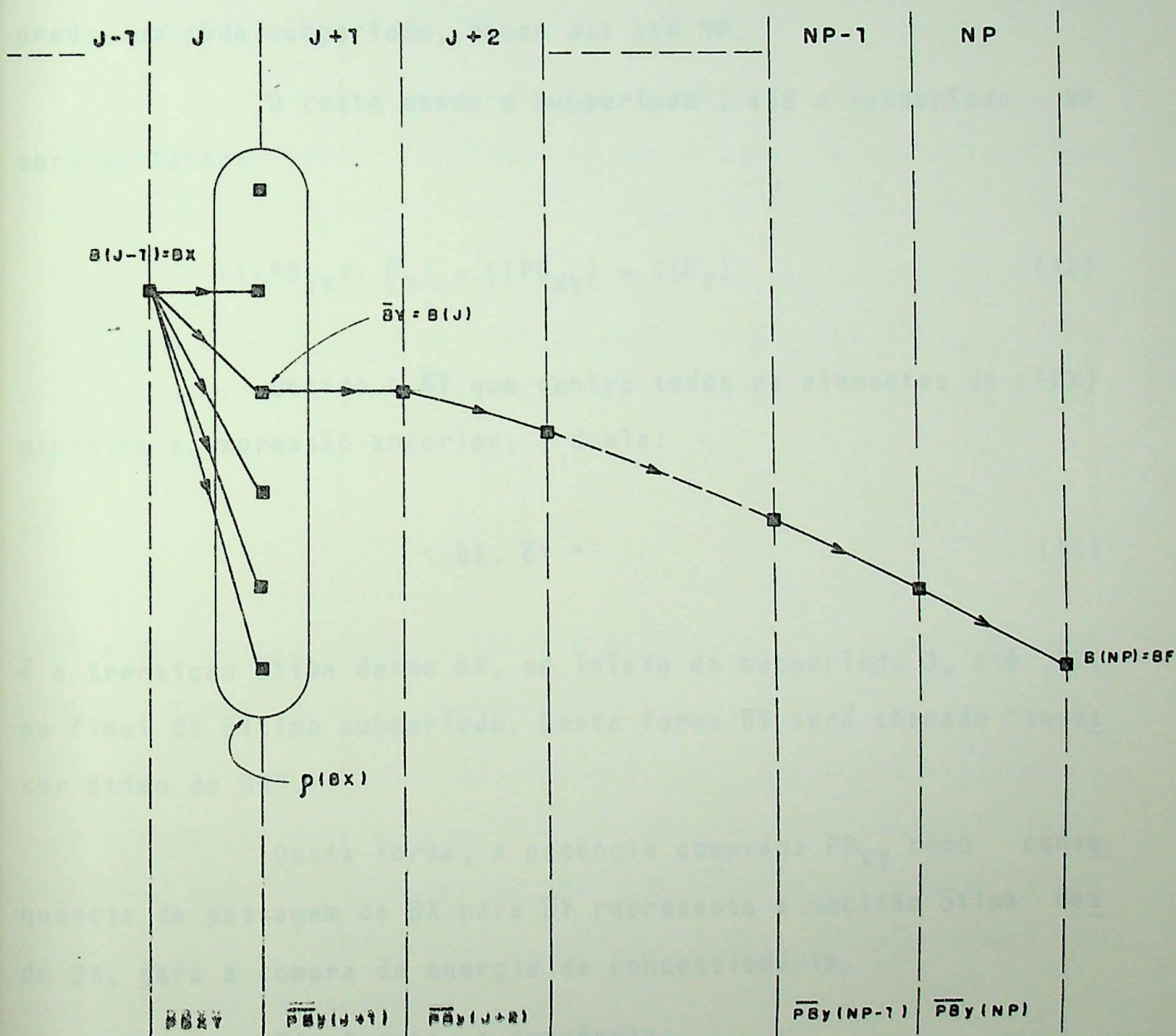


Figura 4 - Ilustração do procedimento para encontrar o valor PB_{xy} e \bar{B}_Y

O custo da sequência ótima é calculado (desde que sejam conhecidos os custos implicados na compra das potências consideradas na sequência $\bar{\beta}_Y$), através de (11):

$$C(\bar{\beta}_Y) = \sum_{I=J+1}^{NP} C(\overline{PB}_Y(I)) \quad (11)$$

Na equação (11) verifica-se que o custo da sequência ótima é a somatória dos custos de cada uma das potências compradas em cada subperíodo, desde J+1 até NP.

O custo desde o subperíodo J até o subperíodo NP será portanto:

$$C(\langle \overline{PB}_{XY} \rangle \bar{\beta}_Y) = C(\overline{PB}_{XY}) + C(\bar{\beta}_Y) \quad (12)$$

Obtido o \bar{BY} que dentre todos os elementos de $\rho(BX)$ minimiza a expressão anterior, a dupla:

$$\langle BX, \bar{BY} \rangle \quad (13)$$

é a transição ótima desde BX, no início do subperíodo J, até BF, no final do último subperíodo. Desta forma \bar{BY} será chamado "sucessor ótimo de BX".

Desta forma, a potência comprada \overline{PB}_{XY} como consequência da passagem de BX para \bar{BY} representa a decisão ótima de BX, para a compra de energia da concessionária.

Finalmente, a sequência:

$$\langle \overline{PB}_{XY}, \overline{PB}_Y(J+1), \dots, PBF \rangle \quad (14)$$

será conhecida como estratégia ótima de controle de compra a partir de uma quantidade disponível BX no início do subperíodo J.

A técnica da programação dinâmica será aplicada através da fórmula recursiva, sendo que sua aplicação será feita de trás para frente, isto é, será utilizada a técnica de "BACKWARD-PROGRAMMING" [4]. A idéia é calcular, no final do subperíodo J, o sucessor ótimo de cada valor B (potência disponível para ser comprada), que é considerada como a existente ao concluir o subperíodo J-1, isto é, início do subperíodo J.

A fim de que isto seja realizado, testam-se todos os valores de potência possíveis de serem compradas no subperíodo, descartando aqueles que produzem um sucessor não possível.

Existe a necessidade de que os valores dos sucessores ótimos (no programa envolvido), sejam guardados, pois estes é que determinarão a estratégia ótima de controle. Para este fim será criada uma matriz (variável indexada):

$$\underline{SOT} (NB, NP) \quad (15)$$

onde a matriz $\underline{SOT}(NB, NP)$ armazena os valores ótimos que sucedem o valor inicial em cada subperíodo.

O primeiro índice, $B=1,2,\dots,NB$, fornece a quantidade disponível para compra. B será declarado com variável inteira e será expresso na forma de uma proporção do valor total disponível (PC_{0t}); o segundo índice, $J=1,2,\dots,NP$, indica o número do subperíodo em consideração.

Para perfeita compreensão da utilidade da matriz $\underline{SOT}(NB, NP)$, é explicado a seguir o que ela conterà em uma dada fa

se de execução do programa desenvolvido. Assim, tem-se que:

$\underline{SOT}(B,J)$ = elemento pertencente a matriz $\underline{SOT}(NB, NP)$ localizado na posição de coordenadas (B,J) que representa o sucessor ótimo de um valor B disponível para compra, existente ao iniciar o subperíodo J . Consequentemente, este elemento apresenta o valor disponível para compra ao finalizar o subperíodo J , nas seguintes condições:

- 1) o valor disponível para compra ao iniciar-se o subperíodo J era igual a B ;
- 2) o valor comprado durante o período é ótimo.

Para calcular o valor dos elementos contidos em $\underline{SOT}(NB, NP)$, precisa-se de informação sobre os custos associados às sequências ótimas parciais que abrangem desde $(J+1)$ até NP . Para armazenar tal informação, será criado um vetor auxiliar $\underline{COPT}(NB)$.

Como é preciso preparar os custos das sequências ótimas parciais de J até NP para seu emprego no próximo passo (é bom ressaltar que o próximo passo será J se o considerado no momento é $J+1$, pois está-se trabalhando com "BACKWARD-PROGRAMMING"), estes últimos custos são colocados em uma variável auxiliar $\underline{COST}(NB)$. Após finalizado o cálculo de uma coluna de \underline{SOT} , o vetor \underline{COPT} copiará o vetor \underline{COST} , destruindo-se a informação das sequências desde $J+1$ até NP no vetor \underline{COPT} , pois estas são, a partir daí, desnecessárias. Evita-se, com isso, um grande consumo de memória de computador.

O cálculo dos sucessores ótimos será realizado por uma parte do programa que será transcrita adiante, para que seja perfeitamente entendida.

Após a execução deste trecho do programa, a matriz de sucessores ótimos SOT (NB, NP) será preenchida com o sucessor ótimo de B no subperíodo J e o vetor COST(B), com o custo da subseqüência ótima desde B no início de J até BF em NP.

O vetor COST será preenchido antes do início da rotina de cálculo de SOT com valores iguais a ∞ (infinito), bem como, após cada transferência deste para o vetor COPT. Este cuidado é tomado em virtude da finalidade do programa ser o cálculo do mínimo custo.

4 - ANÁLISE DO PROGRAMA

A seguir, é transcrito o trecho do programa utilizado para o cálculo de SOT, em cada subperíodo (J). O processo é iniciado pelo último subperíodo.

```

DO 1 B=0,NB
  IF (J.EQ.1) B=NB
  DO 1 PB = 0,B
    BS = B-PB
    PA = PD(J) - PB
    IF(PA.LT.PAGMNT(J).OR.PA.GT.PAGMXT(J))GO TO 1
    CALL DISTB
    CB(PB) = PB + PM
    COMP = CAT + CB)(PB) + COPT(BS)
    IF(COMP.GE.COST(B)) GO TO 1
    COST (B) = COMP
    SOT (B,J) = BS
  CONTINUE
1 CONTINUE

```

onde:

B = quantidade disponível para compra no subperíodo

PB = quantidade comprada no subperíodo

BS = candidato a sucessor ótimo

PA = potência auto-gerada no subperíodo

PD = demanda no subperíodo

PAGMNT = capacidade mínima de auto-geração no subperíodo

PAGMXT = capacidade máxima de auto-geração no subperíodo

CB = custo referente à compra de PB

PM = preço médio do KWh

CAT = custo referente à auto-geração de PA

DISTB = subrotina para distribuição (ótima) de PA entre as máquinas envolvidas

COMP = custo total de geração e compra para a sequência ótima

A execução do programa será analisada a seguir, a través de um exemplo. Será feita uma simulação, passo-a-passo, pa ra que se tenha uma visão nítida do que se pretende com o progra ma.

Será considerado o seguinte modelo simplificado, para utilização do programa, no processo passo a passo:

EXEMPLO

Considere-se uma instalação industrial com capaci dade de auto-geração de energia elétrica, através de uma única má quina operando em paralelo com a concessionária.

O gráfico da figura 5 a seguir representa a curva de carga em um dado período.

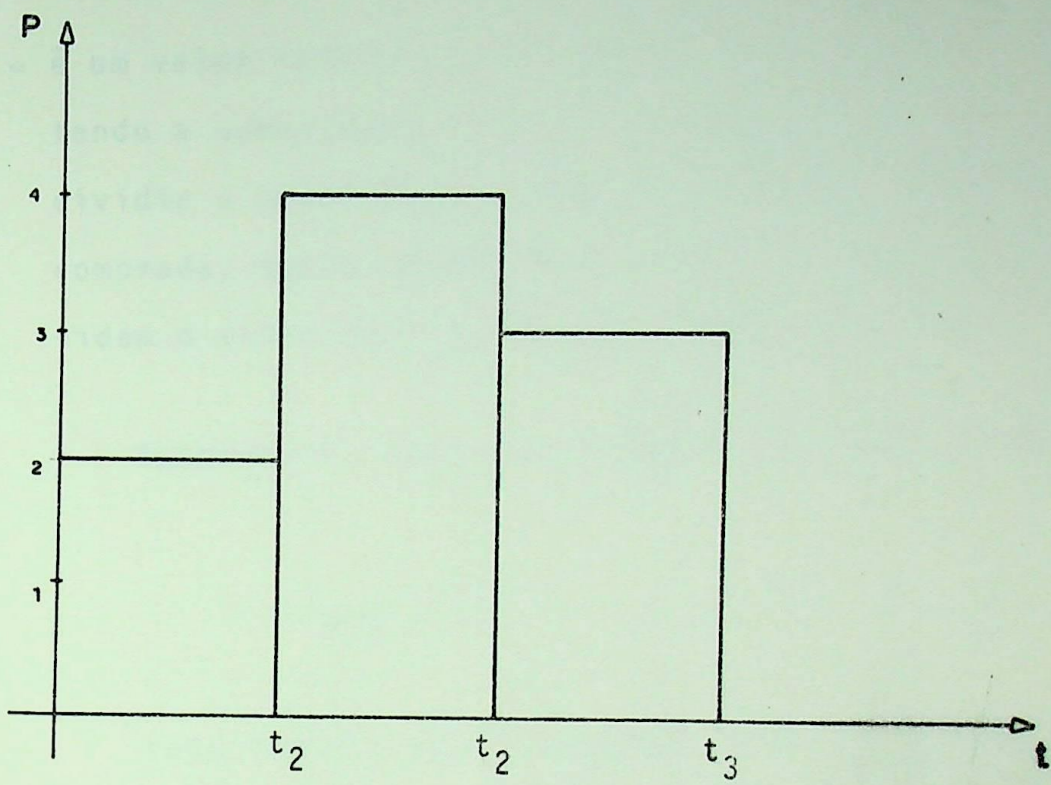


Figura 5 - Curva de carga para aplicação do programa desenvolvido

A curva de carga foi subdividida em 3 subperíodos com demanda constante em cada um deles.

Suponha-se que na primeira parte deste trabalho, levando em conta todas as considerações necessárias, tenha sido encontrado $PC_{ot} = 5$ (unidades de potência).

Será definida uma variável para representar a proporção da quantidade total disponível para compra. Essa variável será definida por:

$$DTB = \frac{PC_{ot}}{NB}$$

onde: $NB = \bar{n}$ é um valor inteiro escolhido arbitrariamente, representando a quantidade de partes iguais em que se deseja dividir a quantidade de potência disponível para ser comprada; desta forma, NB é o número de frações que dividem o valor de PC_{ot} em quantidades iguais.

Supondo-se, para este exemplo em análise, $NB=5$, logo:

$$DTB = 1$$

Isto implica que o programa fará a potência a ser comprada variar de uma em uma unidade, até que o valor ótimo seja encontrado.

As capacidades máxima e mínima de auto-geração por subperíodo ($PAGMXT$ e $PAGMNT$, respectivamente) são as indicadas a seguir.

	PAGMNT		PAGMXT
J = 1	0	J = 1	2
J = 2	0	J = 2	3
J = 3	0	J = 3	1

Por questão de simplicidade será indicado em forma de tabela o custo por quantidade auto-gerada (PA) e comprada (PB). Estes valores normalmente são, na realidade, calculados durante a execução do programa, através das respectivas funções de custo, (CAT e CB). Neste exemplo, estes valores serão tabelados, como a

seguir:

PA	CAT
0	0
1	1
2	5
3	25

PB	CB
0	0
1	1
2	4
3	9
4	16
5	25

A situação inicial das variáveis da matriz SOT e vetores COPT e COST é indicada a seguir.

	SOT			COPT	COST
	J=1	J=2	J=3		
B = 0	0	0	0	0	∞
B = 1	0	0	0	∞	∞
B = 2	0	0	0	∞	∞
B = 3	0	0	0	∞	∞
B = 4	0	0	0	∞	∞
B = 5	0	0	0	∞	∞

onde: SOT (NB, NP) = matriz contendo os sucessores ótimos

COPT (NB) = vetor contendo os custos das sequências ótimas parciais desde (J+1) até NP

COST (NB) = vetor contendo os custos das sequências ótimas parciais desde J até NP

O desenvolvimento passo a passo será então:

PASSO 1: $J = 3$

$$PD(J) = 3$$

$$B = 0$$

$$\underline{PB = 0}$$

$$BS = B - PB = 0 - 0 \Rightarrow BS = 0$$

$$PA = PD(3) - PB \Rightarrow 3 - 0 \Rightarrow PA = 3$$

PA.LT.PAGMNT(3).OR.PA.GT.PAGMXT(3)=3.LT.Ø.OR.3.GT.1? SIM

$$B = 1$$

$$\underline{PB = 0}$$

$$BS = 1$$

$$PA = 3$$

3.LT.Ø.OR.3.GT.1? SIM

$$\underline{PB = 1}$$

$$BS = 0$$

$$PA = 2$$

2.LT.Ø.OR.2.GT.1? SIM.

$$B = 2$$

$$\underline{PB = 0}$$

$$BS = 2$$

$$PA = 3$$

3.LT.Ø.OR.3.GT.1? SIM

$$\underline{PB = 1}$$

$$BS = 1$$

$$PA = 2$$

2.LT.Ø.OR.2.GT.1? SIM

$$\underline{PB = 2}$$

$$BS = 0$$

$$PA = 1$$

2.LT.Ø.OR.1.GT.1? NÃO

CALL DISTB

$$CB(2) = 4$$

$$COMP = 1 + 4 + COPT(0) = 5$$

5.GE.COST(2)? NÃO

$$COST(2) = 5$$

$$SOT(2,3) = 0$$

$$B = 3$$

$$PB = 0$$

$$BS = 3$$

$$PA = 3$$

3.LT.Ø.OR.3.GT.1? SIM

$$PB = 1$$

$$BS = 2$$

$$PA = 2$$

2.LT.Ø.OR.3.GT.T? SIM

$$PB = 2$$

$$BS = 1$$

$$PA = 1$$

1.LT.Ø.OR.1.GT.1? NÃO

CALL DISTB

$$CB(2) = 4$$

$$COMP = 1 + 4 + COPT(1) = \infty$$

∞.GE.COST(3)? SIM

$$PB = 3$$

$$BS = 0$$

$$PA = 0$$

Ø.LT.Ø.OR.Ø.GT.1? NÃO

CALL DISTB

$$CB(3) = 9$$

$$COMP = 0 + 9 + COPT(0) = 9$$

9.GF.COST(3)? NÃO

$$COST(3) = 9$$

$$SOT(3,3) = 0$$

$$B = 4$$

$$PB = 0$$

$$BS = 4$$

$$PA = 3$$

3.LT.Ø.OR.3.GT.1? SIM

$$PB = 1$$

$$BS = 3$$

$$PA = 2$$

2.LT.Ø.OR.2.GT.1? SIM

$$PB = 2$$

$$BS = 2$$

$$PA = 1$$

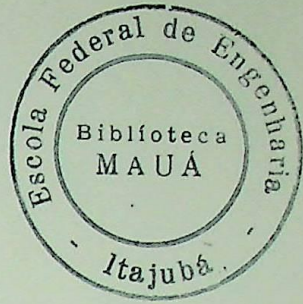
T.LT.Ø.OR.1.GT.1? NÃO

CALL DISTB

$$CB(2) = 4$$

$$COMP = 1 + 4 + COPT(2) = \infty$$

∞.GE.COST(4)? SIM



$$\underline{PB} = 3$$

$$BS = 1$$

$$PA = 0$$

$\emptyset.LT.\emptyset.OR.\emptyset.GT.1?$ NAO

CALL DISTB

$$CB(3) = 9$$

$$COMP = 0+9+COPT(1) = \infty$$

$\infty.GE.COST(4)?$ SIM

$$\underline{PB} = 4$$

$$BS = 0$$

$$PA = -1$$

$-1.LT.\emptyset.OR.-1.GT.1?$ SIM

B = 5

$$\underline{PB} = 0$$

$$BS = 5$$

$$PA = 3$$

$3.LT.\emptyset.OR.3.GT.1?$ SIM

$$\underline{PB} = 1$$

$$BS = 4$$

$$PA = 2$$

$2.LT.\emptyset.OR.2.GT.1?$ SIM

$$\underline{PB} = 2$$

$$BS = 3$$

$$PA = 1$$

$1.LT.\emptyset.OR.1.GT.1?$ NAO

CALL DISTB

$$CB(2) = 4$$

$$\text{COMP} = 1+4+\text{COPT}(3) = \infty$$

∞ .GE.COST(5)? SIM

$$\underline{\text{PB}} = 3$$

$$\text{BS} = 2$$

$$\text{PA} = 0$$

\emptyset .LT. \emptyset .OR. \emptyset .GT.1? NÃO

CALL DISTB

$$\text{CB}(3) = 9$$

$$\text{COMP} = 0+9+\text{COPT}(2) = \infty$$

∞ .GE.COST(5)? SIM

$$\underline{\text{PB}} = 4$$

$$\text{BS} = 1$$

$$\text{PA} = -1$$

-1.LT. \emptyset .OR.-1.GT.1? SIM

$$\underline{\text{PB}} = 5$$

$$\text{BS} = 0$$

$$\text{PA} = -2$$

-2.LT. \emptyset .OR.-2.GT.1? SIM

Situação das variáveis após aplicação da rotina no

subperíodo J=3.

	SOT		
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

	COPT
0	∞
1	∞
2	5
3	9
4	∞
5	∞

	COST
0	∞
1	∞
2	∞
3	∞
4	∞
5	∞

$$PD(2) = 4$$

PASSO 2: $J = 2$

$$B = 0$$

$$PB = 0$$

$$BS = 0$$

$$PA = 4$$

4.LT.Ø.OR.4.GT.3? SIM

$$B = 1$$

$$PB = 0$$

$$BS = 1$$

$$PA = 4$$

4.LT.Ø.OR.4.GT.3? SIM

$$PB = 1$$

$$BS = 0$$

$$PA = 3$$

3.LT.Ø.OR.3.GT.3? NÃO

CALL DISTB

$$CB(1) = 1$$

$$COMP = 25 + 1 + COPT(0) = \infty$$

∞ .GE.COST(1)? SIM

$$B = 2$$

$$PB = 0$$

$$BS = 2$$

$$PA = 4$$

4.LT.∅.OR.4.RT.3? SIM

PB = 1

BS = 1

PA = 3

3.LT.∅.OR.3.GT.3? NAO

CALL DISTB

CB(1) = 1

COMP = 25+1+COPT(1) = ∞

∞.GE.COST(2)? SIM

PB = 2

BS = 0

PA = 2

2.LT.∅.OR.2.GT.3? NAO

CALL DISTB

CB(2) = 4

COMP = 5+4+COPT(0) = ∞

∞.GE.COST(2)? SIM

B = 3

PB = 0

BS = 3

PA = 4

4.LT.∅.OR.4.GT.3? SIM

PB = 1

BS = 2

PA = 3

3.LT.∅.OR.3.GT.3? NAO

CALL DISTB

$$CB(1) = 1$$

$$COMP = 25+1+COPT(2) = 31$$

31.GE.COST(3)? NÄO

$$COST(3) = 31$$

$$SOT(3,2) = 2$$

$$PB = 2$$

$$BS = 1$$

$$PA = 2$$

2.LT.Ø.OR.2.GT.3? NÄO

CALL DISTB

$$CB(2) = 4$$

$$COMP = 5+4+COPT(1) = \infty$$

∞ -GE.COST(3)? SIM

$$PB = 3$$

$$BS = 0$$

$$PA = 1$$

1.LT.Ø.OR.1.GT.3? NÄO

CALL DISTB

$$CB(3) = 9$$

$$COMP = 1+9+COPT(0) = \infty$$

∞ .GE.COST(3)? SIM

$$B = 4$$

$$PB = 0$$

$$BS = 4$$

$$PA = 4$$

4.LT.Ø.OR.4.GT.3? SIM

PB = 1

BS = 3

PA = 3

3.LT.Ø.OR.3.GT.3? NÃO

CALL DISTB

CB(1) = 1

COMP = 25+1+COPT(3) = 35

35.GE.COST(4)? NÃO

COST(4) = 35
SOT(4,2) = 3

PB = 2

BS = 2

PA = 2

2.LT.Ø.OR.2.GT.3? NÃO

CALL DISTB

CB(2) = 4

COMP = 5+4+COPT(2) = 14

14.GE.COST(4)? NÃO

COST(4) = 14
SOT(4,2) = 2

PB = 3

BS = 1

PA = 1

1.LT.Ø.OR.1.GT.3? NÃO

CALL DISTB

CB(3) = 9

COMP = 1+9+COPT(1) = ∞

∞ .GE.COST(4)? SIM

PB = 4

BS = 0

PA = 0

\emptyset .LT. \emptyset .OR. \emptyset .GT.3? NAO

CAL DISTB

CB(4) = 16

COMP = 0+16+COPT(0): = ∞

∞ .GE.COST(4)? SIM

B = 5

PB = 0

BS = 5

PA = 4

4.LT. \emptyset .OR.4.GT.3? SIM

PB = 1

BS = 4

PA = 3

3.LT. \emptyset .OR.3.GT.3? NAO

CALL DISTB

CB(1) = 1

COMP = 25+1+COPT(4) = ∞

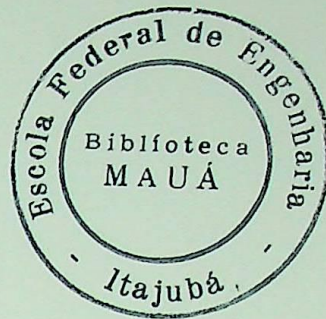
∞ .GE.COST(5)? SIM

PB = 2

BS = 3

PA = 2

2.LT. \emptyset .OR.2.GT.3? NAO



CALL DISTB

CB(2) = 9

COMP = 5+9+COPT(3) = 23

23.GE.COST(5)? NAO

COST(5) = 23
SOT(5,2) = 3

PB = 3

BS = 2

PA = 1

1.LT.Ø.OR.1.GT.3? NAO

CALL DISTB

CB(3) = 9

COMP = 1+9+COPT(2) = 15

15.GE.COST(5)? NAO

COST(5) = 15
SOT(5,2) = 2

PB = 4

BS = 1

PA = 0

Ø.LT.Ø.OR.Ø.GT.3? NAO

CALL DISTB

CB(4) = 16

COMP = 0+16+COPT(1) = ∞

∞.GE.COST(5)? SIM

PB = 5

BS = 0

PA = -1

-1.LT.Ø.OR.-1.GT.3? SIM

Situação das variáveis após aplicação da rotina no subperíodo $J = 2$.

	SOT			COPT	COST
0	0	0	0	∞	∞
1	0	0	0	∞	∞
2	0	0	0	∞	∞
3	0	2	0	31	∞
4	0	2	0	14	∞
5	0	2	0	15	∞

PASSO 3:

$$J = 1$$

$$PD(J) = 2$$

$$B = NB = 5$$

$$PB = 0$$

$$BS = 5$$

$$PA = 2$$

2.LT.Ø.OR.2.GT.2? NÃO

CALL DISTB

$$CB(0) = 0$$

$$COMP = 5+0+COPT(5) = 20$$

20.GE.∞? NÃO

$$COST(5) = 20$$

$$SOT(5,1) = 5$$

$$PB = 1$$

$$BS = 4$$

$$PA = 1$$

1.LT.Ø.OR.1.GT.2? NÃO

CALL DISTB

$$CB(1) = 1$$

$$COMP = 1+1+COPT(4) = 16$$

16.GE.COST(5)? NÃO

$$COST(5) = 16$$

$$SOT(5,1) = 4$$

$$PB = 2$$

$$BS = 3$$

$$PA = 0$$

Ø.LT.Ø.OR.Ø.GT.2? NÃO

CALL DISTB

$$CB(2) = 9$$

$$COMP = 0+9+COPT(3) = 40$$

40.GE.COST(5)? SIM

$$PB = 3$$

$$BS = 2$$

$$PA = -1$$

-1.LT.Ø.OR.-1.GT.2? SIM

$$PB = 4$$

$$BS = 1$$

$$PA = -2$$

-2.LT.Ø.OR.-2.GT.2? SIM

$$PB = 5$$

$$BS = 0$$

$$PA = -3$$

-3.LT.Ø.OR.-3.GT.2? SIM

Situação final das variáveis:

		SOT			
		1	2	3	COPT
0		0	0	0	∞
1		0	0	0	∞
2		0	0	0	∞
3		0	2	0	∞
4		0	2	0	∞
5	BI = 5	4	2	0	16

Depois de executado este trecho do programa, a matriz SOT conterá todos os sucessores ótimos possíveis (para a condição de custo mínimo).

É possível, agora, partindo-se da quantidade de potência disponível para compra (calculada na primeira parte do trabalho) no início do primeiro subperíodo, obter a estratégia ótima de operação.

Do exemplo, tem-se inicialmente $BI = PC_{ot} = 5$. Portanto, deve-se procurar o elemento da matriz SOT correspondente à posição SOT(5,1). Da matriz obtêm-se SOT(5,1)=4. Daí conclue-se que no início do primeiro subperíodo tinha-se disponível 5 (cinco) unidades de potência e, no final deste mesmo subperíodo, tinha-se disponível 4 (quatro) unidades; logo, a quantidade ótima comprada é $PB(1) = 5 - 4 = 1$.

No início do segundo superíodo tem-se $B(1) = 4$; logo, deve-se procurar o elemento SOT(4,2) que nada mais é do que o sucessor ótimo no segundo subperíodo. Tem-se que SOT(4,2) = 2. Portanto a quantidade ótima comprada no segundo subperíodo é $PB(2) = 4 - 2 = 2$.

Seguindo o mesmo raciocínio, tem-se que $SOT(2,3)=0$,
 donde $PB(3) = 2-0 = 2$.

A figura 6 a seguir mostra graficamente a solução procurada.

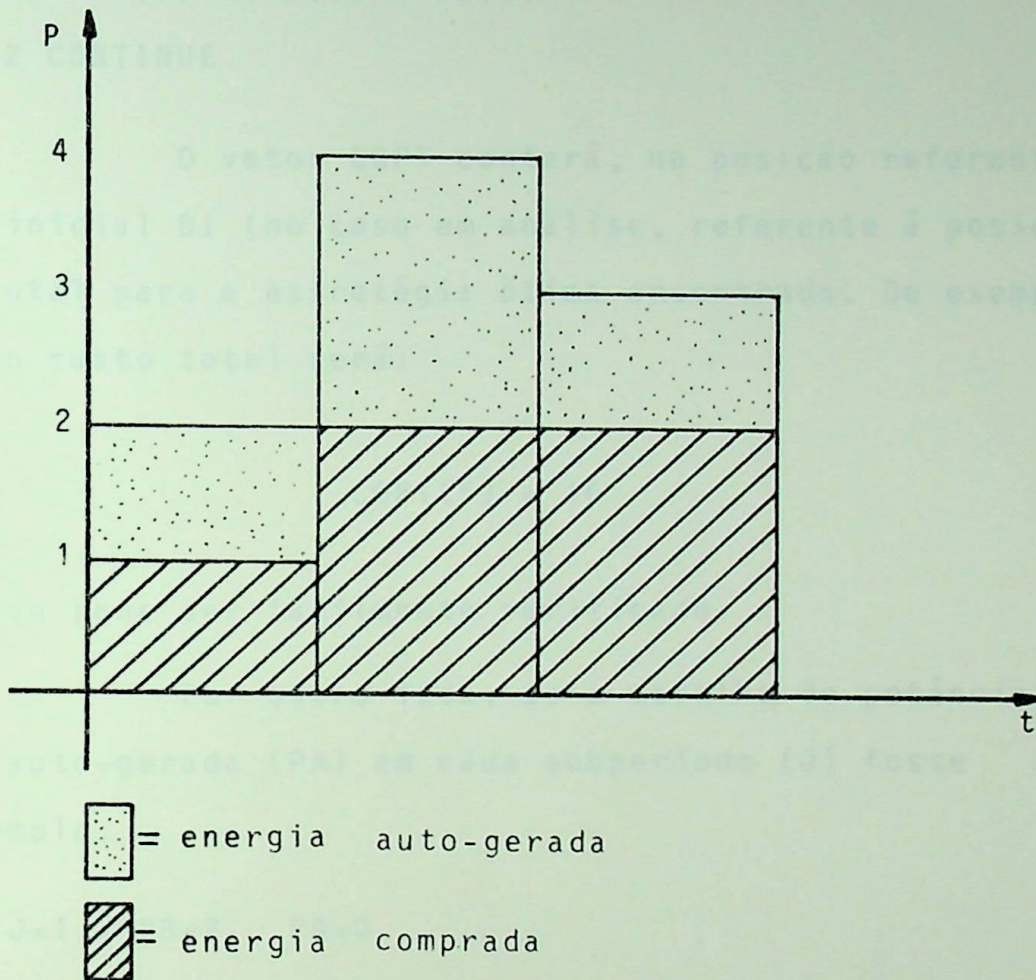


Figura 6 - Solução para o exemplo

Evidentemente, todo o raciocínio anterior para encontrar os valores de potência comprada é efetuado automaticamente pelo programa desenvolvido. O seguinte trecho do programa traz a matriz de sucessores ótimos em termos de potências compradas e auto-geradas ótimas:

$$ESOT(1) = NB$$

DO 2 J = 1, NSP

$$ESOT(J+1) = SOT(ESOT(J), J)$$

$$PB(J) = ESOT(J) - ESOT(J+1)$$

$$PA(J) = PD(J) - PB(J)$$

2 CONTINUE

O vetor COPT conterà, na posição referente à quantidade inicial BI (no caso em análise, referente à posição 5) o custo total para a estratégia ótima encontrada. Do exemplo, tem-se que o custo total será:

$$COPT(5) = 16$$

Valor que pode ser facilmente verificado.

Por outro lado, se a escolha de potência comprada (PB) e auto-gerada (PA) em cada subperíodo (J) fosse aleatória, por exemplo:

$$J=1 \rightarrow PB=2, \quad PA=0$$

$$J=2 \rightarrow PB=1, \quad PA=3$$

$$J=3 \rightarrow PB=2, \quad PA=1$$

O custo total seria para esse período de operação:

$$CUSTO = CB(2) + CAT(0) + CB(1) + CAT(3) + CB(2) + CAT(1)$$

donde das tabelas de custo, tem-se:

$$CUSTO = (4+0) + (1+25) + (4+1)$$

CUSTO = 35

Logo, verifica-se que o custo 35 é maior que o custo ótimo 16, mostrando de forma bastante simples a eficiência do método.

DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA DE CÁLCULO DE CUSTOS

1 - INTRODUÇÃO

Este programa foi desenvolvido para calcular os custos de produção de uma empresa, considerando os custos fixos e variáveis. O objetivo principal é determinar o custo ótimo de produção, que é o ponto em que o custo total é mínimo. Para isso, o programa utiliza o método dos gradientes, que é uma técnica de otimização matemática. O usuário deve fornecer os dados iniciais, como o preço de venda, o custo variável unitário e o custo fixo total. O programa então calcula o custo total em função da quantidade produzida e encontra o ponto de mínimo custo.

O programa é escrito em linguagem de programação e utiliza um algoritmo de busca para encontrar o custo ótimo. A estrutura geral do programa é simples e direta, permitindo que o usuário obtenha rapidamente os resultados desejados. O custo ótimo encontrado é exibido na tela, juntamente com a quantidade correspondente. Além disso, o programa pode gerar um relatório detalhado dos cálculos realizados, incluindo o custo total em função da quantidade produzida. Este relatório pode ser útil para a análise de custos e para a tomada de decisões empresariais.

Em seguida, serão descritos, sempre na forma de diagrama de blocos, as partes do programa consideradas de maior importância, sempre, quando possível, de uma descrição das sub-rotinas utilizadas.

2 - ESTRUTURA GERAL

A apresentação da estrutura geral será feita a seguir.

PARTE III

DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA DIGITAL DESENVOLVIDO

1 - INTRODUÇÃO

Nas duas primeiras partes deste trabalho foram descritas as metodologias de otimização empregadas, com o objetivo de se encontrar um ponto ôtimo de operação, no sentido de obter-se um custo mínimo para uma dada indústrias com disponibilidade de auto-geração.

Nesta parte da dissertação, tenciona-se apresentar uma descrição do programa digital desenvolvido para que os valores ôtimos procurados sejam encontrados. Será mostrado, primeiramente, a estrutura geral do programa, na forma de diagrama de blocos, cuja intenção é a de tornar compreensível o programa, como um todo.

Em seguida, serão mostrados, sempre na forma de diagrama de blocos, as partes do programa consideradas de maior importância, seguida, quando necessário, de uma descrição das subrotinas utilizadas.

2 - ESTRUTURA GERAL

A apresentação da estrutura geral será feita divi

dindo-se o programa em blocos, no sentido de torná-lo o mais didático possível, tomando-se o cuidado para que tal estrutura possa ser percebida dentro do próprio programa.

A sequência natural do programa pode ser representada pelo diagrama de blocos da figura 1. A descrição de cada bloco será apresentada nas seções seguintes.

3 - LEITURA E IMPRESSÃO DOS DADOS

A leitura e impressão dos dados de entrada necessários ao programa será comandada pela subrotina READER. Serão deixados espaços em branco para identificação dos dados, no sentido de facilitar o manuseio dos mesmos.

Os dados de interesse serão impressos logo após a respectiva leitura, sendo que a impressão destes dados também será comandada pela sub-rotina READER.

Os dados de entrada serão divididos em quatro blocos, por mera questão de facilidade de exposição, da seguinte maneira:

BLOCO I - Dados do modelo

Neste bloco serão lidos os dados referentes às características do modelo em análise. Desta forma, deverão ser fornecidos:

- o número de máquinas geradoras;
- o número de saídas de vapor para o processo;

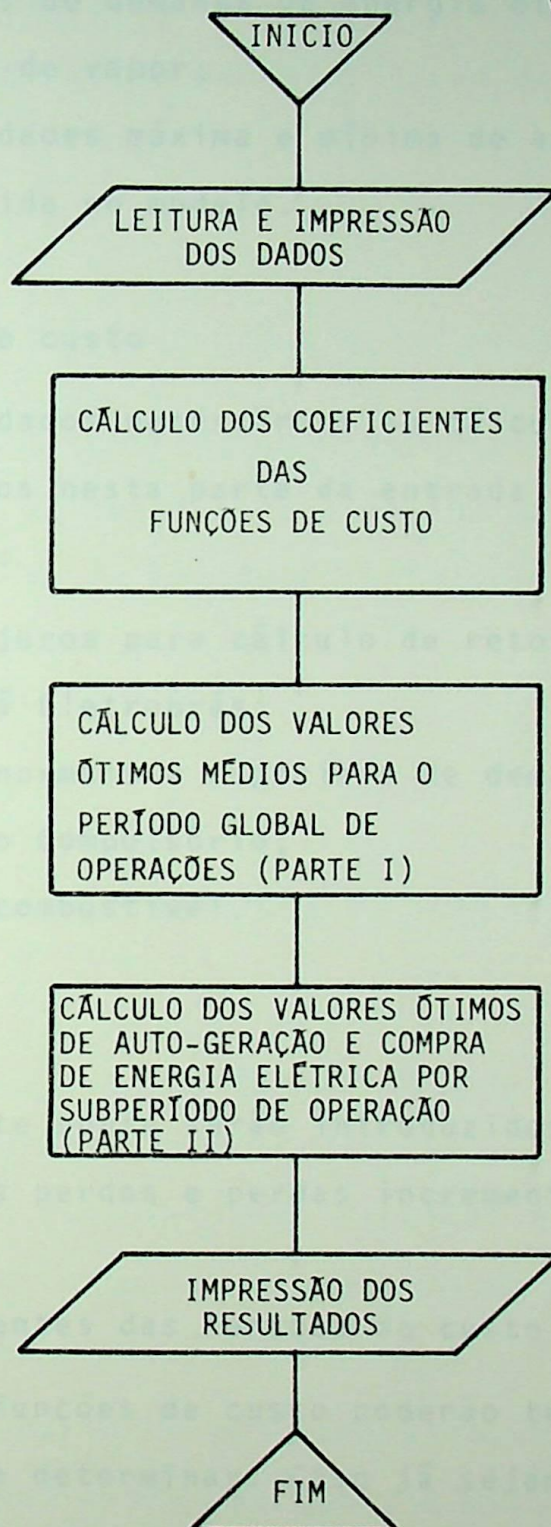


Figura 1 - Diagrama de blocos ilustrativo da estrutura geral do programa desenvolvido

- o tempo de duração do período global;
- o tempo de duração de cada subperíodo;
- os valores de demanda de energia elétrica;
- a demanda de vapor;
- as capacidades máxima e mínima de auto-geração por máquina envolvida no modelo.

BLOCO II - Dados de custo

Os dados necessários ao cálculo de custo da energia serão fornecidos nesta parte da entrada de dados. Tais dados serão os seguintes:

- taxas de juros para cálculo de retorno do Empréstimo Compulsório à Eletrobrás;
- tarifas, normais e especiais de demanda e consumo;
- Empréstimo Compulsório;
- preço do combustível.

BLOCO III - Perdas

Neste ponto serão introduzidos os dados necessários ao cálculo das perdas e perdas incrementais no sistema.

BLOCO IV - Coeficientes das funções de custo

As funções de custo poderão ter os seus coeficientes conhecidos ou a determinar. Caso já sejam conhecidos (dados de fabricante) serão simplesmente lidos diretamente. Caso contrário, serão calculados pela subrotina ESTIMA. Para este cálculo, existe a necessidade de se conhecer valores experimentais de entrada e saída para as unidades em consideração. Neste caso, esses

valores experimentais serão os próprios dados de entrada para a sub-rotina ESTIMA.

O formato de entrada de dados aqui relacionados pode ser visualizada na folha de codificação mostrada no final do trabalho.

4 - CÁLCULO DOS COEFICIENTES DAS FUNÇÕES DE CUSTO

Como mencionado anteriormente, o cálculo dos coeficientes das funções de custo será efetuado através da subrotina ESTIMA, que se utiliza do método dos mínimos quadrados. Tal método está exposto no Apêndice A4.

5 - CÁLCULO DOS VALORES ÓTIMOS MÉDIOS PARA O PERÍODO GLOBAL DE OPERAÇÃO

Este bloco corresponde à sub-rotina ÓTIMO e representa uma parte de grande importância dentro do programa desenvolvido. Corresponde às considerações expostas na PARTE I da dissertação e, em termos do programa desenvolvido, pode-se dizer que este bloco representa a parte 1 do mesmo.

Esta parte do programa desenvolvido procura encontrar os valores ótimos médios de energia elétrica auto-gerada e vapor extraído. O diagrama de blocos da figura 2, a seguir, mostra de uma forma detalhada a sequência de operações realizadas pelo programa para o cálculo dos valores ótimos médios.

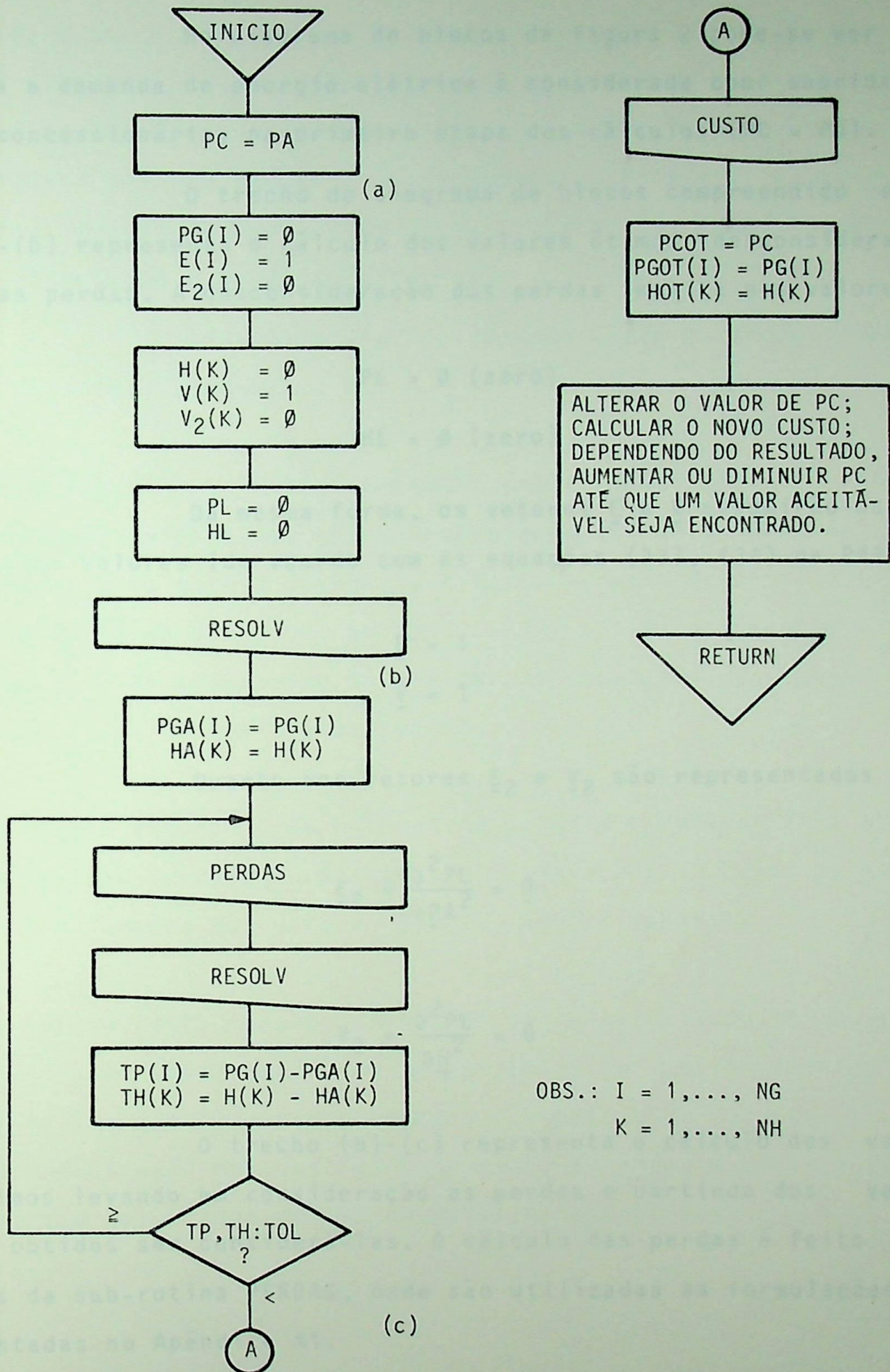


Figura 2 - Diagrama de blocos para o cálculo dos valores ótimos médios para o período global de operação

No diagrama de blocos da figura 2 pode-se ver que toda a demanda de energia elétrica é considerada como suprida pela concessionária, na primeira etapa dos cálculos (PC = PD).

O trecho do diagrama de blocos compreendido entre (a)-(b) representa o cálculo dos valores ótimos desconsiderando-se as perdas. A desconsideração das perdas implica nos valores:

$$PL = \emptyset \text{ (zero)}$$

$$HL = \emptyset \text{ (zero)}$$

Da mesma forma, os vetores \underline{E} e \underline{V} assumirão os seguintes valores (de acordo com as equações (33), (34) da PARTE I):

$$\underline{E} = 1$$

$$\underline{V} = 1$$

Quanto aos vetores \underline{E}_2 e \underline{V}_2 são representados por:

$$\underline{E}_2 = \frac{\partial^2 PL}{\partial PA^2} = 0$$

$$\underline{V}_2 = \frac{\partial^2 PL}{\partial H^2} = 0$$

O trecho (b)-(c) representa o cálculo dos valores ótimos levando em consideração as perdas e partindo dos valores já obtidos sem considerá-las. O cálculo das perdas é feito através da sub-rotina PERDAS, onde são utilizadas as formulações apresentadas no Apêndice A1.

Encontrados os valores ótimos para PC=PD, será cal

culado o custo para esta situação. A partir daí, o valor de PC será alterado por um procedimento de bissecção e novos valores \bar{o} timos para as novas situações serão calculados até que sejam en contrados valores que sejam considerados aceitáveis. A aceitação se faz através de comparação do custo para cada conjunto de valo res \bar{o} timos com o conjunto anterior.

As sub-rotinas envolvidas nesta parte do programa são descritas a seguir.

SUB-ROTINA RESOLV: Esta sub-rotina tem a finalidade de resolver um sistema de equações não-lineares pelo método de Newton-Raphson. A inversão da matriz Jacobiana é feita através de fatoração LU. Nesta parte do programa, em particular, a sub-rotina RESOLV tem o objetivo de solucionar os sistemas de equações não-lineares (22) e (50) dados na PARTE I do trabalho.

SUB-ROTINA PERDAS: Esta sub-rotina calcula as perdas PL e HL as sim como as perdas incrementais $\partial PL/\partial PA$ e $\partial PL/\partial H$ cujos valores se se rão armazenados nos vetores \underline{E} e \underline{V} , respectivamente.

SUB-ROTINA CUSTO: Nesta sub-rotina serão calculados os custos en volvidos na auto-geração de energia elétrica, assim como na extra ca ão de uma dada quantidade de vapor. Todos os elementos necessã rios ao cálculo dos custos, como fator de carga e preço médio do KWh, são calculados dentro da própria sub-rotina.

6 - CÁLCULO DOS VALORES ÓTIMOS DE AUTO-GERAÇÃO E COMPRA DE ENERGIA ELÉTRICA POR SUBPERÍODO DE OPERAÇÃO

Este bloco corresponde a uma parte do programa principal e, juntamente com a parte 1, tem importância fundamental dentro do programa desenvolvido. Da mesma forma que na seção anterior, sob um ponto de vista didático, pode-se dizer que este bloco representa a parte 2 do programa desenvolvido.

O objetivo desta parte do programa é encontrar os valores ótimos de auto-geração e compra de energia elétrica em subperíodos pré-estabelecidos. A solução é obtida por programação dinâmica.

A figura 3, a seguir, apresenta um diagrama de blocos mostrando a sequência de operações para encontrar a solução desejada.

A análise propriamente dita deste trecho do programa desenvolvido está feita na PARTE II da dissertação, apresentando inclusive um exemplo de aplicação.

A sub-rotina de interesse nesta parte do programa está descrita a seguir:

SUB-ROTINA DISTB: Esta sub-rotina tem como finalidade fazer a distribuição de um dado valor de potência a ser auto-gerada entre as máquinas geradoras pertencentes ao sistema de auto-geração. Esta distribuição será feita de modo que as máquinas envolvidas com custo mínimo. Nesta sub-rotina é avaliada também, durante o processo de distribuição, se a capacidade de geração de cada máquina não será violada. Na eventualidade de uma das máquinas

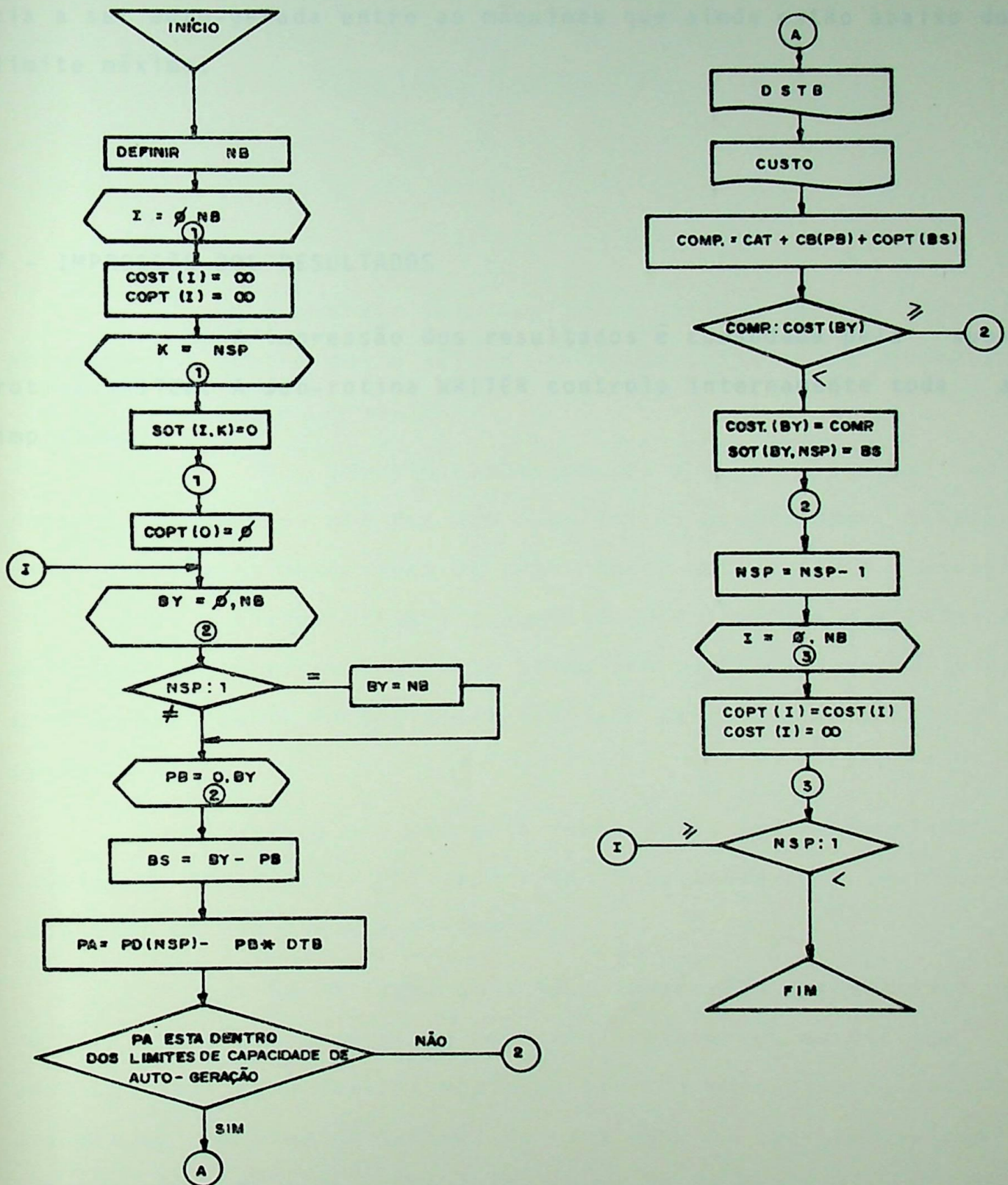


Figura 3 - Diagrama de blocos para o cálculo dos valores ótimos de auto-geração e compra de energia elétrica por subperíodo de operação

gir o limite de sua capacidade de geração, esta deverá operar no seu limite e fazer a distribuição da quantidade restante de potência a ser auto-gerada entre as máquinas que ainda estão abaixo do limite máximo.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

7 - IMPRESSÃO DOS RESULTADOS

A impressão dos resultados é comandada pela sub-rotina WRITER. A sub-rotina WRITER controla internamente toda a impressão.

PARTE IV

RESULTADOS E CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos para os sistemas apresentados mostra que o método utilizado satisfaz aos objetivos que se pretendia no trabalho.

Nos exemplos apresentados a seguir, pode-se verificar os benefícios obtidos com a aplicação do programa desenvolvido, através da observação do custo total obtido com a escolha dos valores arbitrários para a quantidade de energia comprada. As diferenças entre estes e o custo ótimo são bastante significativas, comprovando, desta forma, a eficiência e utilidade do programa desenvolvido.

Para efetuar esta comparação, são apresentadas as tabelas de "Resultados Obtidos" e de "Resultados para Verificação" para cada um dos casos analisados.

Na listagem de saída, também são apresentados, para cada exemplo, os dados de interesse referentes ao sistema em análise, tais como demanda média no período considerado, capacidades máxima e mínima de geração de cada máquina (por subperíodo), demanda média em cada subperíodo, e duração do período.

No Caso Teste 1, foi analisado um sistema industrial com cinco unidades de auto-geração. (A configuração típica

deste caso corresponde a figura 2, Parte I).

A carga da indústria foi estimada em 50 (MW) (demanda média). O sistema de auto-geração, que constitui o caso teste 1, é composto por cinco turbinas a vapor. Os coeficientes das funções quadráticas de custo que as representam estão também apresentados na listagem de saída. As razões para a utilização da formulação quadrática para as funções de custo estão expostas no Apêndice A1, sendo esta formulação a usada na literatura [3], (19] e [20]. Foi considerada ainda a existência de contrato de demanda, sendo o valor contratual considerado igual a 35 (MW).

As tarifas para a energia elétrica comprada e preço do combustível utilizado estão apresentadas na página 2 da listagem de saída.

Pela comparação do custo obtido para o ponto ótimo de operação encontrado com o custo para um ponto de operação arbitrariamente escolhido, pode-se afirmar que, baseado simplesmente na economia obtida em termos monetários, já se justifica a realização do presente estudo. Além disso, outros benefícios indiretos serão conseguidos, pois o consumo será feito de forma mais racional, tanto em termos de compra de energia da concessionária como de gasto com óleo combustível para produção de vapor.

No Caso Teste 2, foi analisado o mesmo sistema industrial estudado no exemplo anterior, variando-se apenas o valor da demanda por subperíodo. Este caso foi introduzido com o objetivo de mostrar a influência da demanda média por subperíodo no ponto ótimo de operação. Em outras palavras, com este exemplo deseja-se mostrar a influência da forma da curva de carga da indústria no ponto ótimo de operação.

Da mesma forma, no Caso Teste 3, foi utilizado o mesmo sistema anterior para mostrar a influência dos limites máximos das máquinas envolvidas no ponto ótimo de operação. A alteração dos limites máximos pode ser obtida pela operação das máquinas com sobrecarga. No caso em análise, tal condição de operação mostrou-se favorável em termos de custo.

O Caso Teste 4 mostra a mesma situação analisada no Caso Teste 1, apresentando como única diferença a variação de NB. A quantidade NB é definida na PARTE II do trabalho como sendo o número de frações iguais em que se deseja dividir a quantidade de potência disponível para ser comprada. Esta divisão é necessária durante a execução do algoritmo de programação dinâmica empregado, para que a quantidade ótima de energia por subperíodo possa ser encontrada. Dos resultados obtidos, conclue-se que o aumento de NB traz, como consequência, maior precisão destes. Por outro lado, este aumento implica em maior esforço computacional para a obtenção do resultado final.

Já o Caso Teste 5 mostra a influência no custo global quando altera-se a demanda contratada da concessionária de 35 MW para 48 MW.

Pode-se dizer que foi alcançado o objetivo principal deste trabalho que era o de obter um algoritmo capaz de encontrar um ponto de operação para o qual o custo do insumo energético fosse mínimo.

Logicamente, este trabalho não esgota o assunto e nem tencionou fazê-lo. Desta forma, estudos futuros podem ser sugeridos no intuito de aperfeiçoar o trabalho aqui apresentado, dentre os quais um estudo para otimizar a própria curva de carga, através de reprogramação de operação das cargas, ou parte delas.

----- CASO TESTE I -----

SISTEMA INDUSTRIAL COM 5 UNIDADES DE AUTOGERACAO

----- CASO TESTE : -----

DURACAO DO PERIODO => 12.0 (HORAS)
 NUMERO DE SUBPERIODOOS => 4
 DEMANDA MEDIA => 50.0 (MW)
 CONSUMO MEDIO DE VAPOR => 18.0 (T)

 T A R I F A S

	TC (CR\$/KWH)	TD (CR\$/KW)	EC (CR\$/MWH)
NORMAL	6.0140	1670.0000	3.0427
ESNG	.7000	.0000	.9362
EGTD	1.5000	.0000	.9362
OLEO COMBUSTIVEL		1071.0000	(CR\$/MBTU)

----- CASO TESTE I -----

DEMANDA	MEDIA	POR	SUBPERIODO
1			40.000
2			65.000
3			50.000
4			45.000

----- CASO TESTE 1 -----

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
1	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000
	MAO 5	.00000	9.00000
2	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000
	MAO 5	.00000	9.00000
3	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000

----- CASO TESTE 1 -----

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
4	MAR 1	.00000	5.00000
	MAR 2	.00000	5.00000
	MAR 3	.00000	11.00000
	MAR 4	.00000	11.00000
	MAR 5	.00000	9.00000

----- CASO TESTE I -----

-----COEFICIENTES DAS FUNCOES DE CUSTO-----

	AP	BP	CP	AP	BP	CP	CH	APH
MHO 1	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	1.10384	.00000
MHO 2	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	1.10384	.00000
MHO 3	.52543	1.43145	1.61312	.52543	1.43145	1.61312	1.61312	.00000
MHO 4	.25844	2.19809	1.13164	.25844	2.19809	1.13164	1.13164	.00000
MHO 5	.18551	1.52062	2.23060	.18551	1.52062	2.23060	2.23060	.00000

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA - EFEI
 OTIMIZACAO DE CONSUMO DE ENERGIA

----- CASO TESTE I -----

RESULTADOS OBTIDOS

SUBPERIODO	POT.COMPRADA	MAG 1	MAG 2	MAG 3	MAG 4	MAG 5
1	.00000	6.00000	6.00000	9.48402	9.48402	9.00000
2	26.23291	6.00000	6.00000	8.86831	8.86831	9.00000
3	7.49512	6.00000	6.00000	10.73491	10.73491	9.00000
4	3.74756	5.57553	5.57553	4.15097	6.94957	9.00000

CUSTO TOTAL => 17122448.00 / 0

----- CASO TESTE 1 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBFERIODO	POT. COMPRADA	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 3	MAQ 4	MAQ 5
1	10.00000	5.25228	5.25228	3.55095	6.54379	9.00000
2	25.00000	6.00000	6.00000	9.48402	9.48402	9.00000
3	15.00000	6.00000	6.00000	6.99960	6.99960	9.00000
4	10.00000	4.01982	4.01982	3.18880	4.99653	9.77726

CUSTO TOTAL => 18246698.00 (09

----- CASO TESTE I -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAO 1	MAO 2	MAO 3	MAO 4	MAO 5
1	10,00000	5,25228	5,25228	3,95095	6,54379	9,00000
2	20,00000	6,00000	6,00000	11,00000	11,00000	9,00000
3	30,00000	3,13000	3,13000	2,63663	3,87932	7,22296
4	10,00000	4,01982	4,01982	3,18880	4,99653	3,77726

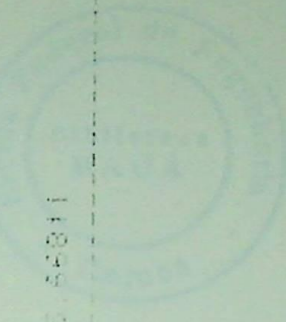
CUSTO TOTAL => 19455756,00 (CR4)

----- CASO TESTE I -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 3	MAQ 4	MAQ 5
1	20.00000	3.13000	3.13000	2.63863	3.87952	7.28296
2	20.00000	6.00000	6.00000	11.00000	11.00000	9.00000
3	20.00000	5.25228	5.25228	3.95095	6.54379	9.00000
4	20.00000	2.24011	2.24011	2.08848	2.76190	5.56811

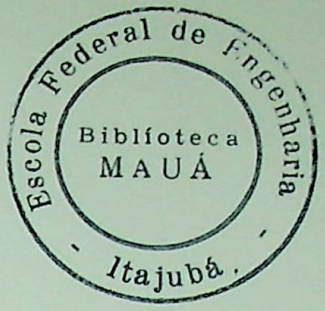
CUSTO TOTAL => 20708229.00 (CR\$)



CALCULO DE CONSUMO DE ENERGIA

----- CASO TESTE 2 -----

SISTEMA INDUSTRIAL COM 5 UNIDADES DE AUTOLICERACAO



----- CASO TESTE 2 -----

DURACAO DO PERIODO => 12.0 (HORAS)
 NUMERO DE SUBPERIODOOS => 4
 DEMANDA MEDIA => 50.0 (MW)
 CONSUMO MEDIO DE VAPOR => 18.0 (T)

----- T A R I F A S -----

	TC (CR\$/KUH)	TD (CR\$/KW)	EC (CR\$/KUH)
NORMAL	6.0140	1672.0000	3.0427
ESNG	.7000	.0000	.9362
EGTD	1.5300	.0000	.9362
OLEO COMBUSTIVEL		1071.0000	(CR\$/NETU)

----- CASO TESTE 2 -----

DEMANDA	MEDIA	POR	SUPERIODO
-----	-----	-----	DEMANDA (MU) -----
1			45.000
2			60.000
3			50.000
4			45.000

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
1	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000
	MAO 5	.00000	9.00000
2	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000
	MAO 5	.00000	9.00000
3	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000

----- CASO TESTE 2 -----

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
4	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000
	MAO 5	.00000	9.00000

----- CASO TESTE 2 -----

-----COEFICIENTES DAS FUNCOES DE CUSTO-----

	RP	DP	CP	AH	DH	CH	APH
MAO 1	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
MAO 2	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
MAO 3	.52543	1.43145	1.61312	.52543	1.43145	1.61312	.00000
MAO 4	.25844	2.19809	1.13164	.25844	2.19809	1.13164	.00000
MAO 5	.18551	1.52062	2.23060	.18551	1.52062	2.23060	.00000

----- CASO TESTE 2 -----

RESULTADOS OBTIDOS

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAR 1	MAR 2	MAR 3	MAR 4	MAR 5
1	3,74756	6,00000	6,00000	10,10979	10,10979	9,00000
2	10,73779	6,00000	6,00000	10,11466	10,11466	9,00000
3	11,24268	6,00000	6,00000	8,86345	8,86345	9,00000
4	3,74756	6,00000	6,00000	10,10979	10,10979	9,00000

CUSTO TOTAL => 17114852,00 CC

----- CASO TESTE 2 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADO	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 3	MAQ 4	MAQ 5
1	10.00000	6.00000	6.00000	6.99960	6.99960	9.00000
2	35.00000	4.01982	4.01982	3.18380	4.99853	9.77726
3	15.00000	6.00000	6.00000	6.99960	6.99960	9.00000
4	10.00000	6.00000	6.00000	6.99960	6.99960	9.00000

CUSTO TOTAL => 20017672.00 (CP)

----- CASO TESTE 2 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPADA	MAR 1	MAR 2	MAR 3	MAR 4	MAR 5
1	10.00000	6.00000	6.00000	6.99960	6.99960	9.00000
2	20.00000	6.00000	6.00000	9.48402	9.48402	9.00000
3	30.00000	3.13000	3.13000	2.63863	3.87932	7.22296
4	10.00000	6.00000	6.00000	6.99960	6.99960	9.00000

CUSTO TOTAL => 20257636.00 (CRF)

----- CASO TESTE 2 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POJ. COMPRADA	MAG 1	MAG 2	MAG 3	MAG 4	MAG 5
1	20.00000	4.01992	4.01992	3.18980	4.99653	9.77726
2	20.00000	6.00000	6.00000	9.48402	9.48402	9.00000
3	20.00000	5.25228	5.25228	3.95095	6.54379	9.00000
4	20.00000	4.01992	4.01992	3.18980	4.99653	9.77726

CUSTO TOTAL => 21233680.00

----- CASO TESTE 3 -----

SISTEMA INDUSTRIAL COM 5 UNIDADES DE AUTOGERAÇÃO



----- CASO TESTE 3 -----

DURACAO DO PERIODO => 12.0 (HORAS)
 NUMERO DE SUBPERIODOOS => 4
 DEMANDA MEDIA => 50.0 (MW)
 CONSUMO MEDIO DE VAPOR => 18.0 (T)

 T A R I F A S

	TC (CR\$/KWH)	TD (CR\$/KW)	EC (CR\$/KWH)
NORMAL	6.0140	1672.0000	3.0427
ESNG	.7000	.0000	.9362
EGTO	1.5300	.0000	.9362
OLEO COMBUSTIVEL		1071.0000	(CR\$/MBTU)

----- CASO TESTE 3 -----

DEMANDA	MEDIA	POR	SUBPERIODO	DEMANDA (HW)
1				40.000
2				65.000
3				50.000
4				45.000

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

PERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
1	MAO 1	.00000	7.00000
	MAO 2	.00000	7.00000
	MAO 3	.00000	13.00000
	MAO 4	.00000	13.00000
	MAO 5	.00000	10.00000
2	MAO 1	.00000	7.00000
	MAO 2	.00000	7.00000
	MAO 3	.00000	13.00000
	MAO 4	.00000	12.00000
	MAO 5	.00000	10.00000
3	MAO 1	.00000	7.00000
	MAO 2	.00000	7.00000
	MAO 3	.00000	13.00000
	MAO 4	.00000	13.00000

----- CASO TESTE 3 -----

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
4	MAR 1	.00000	7.00000
	MAR 2	.00000	7.00000
	MAR 3	.00000	13.00000
	MAR 4	.00000	13.00000
	MAR 5	.00000	10.00000

----- CASO TESTE 3 -----

-----COEFICIENTES DAS FUNCOES DE CUSTO-----

	HP	DP	CP	PH	DH	CH	APH
MH0 1	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
MH0 2	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
MH0 3	.52543	1.43145	1.61312	.52543	1.43145	1.61312	.00000
MH0 4	.25844	2.19809	1.13164	.25844	2.19809	1.13164	.00000
MH0 5	.18551	1.52062	2.23060	.18551	1.52062	2.23060	.00000

----- CASO TESTE 3 -----

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	RESULTADOS OBTIDOS				
		MAR 1	MAR 2	MAR 3	MAR 4	MAR 5
1	.00000	7.00000	7.00000	8.01151	8.01151	10.00000
2	26.23291	7.00000	7.00000	7.39789	7.39789	10.00000
3	7.49512	7.00000	7.00000	9.24051	9.24051	10.00000
4	3.74756	5.31848	5.31848	3.99189	6.62683	10.00000

CUSTO TOTAL => 15775344.00

----- CASO TESTE 3 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAG 1	MAG 2	MAG 3	MAG 4	MAG 5
1	10.00000	4.99511	4.99511	3.79252	6.22220	10.00000
2	25.00000	7.00000	7.00000	9.01151	8.01151	10.00000
3	15.00000	6.28540	6.28540	4.58994	7.84052	10.00000
4	10.00000	4.01992	4.01992	3.18880	4.99653	6.77726

CUSTO TOTAL => 18084644.00 (CR\$)

----- CASO TESTE 3 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 3	MAQ 4	MAQ 5
1	10,00000	4,99611	4,99611	3,79252	6,23220	10,00000
2	20,00000	7,00000	7,00000	10,48614	10,48614	10,00000
3	30,00000	3,13000	3,13000	2,63663	3,87952	7,22296
4	10,00000	4,01982	4,01982	3,16680	4,99653	8,77726

CUSTO TOTAL => 1954412,00

----- CASO TESTE 3 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 3	MAQ 4	MAQ 5
1	20.00000	3.13000	3.13000	2.63663	3.87932	7.22296
2	20.00000	7.00000	7.00000	10.49614	10.49614	10.00000
3	20.00000	4.99611	4.99611	3.79252	6.22220	10.00000
4	20.00000	2.24011	2.24011	2.08848	2.76190	5.60911

CUSTO TOTAL =>

20875998,00

DEPARTAMENTO DE PERÍCIA
NÚMERO 16.400/2004
DEPARTAMENTO DE PERÍCIA
COMISSÃO DE PERÍCIA DE VÍCIOS

SISTEMA INDUSTRIAL COM 5 UNIDADES DE AUTOLIBERAÇÃO

----- CASO TESTE 4 -----

DURACAO DO PERIODO => 12.0 (HORAS)
 NUMERO DE SUPERIOIOS => 4
 DEMANDA MEDIA => 50.0 (MW)
 CONSUMO MEDIO DE VAPOR => 18.0 (T)

----- T A R I F A S -----

	TC (CR\$/KWH)	TD (CR\$/KW)	EC (CR\$/KWH)
NORMAL	6.0140	1672.0000	3.0427
ESNG	.7000	.0000	.9362
ESTD	1.5300	.0000	.9362
OLEO COMBUSTIVEL		1071.0000	(CR\$/HBTU)

----- CASO TESTE 4 -----

DEMANDA	MEDIA	POR	SUBPERIODO
SUBPERIODO			DEMANDA (MM)
1			40.000
2			65.000
3			50.000
4			45.000

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

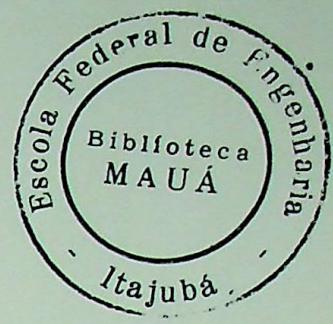
SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
1	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000
	MAO 5	.00000	9.00000
2	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000
	MAO 5	.00000	9.00000
3	MAO 1	.00000	6.00000
	MAO 2	.00000	6.00000
	MAO 3	.00000	11.00000
	MAO 4	.00000	11.00000

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MAG)	MAX (MAG)
4	MAG 1	.00000	6.000
	MAG 2	.00000	6.000
	MAG 3	.00000	11.000
	MAG 4	.00000	11.000
	MAG 5	.00000	9.000

--- COEFICIENTES DAS FUNCOES DE CUSTO ---

	AP	DP	CP	AH	DH	CH	APH
MAO 1	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
MAO 2	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
MAO 3	.52543	1.43145	1.61312	.52543	1.43145	1.61312	.00000
MAO 4	.25644	2.19809	1.13164	.25644	2.19809	1.13164	.00000
MAO 5	.18551	1.52062	2.23060	.18551	1.52062	2.23060	.00000



----- CASO TESTE 4 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAR 1	MAR 2	MAR 3	MAR 4	MAR 5
1	10,00000	5,25228	5,25228	3,95095	6,54379	9,00000
2	25,00000	6,00000	6,00000	9,48402	9,48402	9,00000
3	15,00000	6,00000	6,00000	6,99960	6,99960	9,00000
4	10,00000	4,01982	4,01982	3,18880	4,99653	9,77726

CUSTO TOTAL => 18246688,00

----- CASO TESTE 4 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAO 1	MAO 2	MAO 3	MAO 4	MAO 5
1	10.00000	5.25228	5.25228	3.95095	6.54379	9.00000
2	20.00000	6.00000	6.00000	11.00000	11.00000	9.00000
3	30.00000	3.13000	3.13000	2.63663	3.87932	7.20296
4	10.00000	4.01932	4.01932	3.13880	4.99653	6.77726

CUSTO TOTAL => 19455756,00

----- CASO TESTE 4 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 3	MAQ 4	MAQ 5
1	20.00000	3.13000	3.13000	2.63663	3.87932	7.32296
2	20.00000	6.00000	6.00000	11.00000	11.00000	9.00000
3	20.00000	5.25228	5.25228	3.95095	6.54379	9.00000
4	20.00000	2.24011	2.24011	2.98848	2.76190	5.65811

CUSTO TOTAL => 20765228,00 (CR\$)

----- CASO TESTE 5 -----

SISTEMA INDUSTRIAL CON 5 UNIDADES DE AUTOGERACION

----- CASO TESTE 5 -----

DURACAO DO PERIODO => 12.0 (HORAS)
 NUMERO DE SUBPERIODOOS => 4
 DEMANDA MEDIA => 50.0 (MW)
 CONSUMO MEDIO DE VAPORES => 18.0 (T)

----- T A R I F A S -----

	TC (CR\$/KWH)	TD (CR\$/KN)	EC (CR\$/HWH)
NORMAL	6.0140	1672.0000	3.0427
ESNG	.7000	.0000	.9362
EGTD	1.5300	.0000	.9362
OLEO COMBUSTIVEL		1071.0000	(CR\$/HSTU)

----- CASO TESTE 5 -----

DEMANDA	MEDIA	POR	SUBPERICUDO
----- SUBPEIRODO -----	-----	-----	DEMANDA (MU) -----
1			40.000
2			65.000
3			50.000
4			45.000

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
MAO 1	.00000	6.00000
MAO 2	.00000	6.00000
MAO 3	.00000	11.00000
MAO 4	.00000	11.00000
MAO 5	.00000	9.00000

MAO 1	.00000	6.00000
MAO 2	.00000	6.00000
MAO 3	.00000	11.00000
MAO 4	.00000	11.00000
MAO 5	.00000	9.00000

MAO 1	.00000	6.00000
MAO 2	.00000	6.00000
MAO 3	.00000	11.00000
MAO 4	.00000	11.00000
MAO 5	.00000	9.00000

----- CASO TESTE 5 -----

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)	MAX (MW)
4	MAG 1	.00000	6.00000
	MAG 2	.00000	6.00000
	MAG 3	.00000	11.00000
	MAG 4	.00000	11.00000
	MAG 5	.00000	9.00000

-----COEFICIENTES DAS FUNCOES DE CUSTO-----

	AP	DP	CP	PH	DH	CH	APH
MAO 1	,32466	2,17150	1,10384	,32466	2,17150	1,10384	,00000
MAO 2	,32466	2,17150	1,10384	,32466	2,17150	1,10384	,00000
MAO 3	,52543	1,43145	1,61312	,52543	1,43145	1,61312	,00000
MAO 4	,25844	2,19809	1,13164	,25844	2,19809	1,13164	,00000
MAO 5	,18551	1,52062	2,23060	,18551	1,52062	2,23060	,00000

LIMITES DA AUTOGERACAO POR SUBPERIODO

SUBPERIODO	UNIDADES GERADORAS	MIN (MW)
1	MAG 1	.00000
	MAG 2	.00000
	MAG 3	.00000
	MAG 4	.00000
	MAG 5	.00000
2	MAG 1	.00000
	MAG 2	.00000
	MAG 3	.00000
	MAG 4	.00000
	MAG 5	.00000
3	MAG 1	.00000
	MAG 2	.00000

-----COEFICIENTES DAS FUNCOES DE CUSTO-----

	AP	DP	CP	AP	DH	CH	APH
MAQ 1	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
MAQ 2	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
MAQ 3	.52543	1.43145	1.61312	.52543	1.43145	1.61312	.00000
MAQ 4	.25844	2.19809	1.13164	.25844	2.19809	1.13164	.00000
MAQ 5	.18551	1.52062	2.23060	.18551	1.52062	2.23060	.00000

----- CASO TESTE 5 -----

RESULTADOS OBTIDOS

SUBPERIODO	POT. COMPRADA	MAR 1	MAR 2	MAR 3	MAR 4	MAR 5
1	0,00000	6,00000	6,00000	9,48402	9,48402	9,00000
2	26,24146	6,00000	6,00000	8,86406	8,86406	8,00000
3	7,49756	6,00000	6,00000	10,73370	10,73370	9,00000
4	3,74878	6,00000	6,00000	6,37773	6,37773	5,00000

CUSTO TOTAL => 18551260.

----- CASO TESTE 5 -----

RESULTADOS PARA VERIFICAÇÃO

SUPERIORDO	POT. COMPRADA	MAO 1	MAO 2	MAO 3	MAO 4	MAO 5
1	10.00000	5.25228	5.25228	3.95095	6.54579	9.00000
2	25.00000	6.00000	6.00000	9.48402	9.48402	9.00000
3	15.00000	6.00000	6.00000	6.99960	6.99960	9.00000
4	10.00000	4.60459	4.60459	3.55040	5.73069	9.00000

CUSTO TOTAL => 20690760.0

----- CASO TESTE 5 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUPERIODO	POT. COMPRADA	MAG 1	MAG 2	MAG 3	MAG 4	MAG 5
1	10.00000	5.25228	5.25228	3.95035	6.54379	9.00000
2	20.00000	6.00000	6.00000	11.00000	11.00000	9.00000
3	30.00000	3.13000	3.13000	2.63863	3.87932	7.22296
4	10.00000	4.60459	4.60459	3.55040	5.73069	9.00000

CUSTO TOTAL => 22284688.00

----- CASO TESTE 5 -----

RESULTADOS PARA VERIFICACAO

SUPERIODO	POT. COMPRADA	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 3	MAQ 4	MAQ 5
1	20,00000	3,13000	3,13000	2,63863	3,87932	7,02296
2	20,00000	6,00000	6,00000	11,00000	11,00000	9,00000
3	20,00000	5,25228	5,25228	3,95095	6,54379	9,00000
4	20,00000	2,68268	2,68268	2,36208	3,31764	6,44144

CUSTO TOTAL => 23956048,00



APÊNDICE A1

DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE CONSUMO

1 - INTRODUÇÃO

A precisão dos parâmetros usados para o modelo a dotado em uma estratégia ótima de operação de qualquer sistema é de fundamental importância.

Neste Apêndice serão apresentados os métodos pos síveis de serem utilizados para a obtenção dos elementos necessã rios para a determinação dos coeficientes das equações de con que foram utilizadas na Parte I deste trabalho.

O objetivo deste Apêndice é mostrar como os coefi cientes das equações de consumo podem ser determinados através do conhecimento dos dados obtidos do próprio modelo.

2 - TESTE DE PERFORMANCE

As equações de consumo apresentadas neste traba lho pretendem refletir o comportamento em relação ao consumo de combustível do modelo em análise. Tais equações são transcritas a seguir:

$$P_T = A_P P_A^2 + D_P P_A + C_{P0} \quad (1)$$

$$P_2 = A_{HB} H_B^2 + D_{HB} H_B + C_{HBO}$$

$$P_3 = A_{HS} H_S^2 + D_{HS} H_S + C_{HSO} \quad (3)$$

$$P_4 = P_A A_{PAB} H_B + P_A A_{PHS} H_S + H_B A_{HBS} H_S \quad (4)$$

Para a determinação dos coeficientes das equações (1) a (4) pode-se utilizar os testes de performance que consistem na realização de ensaios no sistema real, durante os quais registram-se as entradas de combustível e as saídas de potência no sistema.

O processo mais simples de efetuar as medições seria, sem dúvida alguma, através do registro de entrada de combustível e saída de potência para cada uma das equações isoladamente. Assim, por exemplo, para a equação (1) seriam registradas as potências de entrada (advindas do combustível) necessárias em vários níveis de geração de potência elétrica. Todavia, para que fosse estabelecida uma relação direta entre a potência advinda do combustível, necessária para a geração de potência elétrica em um certo nível, as outras saídas deveriam ser anuladas. Isto é, para que os resultados fossem realmente representativas teria que ser possível a geração de potência elétrica pelo sistema, com a anulação da extração de vapor e vapor de contrapressão. Como na prática estes ensaios não são possíveis de serem realizados, conclue-se pela impossibilidade de determinação dos coeficientes em cada equação isoladamente.

No entanto, sabe-se que o consumo global de combustível é dado por:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (5)$$

e substituindo-se as equações anteriores (1) a (4) em (5) tem-se:

$$P = A_P P_A^2 + D_P P_A + C_{PO} + A_{HB} H_B^2 + D_{HB} H_B + C_{HBO} + A_{HS} H_S^2 + D_{HS} H_S + \\ + C_{HSO} + P_A A_{PHB} H_B + P_A A_{PHS} H_S + H_B A_{HBS} H_S \quad (6)$$

A determinação dos coeficientes de (6) podem agora ser determinados da seguinte forma:

Durante um ensaio a potência necessária global do combustível (P) pode ser facilmente registrado. Da mesma forma as saídas (P_A , H_B , H_S) podem ser também registrados.

Assim, através de ensaios em vários níveis de entrada, pode-se registrar as potências de entrada advindas do combustível e as potências elétrica e térmica na saída.

Para o modelo em análise, existem doze coeficientes a determinar; logo, o ideal seriam doze ensaios em vários níveis diferentes, o que daria origem a um sistema de equações cuja solução seria a determinação de tais coeficientes.

Vários métodos existem para a determinação de coeficientes de funções baseados em dados experimentais. O método utilizado neste trabalho foi o dos mínimos quadrados (vide Apêndice A4).

Certamente, a precisão obtida para os resultados será dependente do número de ensaios realizados, bem como das condições para as quais eles foram realizados.

3 - DETERMINAÇÃO A PARTIR DE REGISTROS DE OPERAÇÃO

A determinação dos coeficientes das equações (4) pode ser feita através de registros das variáveis de interesse durante o período normal de operação.

A vantagem deste procedimento sobre o anterior é que não existe a necessidade de serem realizados ensaios, pois tais ensaios nem sempre podem ser facilmente executados.

O registro das variáveis de interesse durante o período normal de operação, para utilização na determinação dos coeficientes das equações de consumo, deve ser feito tomando-se cuidado especial com a aferição dos equipamentos de medição. Também deve ser assegurado que os registros das variáveis sejam feitos todos no mesmo instante, evitando-se ao máximo as imprecisões dos resultados.

Por outro lado, as oscilações no sistema de medição devem ser evitadas ou através de amortecedores de oscilações, ou efetuando-se a integração do sinal que se deseja medir, tomando-se, neste caso, o valor médio durante um certo período.

4 - CONVEXIDADE

Convém definir, ainda nesta seção, uma propriedade de grande importância para a metodologia de otimização utilizada; tal propriedade é conhecida como a convexidade.

Uma curva de entrada-saída é convexa em um intervalo, por exemplo, desde S_{\min} até S_{\max} , como mostrado na figura 1.

se, e somente se, dois pontos arbitrários, S_1 e S_2 , podem ser escolhidos em qualquer parte do intervalo, S_{\min} até S_{\max} , tais que a interpolação por linha reta entre o ponto S_1 e o ponto S_2 nunca passará abaixo da curva de entrada-saída. Assim, uma linha reta da função entrada-saída será uma forma limitante da curva convexa.

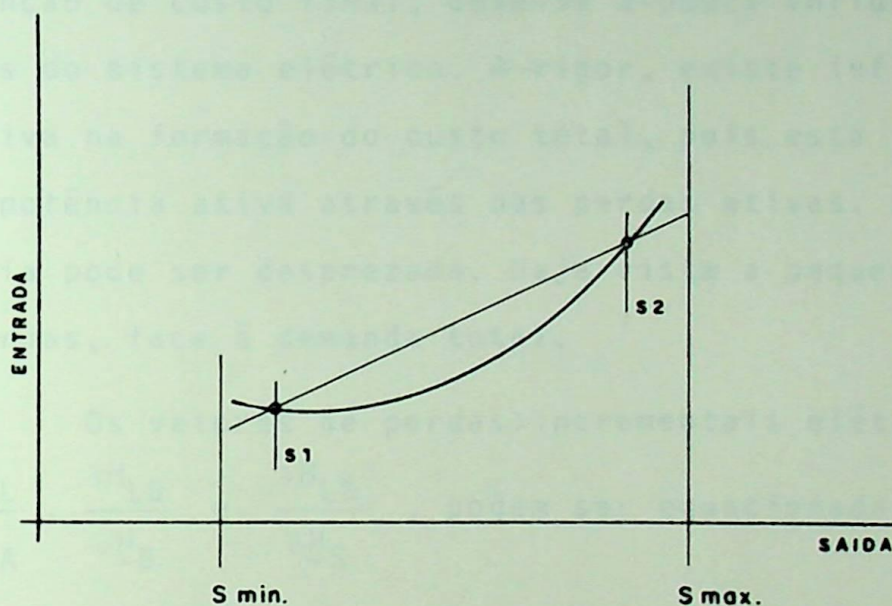


Figura 1 - Ilustração de uma função convexa

As funções de custo consideradas anteriormente, pela definição de convexidade apresentada, são, claramente convexas.

5 - CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PERDAS

Uma consideração que ficou implícita, na formulação utilizada, foi o fato de o consumo total de combustível ser

uma função apenas das potências ativas geradas em cada unidade. De fato, dentro do espírito prático a que se propõe este texto, a maior influência nos custos das unidades geradoras cabe à potência ativa gerada, pois o aumento destas é provocado pelo aumento das conjugados das máquinas motrizes (de uma forma geral instalações de contrapressão) e isto está condicionado ao aumento de consumo de combustível. O fato de ter sido desprezado o efeito da potência reativa na função de custo final, deve-se à pouca influência desta, nas perdas do sistema elétrico. A rigor, existe influência da potência reativa na formação do custo total, pois esta influencia o balanço de potência ativa através das perdas ativas. No entanto, esta influência pode ser desprezada. Haja vista a pequena percentagem dessas perdas, face à demanda total.

Os vetores de perdas incrementais elétricas e entalpicas, $\frac{\partial P_L}{\partial P_A}$, $\frac{\partial H_{LB}}{\partial H_B}$ e $\frac{\partial H_{LS}}{\partial H_S}$, podem ser equacionadas da seguinte forma:

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_A} = 2 \cdot \underline{R} \cdot \underline{P}_A \quad (5)$$

$$\frac{\partial H_{LB}}{\partial H_B} = 2 \cdot \underline{R}_{HB} \cdot \underline{H}_B \quad (6)$$

$$\frac{\partial H_{LS}}{\partial H_S} = 2 \cdot \underline{R}_{HS} \cdot \underline{H}_S \quad (7)$$

onde: \underline{R} = matriz cujos elementos representam as resistências elétricas no sistema de transmissão de energia elétrica.

\underline{R}_{HB} = matriz cujos elementos representam as resistências ao fluxo de vapor no sistema de distribuição de vapor no nível de pressão inferior.

\underline{R}_{HS} = matriz cujos elementos representam as resistências ao fluxo de vapor no sistema de distribuição de vapor no nível de pressão superior.

Embora de forma simplificada, estas equações proporcionam resultados bastante razoáveis.

Quanto às perdas, a formulação usada pode ser escrita como a seguir:

$$P_L = \underline{P}'_{CA} \cdot \underline{R}_G \cdot \underline{P}_{CA} \quad (8)$$

$$H_{LB} = \underline{H}'_B \cdot \underline{R}_{HB} \cdot \underline{H}_B \quad (9)$$

$$H_{LS} = \underline{H}'_S \cdot \underline{R}_{HS} \cdot \underline{H}_S \quad (10)$$

onde:

$$\underline{P}_{CA} = \begin{bmatrix} P_A \\ \text{-----} \\ P_C \end{bmatrix}$$

\underline{R}_G = matriz cujos elementos representam as resistências elétricas no sistema de transmissão de energia elétrica.

A matriz \underline{R}_G contém também a resistência relacionada com as perdas devidas à potência elétrica comprada.

APÊNDICE A2

O MÉTODO DOS MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

1 - INTRODUÇÃO

Nesta seção pretende-se mostrar a formulação geral do método dos Multiplicadores de Lagrange. Este método é extensamente utilizado para os estudos de despacho econômico nos Sistemas Elétricos de Potência e é reconhecidamente eficiente.

A apresentação será feita de forma simples mas com cuidado de não se deixar perder os conceitos relacionados ao método. A apresentação será feita, também, utilizando-se os aspectos físicos inerentes a este trabalho.

2 - O MÉTODO DOS MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

O custo individual de produção c_i , de uma unidade i , será considerado, para efeitos práticos, função apenas da quantidade produzida e pode-se, desta forma, escrever:

$$c_i = c_i(x_i) \quad (1)$$

onde: c_i = custo de produção da unidade i

x_i = quantidade produzida pela unidade i

Para o modelo em análise, no presente trabalho, as quantidades produzidas x_i são a potência auto-gerada e a quantidade de vapor liberada para o processo.

Para o custo global de produção, pode-se então escrever:

$$C = \sum_{i=1}^n c_i(x_i) = c_1(x_1) + c_2(x_2) + \dots + c_n(x_n) \quad (2)$$

onde: C = custo global de produção

n = nº de funções de custo envolvidas

Desta forma, encontrar o mínimo custo global de produção é o mesmo que encontrar o conjunto de variáveis x_i que minimizam a função de custo considerada na equação (2). Claramente, a escolha do conjunto de variáveis x_i não pode ser arbitrário, pois este conjunto deverá cumprir certas restrições, impostas pelos aspectos físicos do problema.

Neste trabalho, as restrições que deverão ser cumpridas pelo conjunto de variáveis x_i são as restrições de demanda, isto é, as cargas, juntamente com as consequentes perdas, deverão ser atendidas totalmente pelas quantidades produzidas x_i . No caso em análise, as cargas representam a quantidade de calor necessária ao processo e a potência elétrica instalada.

Para uma boa visualização do problema [2], a figura 1 ilustra graficamente um caso elementar de minimização restrita para um sistema com apenas uma unidade de auto-geração. Tal sistema foi escolhido, propositalmente, simples, para se poder entender facilmente o aspecto geométrico do problema.

A função de custo global C será então dada por:

$$C(PA, H) = C = C_1(PA) + C_2(H) \quad (2)$$

onde: PA = potência elétrica gerada

H = entalpia do vapor

O conjunto de restrições será, por simplicidade, representado pela função:

$$g(PA, H) = g = 0 \quad (4)$$

onde: g = conjunto de restrições

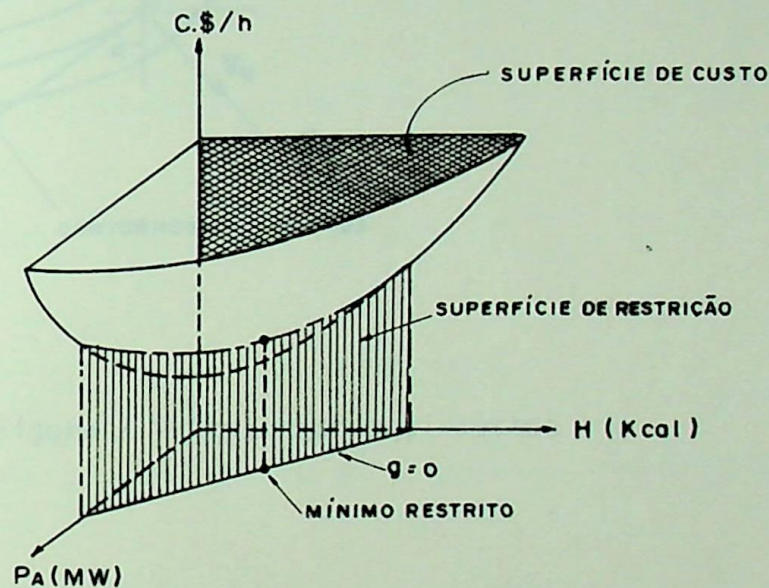


Figura 1 - Superfície de custo

Pela figura 1 pode-se ver claramente que o mínimo custo de operação é obtido para $PA=H=0$. O sistema não pode, no entanto, funcionar nesse ponto, uma vez que ele deve satisfazer a equação de restrição (4), que está representada na figura 1 pela superfície de restrição. O problema então será determinar um ponto na superfície de custo que forneça o mínimo custo, com a condição de que tal ponto também pertença à superfície de restrição (figura 1) [2]. Assim, deve-se procurar o ponto de operação mais econômico ao longo da intersecção da superfície de custo com a superfície de restrição. Tal ponto é caracterizado pelo paralelismo

dos gradientes ([8], [18]) das duas superfícies em análise.

A figura 2 a seguir mostra a superfície de custo da figura 1 cortada por um plano horizontal. As intersecções obtidas são os contornos equi-custos [2], ao longo dos quais o custo C é constante.

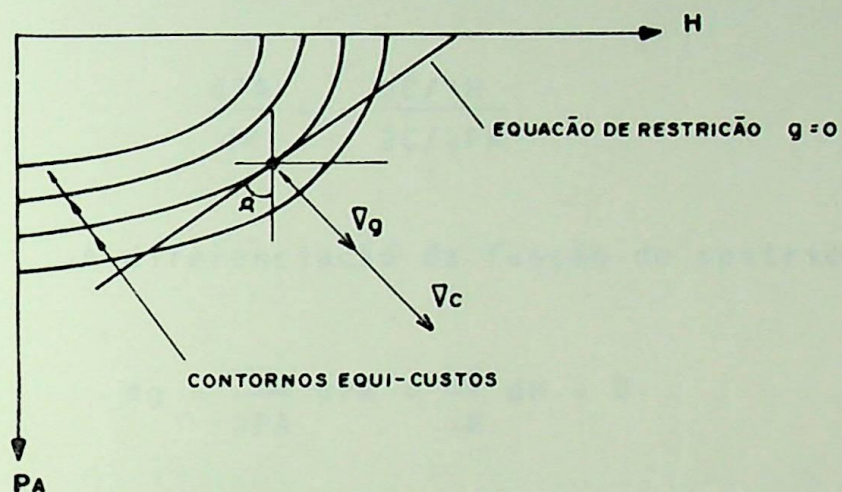


Figura 2 - Contornos equi-custos

onde: ∇g = gradiente da função de restrição

∇C = gradiente da função de custo

A condição de paralelismo dos gradientes das duas superfícies no ponto mínimo implica em que a linha de restrição, $g(PA, H) = 0$, seja tangente aos contornos de custo, neste ponto de mínimo custo de operação.

Utilizando-se destas considerações, determina-se, pela diferenciação das funções de custo e de restrição, as inclinações do contorno de custo e da linha de restrição, respectivamente.

Obtêm-se desta forma:

$$dC = \frac{\partial C}{\partial PA} dPA + \frac{\partial C}{\partial H} dH = 0 \quad (5)$$

onde: dC = diferencial total de $C(PA, H) = \text{const.}$

Para a inclinação do contorno de custo tem-se:

$$\frac{dPA}{dH} = - \frac{\partial C / \partial H}{\partial C / \partial PA} \quad (6)$$

A diferenciação da função de restrição fornece:

$$dg = \frac{\partial g}{\partial PA} dPA + \frac{\partial g}{\partial H} dH = 0 \quad (7)$$

onde: dg = diferencial total de $g(PA, H) = 0$

Para a inclinação da linha de restrição tem-se:

$$\frac{dPA}{dH} = - \frac{\partial g / \partial H}{\partial g / \partial PA} \quad (8)$$

Da condição de paralelismo dos gradientes, obtem-se:

$$\frac{\partial C / \partial PA}{\partial C / \partial H} = \frac{\partial g / \partial PA}{\partial g / \partial H} = - \text{tg } \alpha \quad (9)$$

onde: α = ângulo definido na figura (2).

Pode-se então escrever:

$$\frac{\partial C / \partial PA}{\partial g / \partial PA} = \frac{\partial C / \partial H}{\partial g / \partial H} = \text{constante} \triangleq \lambda \quad (10)$$

A constante λ é chamada de multiplicador de Lagrange.

As equações (10) podem ser escritas como:

$$\frac{\partial C}{\partial PA} - \lambda \frac{\partial g}{\partial PA} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial C}{\partial H} - \lambda \frac{\partial g}{\partial H} = 0$$

ou ainda:

$$\nabla C - \lambda \nabla g = 0 \quad (12)$$

$$\nabla (C - \lambda g) = 0 \quad (13)$$

Da equação (13) pode-se definir uma função de mínimo restrito, conhecida por função Lagrangeano. Desta se obtêm-se:

$$f \triangleq C - \lambda g = C(PA, H) - \lambda [g(PA, H)] \quad (14)$$

onde: f = função Lagrangeano

Conclue-se, portanto, que o mínimo restrito de função de custo $C = C(PA, H)$ corresponde ao mínimo absoluto da função Lagrangeano, dada pela equação (14). Desta forma, tem-se para condição de ponto de mínimo custo de operação para o problema em análise:

$$\frac{\partial f}{\partial PA} = 0 \quad (15)$$
$$\frac{\partial f}{\partial H} = 0$$

Um fato interessante ocorre ao ser observada a análise feita anteriormente, sob o ponto de vista físico. Para que esta análise seja feita, considere-se que as funções de custo e de restrição sejam como as dadas a seguir:

$$C = C_{PA} + C_H \quad (16)$$

onde: $C_{PA} = C_{PA}(PA)$ = função de custo da potência gerada

$C_H = C_H(H)$ = função de custo da quantidade de vapor extraída da turbina

$$g = PA + H - PD - HD = 0 \quad (17)$$

onde: PD = demanda elétrica

HD = demanda de vapor

Calculando-se as derivadas parciais de (16) e (17) obtêm-se:

$$\frac{\partial g}{\partial PA} = \frac{\partial g}{\partial H} = 1 \quad (18)$$

$$\frac{\partial C}{\partial PA} = \frac{\partial C_{PA}}{\partial PA} \quad (19)$$

$$\frac{\partial C}{\partial H} = \frac{\partial C_H}{\partial H}$$

Onde os termos do segundo membro de (19) serão conhecidos como custos incrementais de produção.

Considerando-se as equações (18) e (19), as equações (11) tornam-se:

$$\frac{\partial C_{PA}}{\partial PA} = \lambda \quad (20)$$

$$\frac{\partial C_H}{\partial H} = \lambda$$

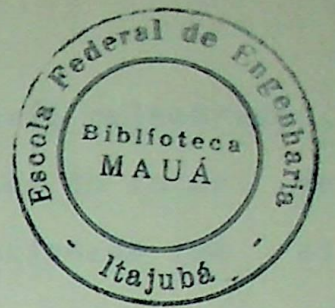
Donde se conclue que:

$$\frac{\partial C_{PA}}{\partial PA} = \frac{\partial C_H}{\partial H} = \lambda \quad (21)$$

A equação (21) traduz o conceito básico da opera
ção econômica [3], isto é, para que um ponto de operação ót
imo se
ja estabelecido, ou seja, para que seja encontrado o ponto de mí
nimo custo, os custos incrementais de produção deverão ser iguais.

Das equações (20) pode-se também concluir que o
multiplicador de Lagrange representa o custo incremental de produ
ção. Uma outra interpretação para o multiplicador de Lagrange é a
de que ele representa a medida de sensibilidade do valor ót
imo à
mudança nas restrições [18], interpretação esta que pode ser cla
ramente percebida pela análise da equação (9) anterior.

APÊNDICE A3



O CUSTO DA ENERGIA COMPRADA

1 - INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um dos fatores de grande importância na avaliação do progresso e desenvolvimento de qualquer nação industrializada.

A crescente participação da energia elétrica como insumo de produção, ou seja, por constituir-se de forma cada vez mais significativa como um elemento de composição do custo de produção e levando-se em consideração o competitivo mundo industrial, deve-se dispensar atenção especial no controle do seu consumo, de forma que este seja feito o mais racionalmente possível. A legislação em vigor no Brasil ([13], [14], [15]) preocupa-se com esse aspecto, pois incentiva o consumo nacional através de tarifas diferenciadas e, em contrapartida, penaliza a má utilização da mesma.

Portanto, para que a utilização da energia seja a mais racional, conseqüentemente minimizando as despesas, certos procedimentos deverão ser adotados. Um dos critérios empregados neste trabalho para se minimizar o custo da energia consumida é o de se utilizar ao máximo os benefícios que a legislação em vigor possibilita.

Para um melhor entendimento da forma de se conse

guir tais benefícios, alguns conceitos básicos serão relembrados, conceitos estes que estão relacionados com o estudo do fator de carga, que de uma forma ou outra está sempre relacionado com as reduções possíveis de tarifas.

2 - CONCEITOS BÁSICOS

Os conceitos necessários para um perfeito entendimento da terminologia técnica diretamente relacionada ao estudo do fator de carga são apresentados a seguir [10]:

- a) ENERGIA ATIVA: é a quantidade de energia elétrica ativa utilizada durante qualquer período de tempo, expressa em quilowatt-hora (KWh). Na conta de energia elétrica, a energia ativa aparece sob a denominação de consumo em KWh.

- b) DEMANDA: é a potência média, durante qualquer intervalo de tempo, medida por aparelho integrador (medidor). É a média das potências solicitadas pelo consumidor, durante um intervalo de tempo, usualmente 15 minutos, registrada por medidores de demanda. Na conta de energia elétrica a demanda aparece expressa em KW.

- b1) DEMANDA MÉDIA: é a relação entre a quantidade de energia elétrica consumida durante um período de tempo qualquer e o número de horas do mesmo período, ou seja, é a quantidade de energia consumida em um período de tempo considerada dividida por esse mesmo período de tempo.

b2) DEMANDA MÁXIMA MEDIDA: é a maior demanda verificada por medição em qualquer intervalo, de 15 minutos, durante o período de faturamento. É utilizada para determinar o fator de carga, na avaliação do aproveitamento de energia elétrica consumida.

b3) DEMANDA FATURADA: é a demanda considerada para efeito de faturamento. É utilizada para determinar o fator de carga para os cálculos do preço médio do KWh consumido.

3 - TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA

As tarifas de energia elétrica são regulamentadas pelos Decretos nº 41.019 de 26.02.57, e nº 62.724 de 17.05.68 [15], sendo determinadas e autorizadas pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE).

É fácil de ser compreendido que o serviço de fornecimento de energia elétrica tem características próprias que o distinguem de qualquer outro tipo de empreendimento. Certas peculiaridades, tais como o fato de a energia ser produzida e consumida simultaneamente; o funcionamento contínuo das usinas geradoras tendo em vista o perfeito atendimento das cargas por elas alimentadas, levando em consideração a variedade de tipos de cargas e diferenças nas solicitações dos consumidores, tornam as empresas concessionárias extraordinárias tanto sob o aspecto financeiro, quanto sob o aspecto de operação.

O sistema de fixação de tarifas, como não poderia deixar de ser, leva em consideração todas essas particularidades

de tal forma que a tarifa possa cobrir exatamente o custo real dos serviços, compreendendo tanto a remuneração de capital e reposição de equipamentos, quanto as despesas de operação e manutenção.

Para efeito de fixação de tarifas de fornecimento, os diversos tipos de consumidores são agrupados da seguinte forma [16]:

I) GRUPO A - para fornecimento de energia elétrica a consumidores ligados em tensão igual ou superior a 2.300 volts, tendo as seguintes sub-divisões:

I.1) Subgrupo A1: 230 (KV) ou mais;

I.2) Subgrupo A2: 138 a 88 (KV);

I.3) Subgrupo A3: 69 a 20 (KV);

I.4) Subgrupo A4: 13,8 a 2,3 (KV);

I.5) Subgrupo A5: subterrâneo.

II) GRUPO B - para fornecimento de energia elétrica a consumidores ligados em tensão inferior a 2.300 volts.

II.1) Subgrupo B1: residencial;

II.2) Subgrupo B2: rural;

II.3) Subgrupo B3: nem residencial, nem rural;

II.4) Subgrupo B4: iluminação pública.

Quanto às tarifas propriamente ditas, existem três tipos:

T1) TARIFA DE DEMANDA: é o valor, em cruzeiros, de venda de 1(um) KW de potência demandada, que dá o direito à sua utilização

pelo período de 1 (um) mês.

T2) TARIFA DE CONSUMO: é o valor, em cruzeiros, da venda de 1(um) KWh de energia consumida.

T3) TARIFA BINÔMIA: é a composição das tarifas de demanda e consumo. O fato da tarifa binômica ser dividida em duas partes, uma referente à parcela de demanda (objetivando a cobertura dos custos fixos) e outra referente à parcela de consumo (objetivando a cobertura de custos variáveis), permite ao consumidor atuar separadamente sobre as parcelas de consumo e de demanda no sentido de obtenção de melhores preços, em função da utilização mais racional, para o mesmo nível de produção.

A necessidade de uma tarifa especial para a demanda é justificada especialmente pelo fato de que a capacidade de atendimento da concessionária estar limitada à sua potência instalada e, sendo assim, uma parcela desta potência deverá ser reservada pela concessionária para ficar à disposição do consumidor durante 24 horas por dia. Essa fração corresponde à sua parcela de participação do sistema elétrico da concessionária, conforme mostrado na figura 1.

Para efeito de faturamento denomina-se de Demanda Faturada, de acordo com o disposto no artigo 12 do Decreto nº 62.724, de 17.05.68, alterado pelo Decreto nº 75.887, de 20.06.75 (exceto para consumidores rurais e sazonais) o maior valor entre:

D1) A máxima demanda verificada por medição, em qualquer intervalo de 15 minutos, durante o período de faturamento;

D2) 85% da maior demanda verificada em quaisquer dos 11 meses anteriores ao da medição;

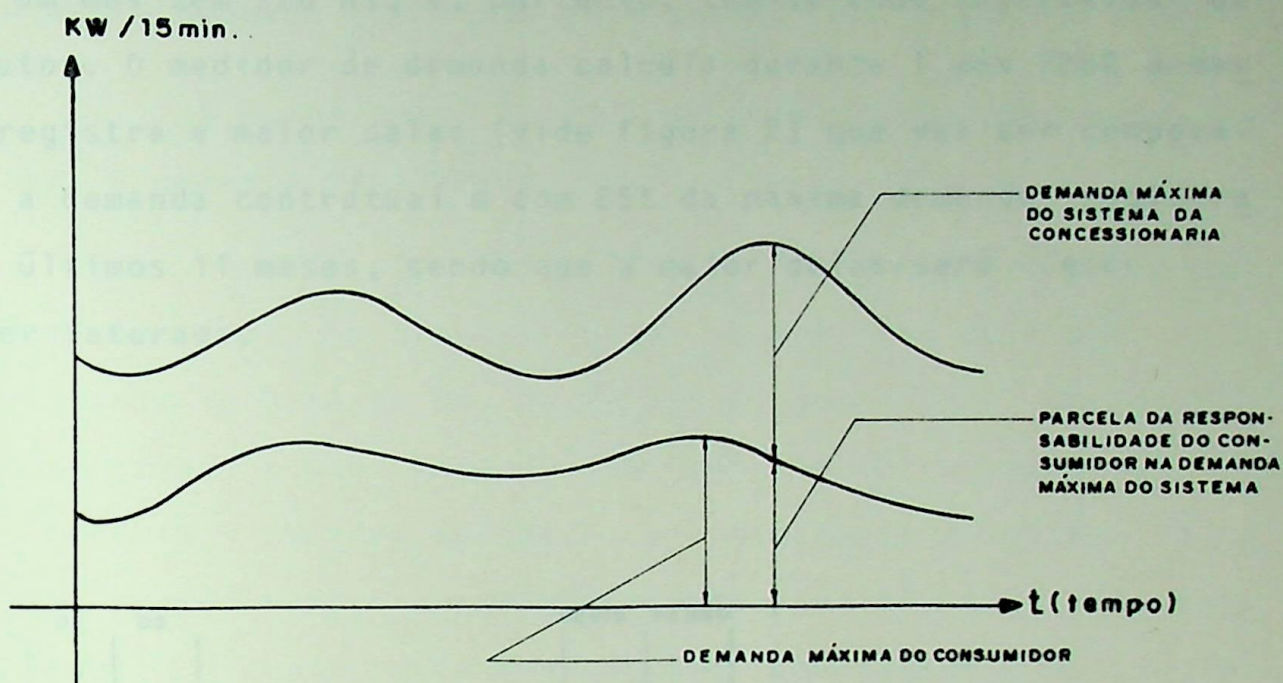


Figura 1 - Ilustração da parcela de participação de um consumidor no sistema da concessionária

D3) A demanda fixada em contrato de fornecimento, se houver.

Do exposto, pode-se notar que a parcela de maior peso na composição do custo total da energia elétrica é aquela relativa à demanda. Portanto, é de grande importância o conhecimento de como essa demanda é medida. Evidentemente, para tal fim, utiliza-se um medidor de demanda.

Os medidores de demanda são aparelhos destinados a registrar, por processo de integração, valores médios de potência ocorridos em intervalos de tempo de 15 minutos, independentemente da maneira como tal consumo tenha ocorrido.

Lembrando que (para contabilização da energia elétrica) um mês tem 720 hs, e, portanto, tem-se 2880 intervalos de 15 minutos. O medidor de demanda calcula durante 1 mês 2880 demandas e registra a maior delas (vide figura 2) que vai ser comparada com a demanda contratual e com 85% da máxima demanda registrada nos últimos 11 meses, sendo que a maior delas será escolhida para ser faturada.

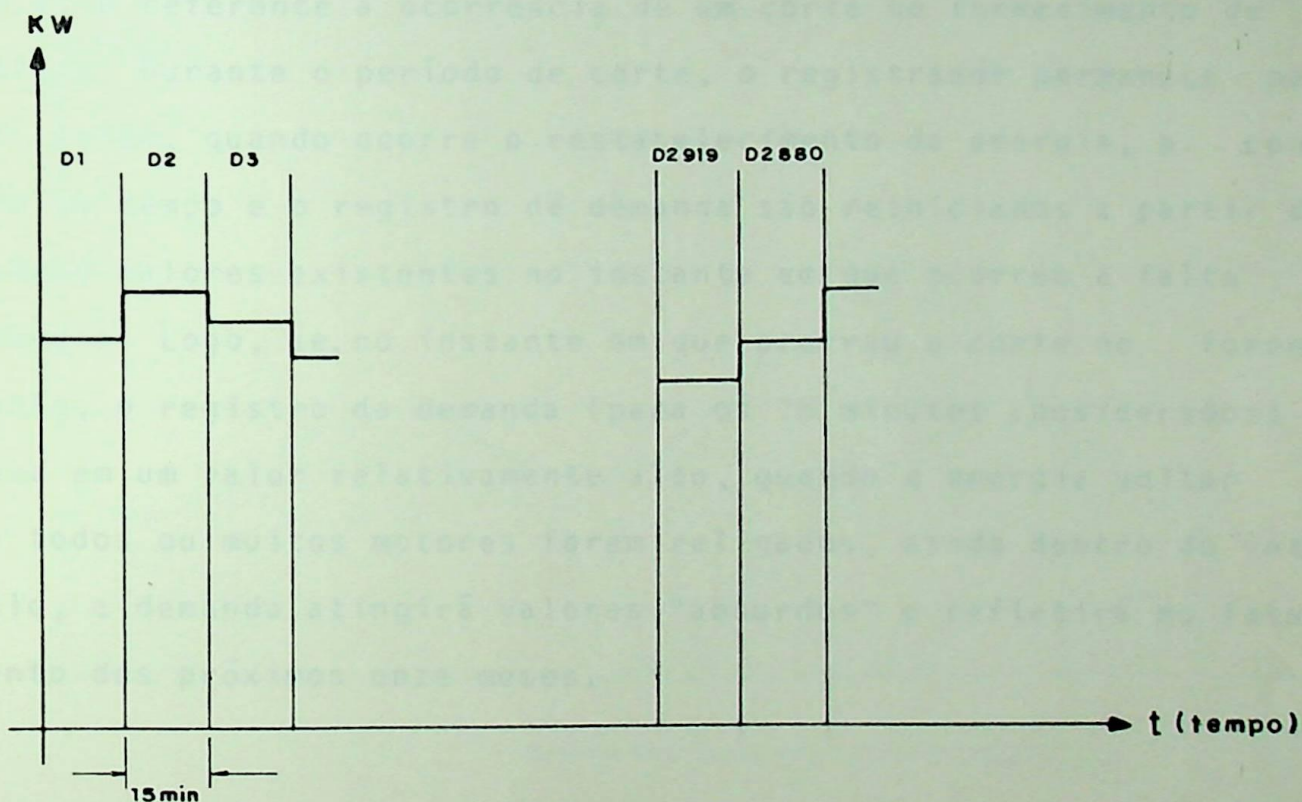


Figura 2 - Característica da demanda durante um mês

$$D1 = \frac{\text{nº de KWh consumido no intervalo 1}}{1/4 \text{ hora}}$$

⋮

$$D2880 = \frac{\text{nº de KWh consumido no intervalo 2880}}{1/4 \text{ hora}}$$

(1)

onde: D_1 = demanda calculada pelo medidor no intervalo 1;

D_{2880} = demanda calculada pelo medidor no intervalo 2880.

A maior entre as 2880 demandas calculadas pelo medidor será a demanda registrada.

Algumas características de funcionamento do medidor podem causar alguns transtornos ao consumidor, caso não exista um controle de demanda por parte deste. Uma destas características é referente à ocorrência de um corte no fornecimento de energia. Durante o período de corte, o registrador permanece parado, porém, quando ocorre o restabelecimento da energia, a contagem de tempo e o registro de demanda são reiniciados a partir dos mesmos valores existentes no instante em que ocorreu a falta de energia. Logo, se, no instante em que ocorreu o corte no fornecimento, o registro da demanda (para os 15 minutos considerados) estava em um valor relativamente alto, quando a energia voltar e se todos ou muitos motores forem religados, ainda dentro do intervalo, a demanda atingirá valores "absurdos" e refletirá no faturamento dos próximos onze meses.

4 - FATOR DE CARGA

O fator de carga é um índice que possibilita a constatação da forma como um dado consumidor está utilizando a energia elétrica, isto é, mede o grau de racionalidade com que o consumidor está utilizando a energia.

Tal índice pode ser obtido através de relação en

tre a demanda média e a demanda máxima, durante um período de tempo definido, podendo ser expresso pela fórmula:

$$FC = \frac{\text{Demanda Média}}{\text{Demanda Máxima Medida}} \quad (2)$$

Pode-se melhor visualizar a forma mais, ou menos, eficiente de utilização da mesma pela figura 3 a seguir.

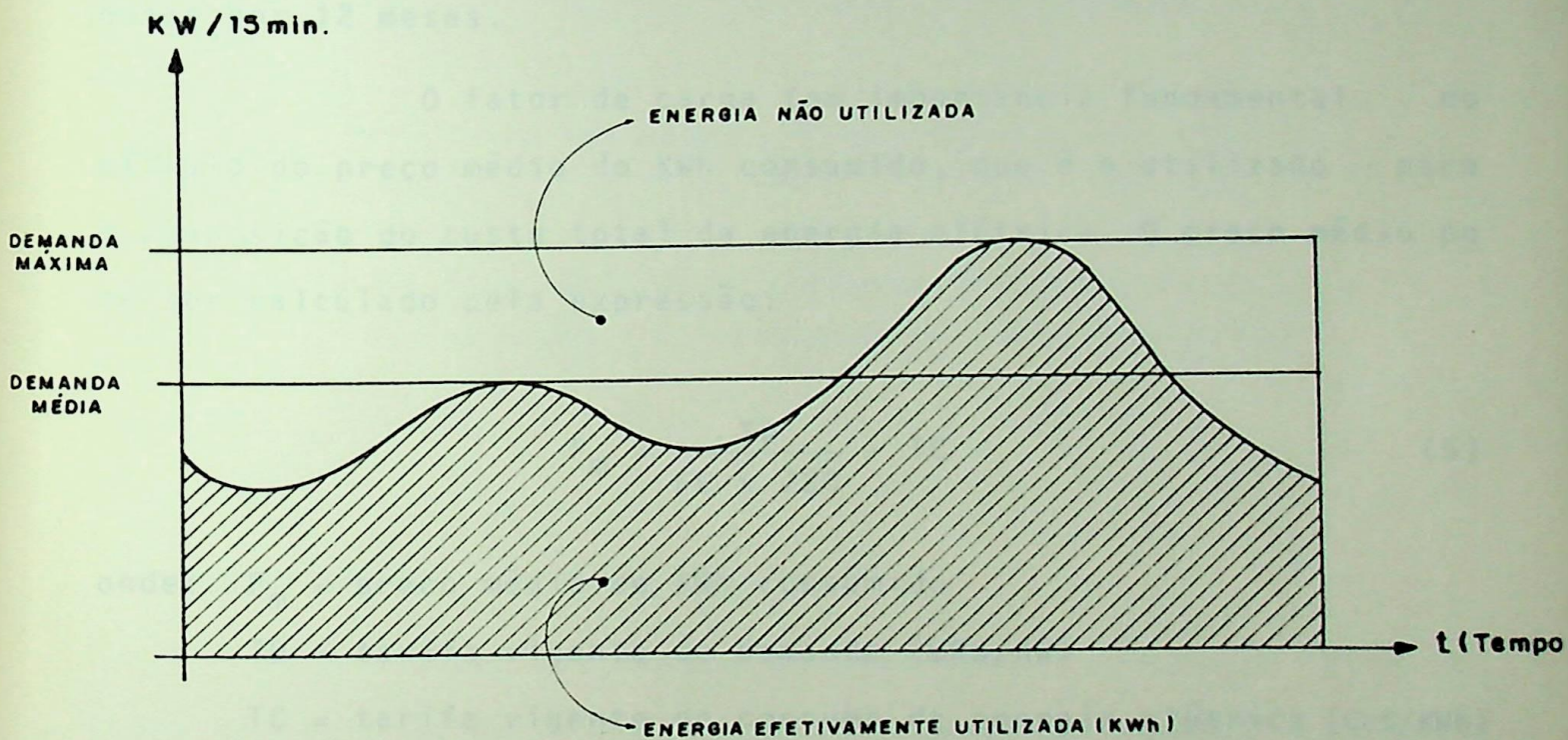


Figura 3 - Ilustração de utilização de energia

Da expressão (2) e da definição de demanda média, pode-se escrever:

$$FC = \frac{\text{Energia (KWh)}}{\text{Tempo(T) x Demanda máxima medida (KW)}} \quad (3)$$

$$FC = \frac{\text{KWh}}{\text{T x KW}} \quad (4)$$

Pode-se concluir, portanto, que o fator de carga é determinado pela relação entre o consumo de energia elétrica, expresso em KWh, e a demanda máxima medida, expressa em KW, multiplicada por um período de tempo definido (T). Este período de tempo (T) é considerado como sendo 720 horas (1 mês).

O fator de carga utilizado neste trabalho é o mensal, o que corresponde a um período de 720 horas, equivalente ao número de horas de um mês médio, ou seja, 8640 horas anuais divididas por 12 meses.

O fator de carga tem importância fundamental no cálculo do preço médio do KWh consumido, que é o utilizado para a composição do custo total da energia elétrica. O preço médio pode ser calculado pela expressão:

$$P_m = \frac{TD}{FC \times 720} + TC \quad (5)$$

onde: P_m = preço médio de KWh consumido

TD = tarifa vigente de demanda (CR\$/KW)

TC = tarifa vigente de consumo de energia elétrica (Cr\$/KWh)

FC = fator de carga

Note-se que o preço médio do KWh consumido varia em função do fator de carga, conforme mostrado graficamente (figura 4).

Pode-se concluir que o objetivo de minimização de custos, mantendo-se, obviamente, o processo produtivo em um mesmo nível, só poderá ser obtido através da redução do preço médio do KWh consumido, o que implica no controle sobre o fator de carga e,

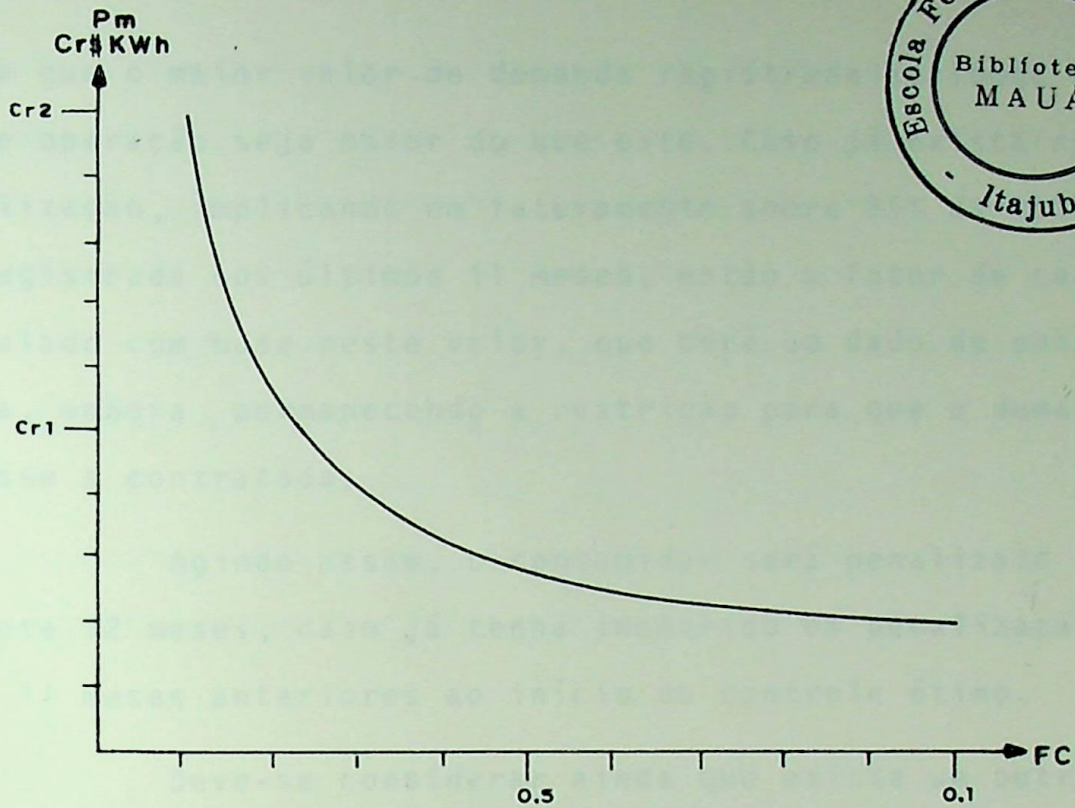


Figura 4 - Preço médio de KWh em função do fator de carga, onde na figura 4 C_r corresponde ao preço médio do KWh

consequentemente, da demanda.

Como mencionado anteriormente, a demanda faturada será sempre o maior valor dentre os valores de: demanda contratada, máxima demanda medida durante o período de faturamento e 85% do maior valor de demanda registrada nos últimos 11 meses.

Conclue-se, portanto, que o menor valor de demanda que poderá ser faturado será o valor da demanda contratada.

Como se pretende encontrar um ponto de operação a mínimo custo, utiliza-se no programa desenvolvido o valor de demanda contratada para representar o valor faturado, atuando este como uma restrição a ser cumprida pelo valor ótimo. Desta forma,

evita-se que o maior valor de demanda registrada ao longo do período de operação seja maior do que este. Caso já exista condição de penalização, implicando em faturamento sobre 85% da maior demanda registrada nos últimos 11 meses, então o fator de carga será calculado com base neste valor, que será um dado de entrada do programa, embora permanecendo a restrição para que a demanda não ultrapasse a contratada.

Agindo assim, o consumidor será penalizado no máximo durante 12 meses, caso já tenha incorrido em penalização em algum dos 11 meses anteriores ao início do controle ótimo.

Deve-se considerar ainda que existe um outro elemento que entra no cálculo do preço médio do KWh consumido dado pela equação (5). Tal elemento refere-se ao empréstimo compulsório à Eletrobrás, que é cobrado aos consumidores cujo consumo seja maior do que 2.000 KWh. A parcela referente a este empréstimo é calculada de forma proporcional ao consumo total de KWh. Acrescentando-se este valor, a equação (5) torna-se:

$$P_m = \frac{TD}{FC \times 720} + TC + TE \quad (6)$$

onde: TE = parcela referente ao empréstimo compulsório.

Deve-se ressaltar o fato de que o empréstimo compulsório é devolvido ao consumidor. Tal retorno se dá com um prazo de vinte anos, sobre o qual são pagos juros e correção monetária, sendo estabelecido o mês de julho para o pagamento destes. O que acontece, portanto, é que o valor do Empréstimo Compulsório não deve ser considerado em termos absolutos do valor que é pago, mas sim descontando-se deste valor absoluto a parcela de retorno

referente aos juros e correção monetária. Neste trabalho, a parcela adicional de custo referente ao Empréstimo Compulsório será calculada pela diferença entre a taxa de juros paga pela Eletrobrás e a taxa de atualização de capital.

Para efeito de cálculo, o valor de retorno do Empréstimo Compulsório será considerado como se fosse uma única cota, embora este valor de retorno seja creditado mensalmente a favor do respectivo consumidor. Em termos de valores atuais, os juros e o resgate do Empréstimo Compulsório podem ser dados por [12]:

$$VA = J \times \left(\frac{(1+i)^t - 1}{(1+i)^t \times i} \right) + \frac{TE}{(1+i)^t} \quad (7)$$

onde: VA = valor atual

J = $j \times (TE)$

j = taxa de juros paga pela Eletrobrás

TE = parcela referente ao Empréstimo Compulsório

t = prazo do Empréstimo Compulsório

i = taxa de atualização de capital

Desta forma, conhecendo-se o valor atual do retorno, pode-se calcular o valor real da parcela da contribuição para o custo global da energia elétrica comprada, na forma de Empréstimo Compulsório. Tal valor será dado por:

$$PR = 1 - VA \quad (8)$$

onde: PR = contribuição proporcional à parcela TE

VA = valor atual de retorno

A equação (6) poderá ser então escrita na forma:

$$PM = \frac{TD}{FC \times 720} + TC + PR \times TE \quad (9)$$

Tudo o que foi exposto até aqui, referente a Empréstimo Compulsório, é válido para o caso em que a quantidade de energia consumida seja maior do que 2.000 KWh. Caso o consumo seja menor que 2.000 KWh, não será cobrado o Empréstimo Compulsório, mas sim, uma parcela chamada de Imposto Único. Neste caso, a equação (5) torna-se:

$$PM = \frac{TD}{FC * 720} + TC + TI \quad (10)$$

onde: TI = parcela referente ao imposto único.

5 - TARIFAS ESPECIAIS

Foram consideradas nas seções anteriores apenas as tarifações normais da energia elétrica. No entanto, nesta seção serão consideradas as tarifas especiais que poderão ser cobradas, desde que certas condições sejam cumpridas pelo consumidor.

Essas tarifas especiais foram criadas por dois motivos principais [12].

O primeiro destes motivos pode ser considerado como um incentivo à utilização de fontes energéticas renováveis capazes de reduzir a dependência dos combustíveis importados.

Outro motivo, para que tais tarifas especiais fossem criadas, é a possibilidade de ocorrência de condições hidrológicas favoráveis, permitindo ao sistema hidrelétrico vertimentos turbináveis, que poderão ser utilizados para geração elétrica nas horas de menor demanda.

Com base nessas condições, foram criados quatro tipos de tarifas especiais, que são os seguintes:

- I) Energia Sazonal não Garantida (ESNG);
- II) Energia Garantida por Tempo Determinado (EGTD);
- III) Energia Sazonal de Baixa Tensão (ESBT);
- IV) Energia para Exportação (EPEX).

O fornecimento de energia elétrica dos tipos especiais referidos, em termos das Portarias do DNAEE que os regulamentam, será faturado com base apenas na energia ativa consumida no mês, mediante aplicação de tarifa específica, sendo esta estabelecida pelo DNAEE.

A "Energia Sazonal não Garantida" foi autorizada pela Portaria nº 2458, de 18 de dezembro de 1979 do Ministério das Minas e Energia, cuja formalização deverá ser feita por contrato entre consumidor e concessionária. A tarifa de consumo referente a este tipo de fornecimento será fixada através de Portaria do DNAEE.

Quando à "Energia Garantida por Tempo Determinado", foi autorizada pela Portaria nº 0085, de 31 de agosto de 1982 do DNAEE. Embora, para este tipo especial, o período de utilização seja o estabelecido anteriormente, ou seja, enquanto houver disponibilidade de energia, existe, no entanto, um tempo de utilização máximo, que a referida Portaria estabelece em 6.000 ou 3.000 ho-

ras por ano. A formalização será feita, como no caso anterior, mediante contrato entre consumidor e concessionária, sendo que, no contrato, constará, em KW (quilowatt), o valor resultante da soma das potências dos equipamentos a serem atendidos mediante o fornecimento de Energia Garantida por Tempo Determinado. Existem três tipos de contratos, resumidos a seguir:

1º - Uso de 6.000 horas anuais;

2º - Uso de 2.000 horas no 1º trimestre, 1550 horas no 2º, 900 horas no 3º e 1550, no 4º;

3º - Uso de 1.000 horas no 1º trimestre, 775 horas no 2º, 450 horas no 3º e 775, no 4º.

O faturamento mensal dos fornecimentos de Energia Garantida por Tempo Determinado será efetuado mediante a aplicação da tarifa básica ao resultado da seguinte equação:

$$\frac{H \times \Sigma P}{12} \quad (11)$$

onde: H = 6.000 ou 3.000 horas

ΣP = soma das potências dos equipamentos a serem atendidos mediante o fornecimento de Energia Garantida por Tempo Determinado

Da mesma forma que foi estabelecido pelas equações (9) e (10) anteriores, um preço médio para o KWh consumido em regime normal de fornecimento, também pode-se estabelecer um preço médio para o KWh consumido sob a forma de fornecimento especial.

No caso de contrato de Energia Sazonal não Garantida, o preço médio do KWh consumido sob esta forma poderá ser

critério como na equação (12) a seguir:

$$PM' = TC' + PR \times TE' \quad (12)$$

onde: PM' = preço médio do KWh consumido sob contrato de Energia Sazonal não Garantida

TC' = tarifa de consumo para Energia Sazonal não Garantida

TE' = Empréstimo Compulsório para Energia Sazonal não Garantida

A equação (12) é válida para consumo superior a 2.000 (KWh). No caso de consumo inferior a este, não será cobrado o Empréstimo e sim, uma tributação denominada Imposto Único.

Se existir contrato de Energia Garantida por Tempo Determinado, o preço médio do KWh consumido sob esta forma poderá ser escrito como na equação (13) a seguir:

$$PM'' = TC'' + PR \times TE'' \quad (13)$$

onde: DM'' = preço médio do KWh consumido sob contrato de Energia Garantida por Tempo Determinado

TC'' = tarifa de consumo para a Energia Garantida por Tempo Determinado

TE'' = Empréstimo Compulsório para a Energia Garantida por Tempo Determinado

Da mesma forma que no caso de contrato de Energia Sazonal não Garantida, a equação (13) só é válida para consumo superior a 2.000 KWh. Caso o consumo seja menor que 2.000 KWh, não será cobrado Empréstimo Compulsório e sim, o Imposto Único.

A "Energia Sazonal de Baixa Tensão" tem as mesmas características da ESNG, podendo ser considerada como a extensão da ESNG para os consumidores do GRUPO B.

Para finalizar, a "Energia para Exportação" foi criada com o objetivo de estimular a produção industrial de bens destinados à exportação. O fornecimento deste tipo de energia é feito pela concessionária para consumidores industriais, através de contrato especial, sendo que esta deverá ser utilizada exclusivamente para o incremento de produção voltada à exportação.

6 - BENEFÍCIOS

Além da redução do preço médio do KWh consumido, o controle sobre a demanda também trás alguns outros benefícios in diretos, tendo em vista que tal controle promoverá a utilização mais eficiente das instalações.

Outros benefícios poderão advir do controle da demanda, pois um dos requisitos básicos exigidos para se pleitear a redução do Empréstimo Compulsório à ELETROBRÁS é que [10] a média dos fatores de carga de faturamento mensal dos últimos 24 meses que antecedem de 60 dias ao pedido de redução, seja igual ou superior a 0,30 (30%).

O valor em percentual da redução é dado pela expressão [10]:

$$R = 0,575 \left(\frac{D}{V} + 5 \right) \times \sqrt{FC} \times \left(1 - \frac{n}{m} \right) \quad (14)$$

onde: R = redução percentual do empréstimo à ELETROBRÁS

$\frac{D}{V}$ = valor percentual da relação entre despesas com energia elétrica e as vendas faturadas

FC= valor percentual da média dos fatores de carga

n = número de ocorrências de fator de potência indutivo inferior a 0,85

m = número de meses considerados, normalmente, 24

Da expressão (14) conclui-se que quanto maior for o fator de carga, tanto maior será a redução obtida do empréstimo à ELETROBRÁS. Da mesma forma, quanto menor foi a demanda faturada, melhor, pois implica em fator de carga elevado.

7 - EXEMPLO

Na tabela 1 a seguir [17], pode-se constatar a influência da utilização racional no custo total da energia elétrica.

TABELA 1 - A BOA E A MÁ UTILIZAÇÃO DE ENERGIA

<p>A BOA UTILIZAÇÃO</p> <p>CONSUMO = 70.000 KWh - DEMANDA = 310 KW</p> <p>FP = 0,85</p>	<p>A MÁ UTILIZAÇÃO</p> <p>CONSUMO = 70.000 KWh - DEMANDA = 470 KW</p> <p>FP = 0,60</p>
<p>DF = 310 KW x CR\$1672,00 = Cr\$ 518.320,00</p>	<p>DF = 470 KW x Cr\$1672,00 = Cr\$ 785.840,00</p>
<p>CM = 70.000 KWh x Cr\$6.014 = Cr\$ 420.980,00</p>	<p>CM = 70.000 KWh x Cr\$6.014 = Cr\$ 420.980,00</p>
<p>Subtotal (1) = Cr\$ 939.300,00</p>	<p>Subtotal (1) = Cr\$1.206.820,00</p>
<p>A = Ajuste do F.P. = Cr\$ 0,00</p>	<p>A = 1.206.820,00 x $(\frac{0,85}{0,60} - 1)$ = Cr\$ 503.243,94</p>
<p>Subtotal (2) = Cr\$ 939.300,00</p>	<p>Subtotal (2) = Cr\$1.710.063,94</p>
<p>EC = 70.000 KWh x Cr\$3.04265 = Cr\$ 212.985,50</p>	<p>EC = 70.000 KWh x Cr\$3.04265 = Cr\$ 212.985,50</p>
<p>ECR * (25,19%) = Cr\$ 159.334,40</p>	<p>ECR = Não tem direito (FC < 30%)</p>
<p>FB = Faturamento Bruto = Cr\$1098.634,40</p>	<p>FB = Faturamento Bruto = Cr\$1.923.049,44</p>
<p>PM = Preço Médio do KWh = Cr\$ 15,69</p>	<p>PM = Preço Médio do KWh = Cr\$ 27,47</p>

onde na Tabela 1: FP = fator de potência

DF = demanda faturada

CM = consumo mensal

A = sobretaxa devido a baixo fator de potência

EC = Empréstimo Compulsório à Eletrobrás

ECR = EC - redução

APÊNDICE A4

MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS



1 - INTRODUÇÃO

A precisão dos parâmetros usados para o modelo adotado em uma estratégia ótima de operação de qualquer sistema é de fundamental importância, sendo que pesquisas na área de estimação de parâmetros são realizadas continuamente a fim de encontrar maior precisão nas modelagens, comprovando desta forma a sua importância.

Sabe-se que a variação de determinados fatores podem influenciar, tornando menos precisas, as curvas de comportamento de unidades térmicas, tais como [11] a temperatura de entrada de água no condensador, condições da caldeira e da turbina, custo do combustível, custo incremental da manutenção, etc.

Foge, no entanto, ao interesse deste trabalho fazer uma análise da sensibilidade da função de custo de um determinado sistema para variações nos coeficientes das características de entrada-saída das unidades geradoras.

Partiu-se, portanto, para a escolha de um algoritmo de estimação de parâmetros, entre os muitos existentes, que fosse comumente empregado para estimar coeficientes de modelos e que já tivesse comprovada eficiência, para o que se pretendia.

Optou-se pelo algoritmo dos mínimos quadrados, por

questão de simplicidade e familiaridade com o método. O método dos mínimos quadrados é o mais antigo e longamente utilizado [9]. A preferência por sua utilização recai no fato deste poder ser aplicado diretamente em modelos determinísticos sem envolvimento com teoria de probabilidades.



2 - CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS

Genericamente, pode-se caracterizar os problemas de estimação de parâmetros imaginando-se uma situação física na qual um conjunto de variáveis dependentes \underline{y} é função de variáveis independentes \underline{x} e de parâmetros desconhecidos $\underline{\theta}$:

$$y = f(x, \theta) \quad (1)$$

Para valores experimentais de \underline{x} , valores de \underline{y} são medidos. Para cada valor medido, tem-se o seguinte vetor de resíduos:

$$e_{\mu a}(\theta) = y_{\mu a} - f_a(x_{\mu}, \theta) \quad (2)$$

onde: μ : representa o número do experimento

a : representa a que equação do modelo a que se esta se referindo

O método dos mínimos quadrados consiste em encontrar os valores de $\underline{\theta}$ que minimizam a função:

$$\Phi(\underline{\theta}) \equiv \underline{E}'(\theta) \underline{E}(\theta) = T_r [\underline{E}'(\theta) \underline{E}(\theta)] \quad (3)$$

ou

$$\phi(\underline{\theta}) = \sum_{a=1}^m \sum_{\mu=1}^n e_{\mu a}^2 \quad (4)$$

ou seja, minimiza-se a soma dos quadrados dos resíduos.

Desta forma, derivando-se (4) e igualando a 0 (zero), obtêm-se:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 2 \sum_{a=1}^m \sum_{\mu=1}^n e_{\mu a} \frac{\partial e_{\mu a}}{\partial \theta} = \underline{0} \quad (5)$$

Um caso bastante comum é aquele onde $m=1$ (equação única de mínimos quadrados [3]), o que transforma (2), (3) e (5) em:

$$e_{\mu} = y_{\mu} - f(x_{\mu}, \underline{\theta}) \quad (6)$$

$$\phi(\underline{\theta}) = \sum_{\mu=1}^n [y_{\mu} - f(x_{\mu}, \underline{\theta})]^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta_{\alpha}} = -2 \sum_{\mu=1}^n e_{\mu} \frac{\partial f(x_{\mu}, \underline{\theta})}{\partial \theta_{\alpha}} \quad (\alpha=1, 2, \dots, e) \quad (8)$$

Os valores de θ que minimizam a função objetivo (7) serão encontrados por meio de um processo iterativo, ou seja, começando-se com um valor θ_1 arbitrário, gera-se uma sequência de pontos $\theta_2, \theta_3, \dots$, até que um ponto de convergência θ^* seja obtido [1]. Define-se, então, um passo de iteração pelo vetor:

$$\underline{\sigma}_i = \underline{\theta}_{i+1} - \theta_i \quad (9)$$

Pode-se verificar, a cada passo de iteração, se o processo está gerando valores melhorados de $\underline{\theta}$, isto é, se o processo está convergindo para um valor ótimo, através da verificação:

$$\Phi_{i+1} < \Phi_i \quad (10)$$

onde:

$$\Phi_j \equiv \Phi(\theta_j) \quad (j=1,2,\dots) \quad (11)$$

Logo, cada passo será aceitável se a equação (10) é satisfeita.

Pode-se, desta forma, estabelecer um algoritmo ([1] e [9]) para a determinação de $\underline{\theta}^*$, como segue:

PASSO 1: Fazer $i=1$ e fornecer um valor inicial $\underline{\theta}_1$.

PASSO 2: Determinar uma direção para se chegar ao próximo valor de $\underline{\theta}$. Tal direção será estabelecida pelo vetor \underline{v}_i .

PASSO 3: Determinar um escalar ρ_i que forneça o quanto "caminhar" na direção de \underline{v}_i para que a equação:

$$\underline{\theta}_{i+1} = \underline{\theta}_i + \rho_i \underline{v}_i \quad (12)$$

seja aceitável, ou seja, satisfaça a equação (10).

PASSO 4: Verificar se o processo convergiu. Em caso afirmativo, aceita-se $\underline{\theta}_{i+1}$ como valor para $\underline{\theta}^*$. Caso contrário, incrementa-se i e volta-se ao passo 2.

Assim, para que se possa encontrar o valor ótimo

de $\underline{\theta}$ precisa-se calcular as quantidades \underline{v}_i e ρ_i .

Pode-se provar [1] que \underline{v} é uma direção aceitável, se, e somente se, existe uma matriz \underline{R} positiva definida tal que:

$$\underline{v} = - \underline{R} \underline{q}_i \quad (13)$$

onde: \underline{q} : é o vetor gradiente de $\Phi(\underline{\theta})$, isto é, $\underline{q} = \frac{\partial \Phi}{\partial \underline{\theta}}$.

Tem-se, assim, a forma geral dos chamados "métodos gradientes", que são aqueles que necessitam a cada iteração de avaliação do gradiente da função objetivo.

A equação básica para a i -ésima iteração em qualquer método gradiente é:

$$\underline{\theta}_{i+1} = \underline{\theta}_i - \rho_i \underline{R}_i \underline{q}_i \quad (14)$$

A diferença entre os diversos métodos gradientes encontra-se na maneira diferente de cada um escolher a matriz \underline{R}_i e o escalar ρ_i .

Entretanto, algumas condições para \underline{R}_i e ρ_i são comuns a todos os métodos [1], [9], tais como: \underline{R}_i deve ser positiva definida; \underline{R}_i deve ser uma aproximação de $-(\underline{H}_i)^{-1}$, onde \underline{H}_i é a matriz Hessiana da função objetivo (quando $\underline{R}_i = -(\underline{H}_i)^{-1}$ tem-se o método de Newton-Raphson); ρ_i deve ser escolhido tal que satisfaça (10).

Como não é de interesse deste trabalho fazer um estudo detalhado dos métodos e a forma como se apresentam \underline{R}_i e ρ_i em cada um deles, este texto se limitará a apresentar-lhe sucintamente, com a preocupação de tornar compreensível o método de Gauss que foi o utilizado no programa digital para a determinação

de \underline{R}_i e ρ_i .

O método de Gauss [9] consiste de simplesmente omitir as segundas derivadas das equações do modelo quando a Hessiana está sendo calculada. Considerando-se esta simplificação, e considerando a função:

$$\Phi(\underline{\theta}) = \sum_{\mu=1}^n [y_{\mu} - f(\underline{x}_{\mu}, \underline{\theta})]^2 \quad (15)$$

obtêm-se:

$$N_{\alpha\beta} = 2 \sum_{\mu=1}^n (\partial f_{\mu} / \partial \theta_{\alpha}) (\partial f_{\mu} / \partial \theta_{\beta}) \quad (16)$$

A essência do método de Gauss é usar no i -ésimo passo de iteração a direção dada por:

$$\underline{v}_i = -\underline{N}_i^{-1} \underline{q}_i \quad (17)$$

Ou, de forma equivalente, \underline{v}_i é a solução do conjunto de equações lineares e simultâneas:

$$\underline{N}_i \underline{v}_i = -\underline{q}_i \quad (18)$$

Considerando-se já escolhida a direção (solução de (18)), deve-se determinar o valor de ρ . Para calculá-lo, o método de Gauss utiliza um método de interpolação-extrapolação. A idéia básica do método de interpolação é que se o valor inicialmente escolhido para $\rho = \rho^{(0)}$, é tal que $\psi_i(\rho^{(0)}) > \Phi_i$, tenta-se um valor menor de ρ , e repete-se o processo até que seja encontrado um valor aceitável. Para o método da extrapolação, escolhe-se um novo valor de ρ , caso o valor inicial de $\rho = \rho^{(0)}$ já seja aceitável, na

tentativa de se encontrar um valor ainda melhor. Em ambos os casos o novo valor de $\underline{\rho}$ é escolhido de tal modo que minimize uma aproximação quadrática para $\psi_j(\rho)$ [1].

Para uma melhor compreensão da forma de se escolher o escalar $\underline{\rho}$, o diagrama de blocos a seguir mostra de maneira bastante simples os detalhes da sua determinação.

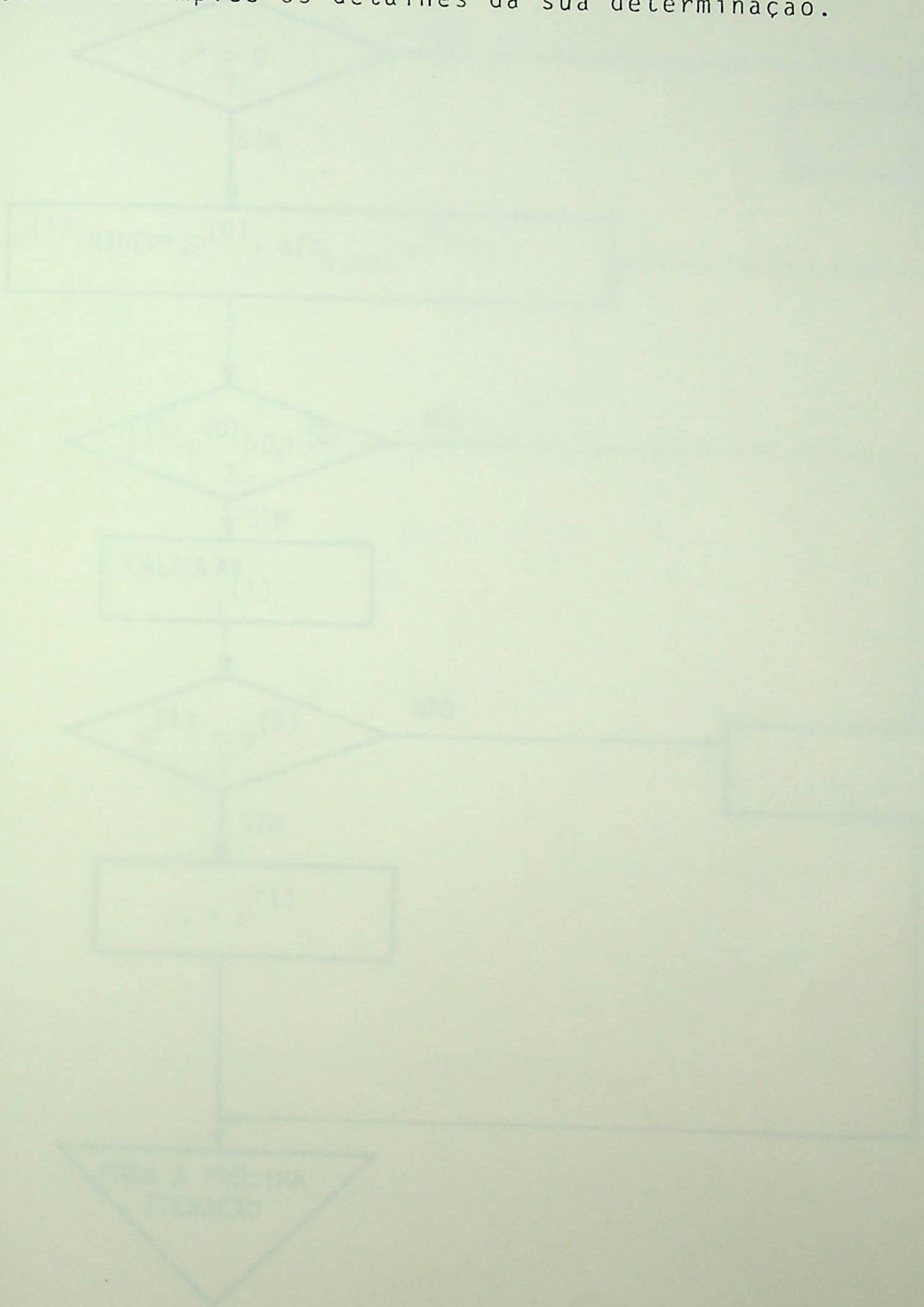


Figura 1 - Diagrama de blocos para a determinação de $\underline{\rho}$.

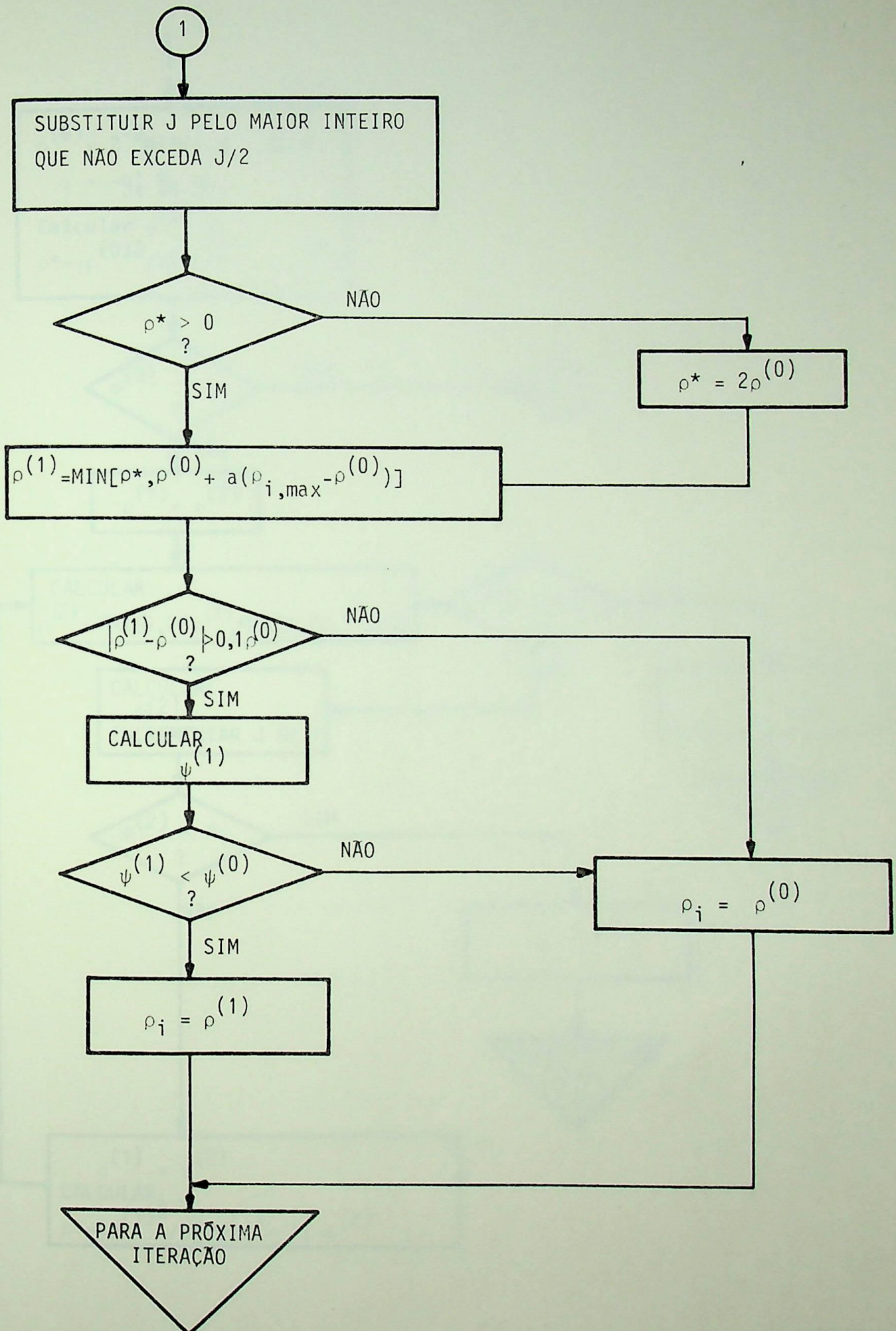
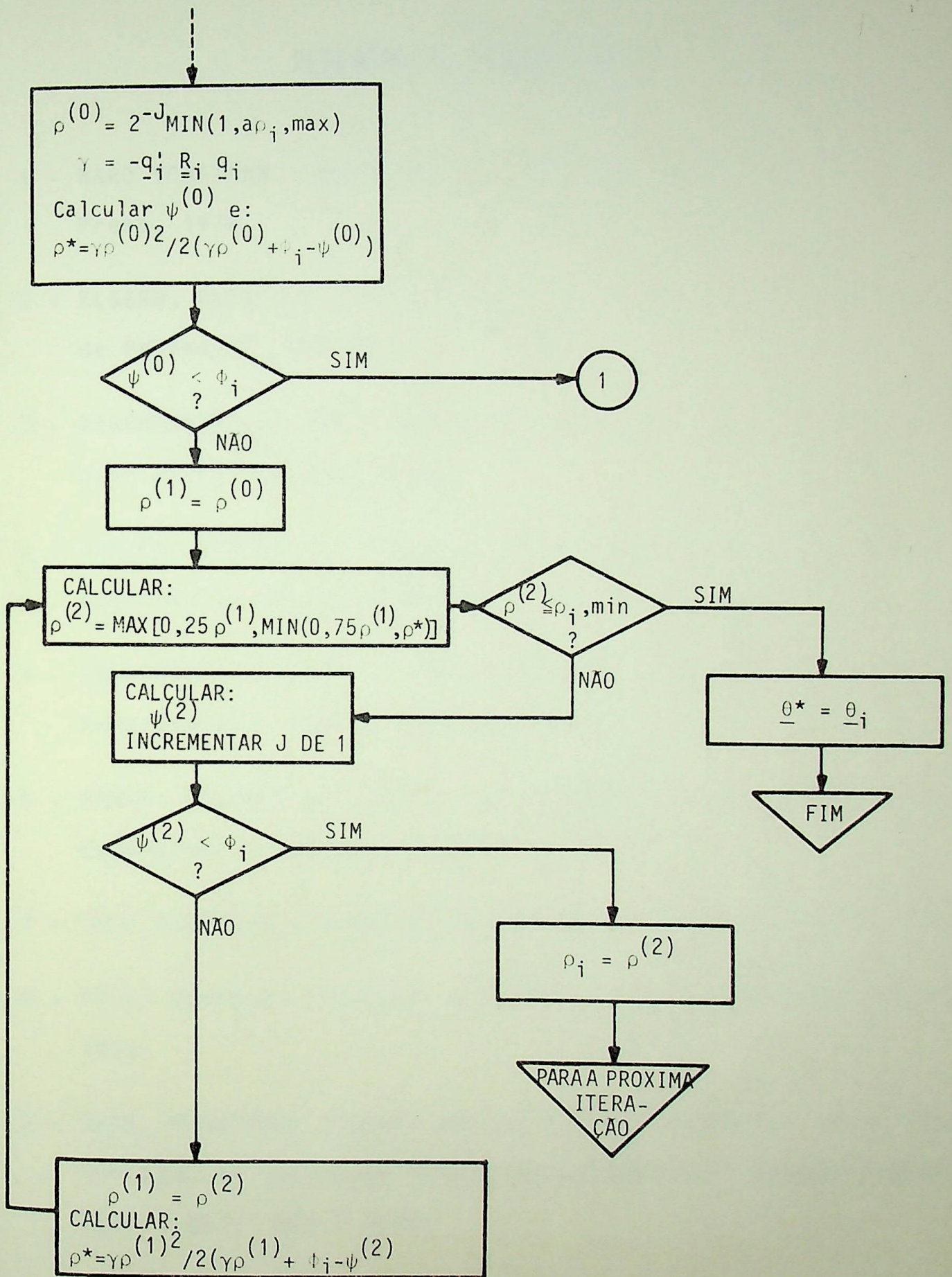


Figura 1 - Diagrama de blocos para determinação do tamanho do passo de iteração



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - BARD YONATHAN: "Nonlinear Parameter Estimation", Academic Press, 1974.
- 2 - ELGERD, OLLE J.: "Introdução à Teoria de Sistemas Elétricos de Potência", McGraw-Hill, 1977.
- 3 - KIRCHMAYER, LEON K.: "Economic Operation of Power Systems", John Wiley and Sons, 1958.
- 4 - LARSON, ROBERT E.: "State Increment Dynamic Programming" , American Elsevier, 1968.
- 5 - LUENBERGER, DAVID G.: "Introduction to Linear and Nonlinear Programming", Addison-Wesley, 1973.
- 6 - PANIK, MICHAEL J.: "Classical Optimization: Foundations and Extensions", American Elsevier, 1976.
- 7 - "PTI: Dinâmica e Controle da Geração", ELETROBRÁS/UFES, 1979.
- 8 - "PTI: Operação Econômica e Planejamento", ELETROBRÁS/UFES , 1979.
- 9 - BARD, YONATHAN: "Comparison of Gradient Methods for the Solution of Nonlinear Parameter Estimation Problems", SIAM, Vol 7, No 1, Março 1970.
- 10 - CESP/CPFL: "Manual sobre o Fator de Carga", Dezembro/1979.
- 11 - EL-HAWARY, M.E.; MANSOUR, S.Y.: "Performance Evaluation Parameter Estimation Algorithms for Economic Operation or

Power Systems", IEEE, Vol PAS-101, Nº 3, Março 1982.

- 12 - PAGY, A.; PARFIJA NOWITSCH, H.; SCHECHTER, HORACIO I.: "Análise Econômica da Substituição de Derivados de Petróleo por Eletricidade", Mundo Elétrico, Nº 280, Janeiro 1983.
- 13 - Portaria nº 2458 de 18 de Dezembro de 1979, MME, Diário Oficial da União.
- 14 - Portaria nº 0085 de 31 de Agosto de 1982, MME, Diário Oficial da União.
- 15 - Portaria nº 41.019 de 26 de Fevereiro de 1957, MME, Diário Oficial da União.
- 16 - Portaria nº 029 de 23 de Abril de 1981, DNAEE, Diário Oficial da União.
- 17 - RENNÓ, FRANCISCO N.; ALCKIMIN, ANDRE L.; "A Crise Energética e as Indústrias com Geração Elétrica Própria", Mundo Elétrico, 1981.
- 18 - SMAR Equipamentos Industriais: "Racionalização da Demanda de Energia Elétrica".
- 19 - ARANGO, HECTOR: "Notas de Aula", EFEI, 1981.
- 20 - BENGIAMIN, N.N.; ERICKSON, L.T.: "Optimum Power Generation and Purchase Balance Under Demand Variations", IEEE, PAS 101, Dezembro 1982.

DATA	19 / 12 / 1983
PROV.	-
IND.	-
LIV.	CPG - EFEI
NCLB	Llocais.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200382



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA