TESE
376

DISTRIBUIÇÃO ÓTIMA ENTRE POTÊNCIAS DE COMPRA E AUTO GERAÇÃO NO PARALELISMO CONSUMIDOR CONCESSIONÁRIA

TESE DE MESTRADO

1983

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

tônio de Azevêdo Santos

Ministério da Educação e Cultura

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca MAUÁ
Itajubá

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "DISTRIBUIÇÃO ÓTIMA ENTRE POTÊNCIAS DE COMPRA E AUTO GERAÇÃO NO PARALELISMO CONSUMIDOR-CONCESSIONÁRIA"

Autor: LUIZ ANTONIO DE AZEVEDO SANTOS

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º		

Resultado médio: Conceito A, ou seja Aprovado

Observações:

Itajubá, 14 de maio de 1983.

1º Examinador
Dr. FRANCISCO RENNÓ NETO - TRIEL

2º Examinador
PROF. JOÃO ROBERTO COGO - EFEI

3º Examinador
PROF. HECTOR ARANGO - ORIENTADOR

4º Examinador

Campus Universitário - Prof. José Rodrigues Seabra
Tel. (035) 622-1700 — 622-1510 — Bairro Pinheirinho — 37.500 — ITAJUBÁ — M. G.

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISTRIBUIÇÃO ÓTIMA ENTRE POTÊNCIAS DE COMPRA E AUTO GERAÇÃO NO PARALELISMO CONSUMIDOR - CONCESSIONÁRIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUIZ ANTONIO DE AZEVEDO SANTOS

- *1983* -

D E D I C A T Ó R I A

A minha esposa e filhos

Sandra Maria Freire Santos

Oséias Freire Santos

Luiz Antonio de Azevedo Santos Júnior

Meus Pais

Cícero José dos Santos

Ivonize Terezinha de Azevedo Santos

e,

toda minha família.

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

Agradeço a toda equipe do Curso de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, pelo apoio dado à realização deste trabalho e, também, pelo ambiente familiar existente que transmite segurança a todos que se propõe a realizar tais objetivos.

Agradecimento especial ao Professor HECTOR ARANGO pela forma como se dedicou a orientação deste trabalho, e pelo espírito de praticidade que soube transmitir durante a sua elaboração.

Agradeço da mesma forma ao Professor João Roberto Cogo, co-orientador.

Agradeço também, pelo incentivo e confiança que deram a este Trabalho, a meus pais e minha esposa, CÍCERO JOSÉ DOS SANTOS, IVONIZE TEREZINHA DE AZEVEDO SANTOS e SANDRA MARIA FREIRE SANTOS.

À Regina Célia Ferreira Sales pela datilografia do manuscrito, e a todos os funcionários da EFEI, amigos e professores do Curso de Pós-Graduação pela contribuição que deram de forma direta ou indireta, muito obrigado.

LUIZ ANTONIO DE AZEVEDO SANTOS

INTRODUÇÃO

Este trabalho nasceu da observação da contínua dependência Homem-Máquina-Petróleo, que vem se acentuando cada vez mais, e a consequente necessidade de um programa com base científica que minimize o uso dos derivados do petróleo. Ele dá a distribuição ótima entre potências de compra e auto geração no paralelismo consumidor concessionária, onde o consumidor é, em geral, um sistema industrial que utiliza vapor para a geração de energia. Mais detalhes de sua aplicação no capítulo cinco ítem quatro (5.4).

O setor industrial, bem como as concessionárias que utilizam os derivados do petróleo nos objetivos supra citados, já sentem a real necessidade de um procedimento que otimize o uso dos derivados do petróelo; tudo como consequência a operação com o custo mínimo.

O trabalho tem como objetivo dar uma formulação matemática ao problema de se operar o sistema com o mínimo gasto de combustível. Para isto se constrói uma função que dá o custo da operação do sistema. Em seguida, aplicam-se técnicas de otimização com o objetivo de encontrar a geração de energia elétrica e/ou vapor que minimize os custos operativos do sistema, atendendo a demanda mais as perdas.

O modelo matemático utilizado para otimizar os custos operativos aplica-se a todos os tipos de unidades geradoras térmicas, desde as mais simples às usinas nucleares, pois a função de custos conserva a mesma natureza para os diversos tipos

de máquinas geradoras.

Dentre as diversas técnicas de otimização existentes, a escolhida, por se adaptar mais a natureza do problema e ser de fácil implementação computacional, foi a dos multiplicadores de Lagrange.

O Trabalho é constituido por cinco capítulos distribuidos da seguinte maneira:

No primeiro capítulo procura-se dar uma visão mais ampla da relação entre o homem, a máquina e o petróleo. Faz-se um histórico iniciando a partir da época em que o petróleo começou a ser utilizado substituindo outras fontes primárias de energia, até a época atual. Termina-se o capítulo mostrando a dependência do Brasil em relação ao petróleo e seus derivados.

O segundo capítulo tem como objetivo dar uma conceituação do problema do despacho de carga. É analisado o despacho de potência ativa e reativa; introduz-se o conceito de despacho ótimo. Este capítulo é base para o capítulo três, razão pela qual se detem mais nos conceitos e deduções.

O capítulo três é a alma do Trabalho. Nele reside a parte mais importante desenvolvida. Estuda-se o modelo das unidades termoelétricas com saída de vapor intermediárias, faz-se o equacionamento matemático dos custos, em seguida encontra-se o despacho sem considerar a perda de transmissão. O despacho ótimo considerando as perdas, é então obtido. É feita uma análise matemática das relações obtidas, e finalmente com o fluxograma para o despacho com perdas termina-se o capítulo.

O quarto capítulo é destinado aos exemplos. São analisados quatro exemplos, mostrando numa listagem de computador digital o despacho econômico e o custo ótimo da operação

No quinto capítulo apresenta-se algumas conclusões, dando também sugestões de como se utilizar de maneira eficiente o programa. São apresentadas sugestões para outros trabalhos que juntamente com este possam ajudar mais nesta área de necessidade.

S U M Á R I O

	CONTEÚDO	PÁGINA
CAPÍTULO I - A CRISE DO PETRÓLEO		01
1.1	Introdução	01
1.2	Panorama Energético Mundial	01
1.3	Crise de Energia, ou Crise de Petróleo	04
1.4	Antecedentes da Crise	05
1.5	O Ciclo do Petróleo	07
1.6	O Problema Energético no Brasil	17
1.7	Fontes Alternativas de Energia	23
1.8	Conclusão	30
1.9	Tabelas e Gráficos	32
CAPÍTULO II - O DESPACHO ÓTIMO		45
2.1	Introdução	45
2.2	Um Breve Histórico	47
2.2.a	O método da carga máxima	48
2.2.b	Método da carga mais eficiente	48
2.3	Despacho Ótimo Ignorando as Perdas na Transmissão	49
2.4	Equacionamento do Despacho	50
2.5	Despacho Ótimo Ignorando as Perdas	54
2.6	Despacho Considerando as Perdas de Transmissão	57
2.7	Algoritimo Para o Processo Iterativo	60
CAPÍTULO III - DESPACHO ÓTIMO DE UNIDADES GERADORAS TÉRMICAS COM SAÍDA INTERMEDIÁRIA DO VAPOR, E EM PARALELO COM A CONCESSIONÁRIA		61
3.1	Introdução	61

3.2 Modelo Matemático com Saída Intermediária do Vapor sem Considerar as Perdas 61

3.2.1 Cálculo dos multiplicadores de Lagrange 66

3.3 Análise Matemática das Relações Obtidas 70

3.3.1 Matriz $\underline{\underline{A}}$ 70

Cálculo da Inversa de $\underline{\underline{A}}$ 71

3.3.2 Cálculo de Po e Ho 74

3.3.3 Matriz $\underline{\underline{\underline{X\lambda\eta}}}$ 74

3.4 Considerações das Perdas 75

3.5 Desenvolvimento do Modelo Final Incluindo as Perdas. 77

3.5.1 Cálculo dos multiplicadores de Lagrange 82

3.6 Cálculo das Perdas 84

3.7 Perdas Incrementais 85

3.8 Algoritimo e Fluxograma 85

CAPÍTULO IV - EXEMPLOS 91

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES 111

5.1 Introdução 111

5.2 Comentário sobre o Cálculo das Perdas 111

5.3 Aspectos Gerais do Programa 112

5.3.1 Sub-programa número um 112

5.3.2 Sub-programa número dois 113

5.3.3 Sub-programa número três 113

5.3.4 Sub-programa número quatro 113

5.4 Flexibilidade do Programa 114

5.5 Conclusão Final 115

Anexo: Negociação do Vapor a Alta Pressão 117

Bibliografia 120

C A P Í T U L O I

A CRISE DO PETRÓLEO

1.1 INTRODUÇÃO:-

É objetivo deste capítulo mostrar a crise energética que a Humanidade está vivendo; suas origens e consequências e apontar soluções especificamente no que diz respeito ao alvo proposto neste trabalho.

O capítulo é iniciado fazendo uma análise da atual crise energética. É dado um histórico na tentativa de descobrir-se as origens deste problema. Analisa-se a dependência do mundo civilizado em relação ao petróleo e, em particular, a situação do Brasil vendo o quanto ele (Brasil) está sendo afetado pela crise energética.

O capítulo termina indicando meios alternativos que, a curto prazo, podem ajudar na difícil solução do permanente problema da energia; e mostra o tipo de solução que este trabalho espera dar no que diz respeito a utilização econômica do petróleo e seus derivados.

1.2 PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL

Depois dos alimentos, nenhum recurso é mais essencial à Humanidade do que a energia.

Causa e efeito do desenvolvimento econômico e social contemporâneo, o consumo de energia vem aumentando consideravelmente de ano para ano, principalmente nos países mais industrializados.

O ritmo de aumento do consumo é incessante e geralmente maior que o da produção.

A fome de energia é um fenômeno mundial, resultante em grande parte da rapidez de desenvolvimento industrial e das crescentes exigências de ordem social, que se apresentam principalmente nos países de elevado consumo per capita.

O consumo mundial de energia está aumentando à razão de 6% ao ano - três vezes mais do que a população.

Apesar dos grandes avanços no campo da energia nuclear, o petróleo e a eletricidade continuarão a ser as forças propulsoras do progresso, ainda por muito tempo.

Até o ano 2000, os hidrocarburetos deverão atender a cerca de 60% das necessidades energéticas do mundo. Esta proporção, atualmente crescente, declinará entretanto no final do século.

Por mais rápido que o programa de reatores nucleares se expanda, o aumento da produção não será suficiente para atender à demanda de energia nas próximas décadas.

Até o final de 1973, a relativa facilidade de aquisição do petróleo no mercado mundial ensejou a estruturação de uma larga economia assentada no uso excessivo e ineficiente de um único produto, que não era encontrado em toda parte e cujas jazidas também não eram inesgotáveis.

A quadruplicação dos preços do petróleo bruto, naquele ano, alterou completamente as relações de troca entre os diversos países, obrigando-os a uma reformulação do problema energético global. Todos os países importadores de petróleo tiveram um preço a pagar pela alta do custo ocorrida a partir de 1973. Os países mais ricos possuíam condições para pagar o

preço à vista; às nações em desenvolvimento, todavia, não restava outra alternativa senão a de pagar a prazo, aumentando assim seu endividamento externo.

A crise do petróleo foi o deflagrador imediato da insegurança em que se viu lançado o mundo de nossos dias. Poucas vezes a sociedade industrial se encontrou diante de decisões tão graves e mudanças tão bruscas, como as que se lhe colocaram, principalmente, em face da energia.

O desenvolvimento de alternativas internas, a substituição do produto, a contenção do consumo e a redução da demanda não eliminarão a dependência dos países industrializados em relação ao suprimento de óleo do Oriente Médio.

A demanda de recursos energéticos em níveis cada vez mais elevados, pelos maiores consumidores - os Estados Unidos, a Europa e o Japão - envolve grandes interesses que se conflitam com a opinião generalizada de que a revolução científica e tecnológica do nosso tempo não se faça, como ocorreu desde o último quartel do século passado, com a revolução industrial - em benefício quase exclusivo dos países mais adiantados, o que infelizmente já vem acontecendo.

A industria do petróleo, que até a Segunda Guerra Mundial era apenas produtora de combustíveis e lubrificantes, logo depois do grande conflito tornou-se também a base da vasta indústria petroquímica, através da qual o "ouro negro" passou a ter uma infinidade de aplicações.

O consumo mundial de petróleo quintuplicou em 25 anos. O consumo dos Estados Unidos quase triplicou, passando de 6 milhões de barris por dia para 17 milhões. O consumo de petróleo no Japão, em 1974, era 25 vezes maior do que em 1950. No

mesmo período, o consumo de petróleo na Europa Ocidental aumentou de 14 vezes.

A crise energética, sobreposta ao grande desafio da explosão demográfica, ao espectro da pobreza e da fome em muitas regiões, à recessão econômica, à inflação e ao desemprego, pode lançar o mundo em uma catástrofe de gigantescas proporções, de consequências imprevisíveis.

Todos estão no mesmo barco, atravessando forte tempestade em mar revolto. É preciso empenho para evitar o naufrágio, do qual, por certo, não haverá sobreviventes.

1.3 CRISE DE ENERGIA, OU CRISE DE PETRÓLEO?

Nos anos recentes, já esta-se acostumado a ouvir afirmativas de que vive-se uma "crise de energia". Este tema é frequentemente abordado em documentários, programas científicos, seminários, etc. A partir de uma análise minuciosa das diversas fontes primárias de energia conhecidas, as exploradas e as que estão em exploração, conclui-se de maneira bem clara, que não esta-se vivendo uma crise de energia, pois a temos em sobra. Estamos vivendo "uma crise de petróleo". Nosso problema, especificamente é a escassez deste combustível, bem como a sua alta no mercado internacional.

Algum tempo após a chamada revolução industrial, o mundo ficou enlaçado de uma forma muito dependente em relação ao petróleo. O pior de tudo é que houve uma dependência, sem a existência de um substituto imediato.

Os futurólogos diziam e com razão, que sem o petróleo o mundo iria parar. Isto traria uma crise de vários

milhares de vezes maior do que a atual crise energética.

O crescimento tecnológico e científico, duplica-se a cada dez anos. A cerca de trinta anos que a indústria pesada, transportes de carga e passageiros crescem nesta proporção. Tal crescimento contudo, não teve muita sabedoria em seu planejamento, pois presumiu serem permanentes as reservas petrolíferas.

Diante deste quadro, de uma certa forma negativo, vê-se que a crise vivida é, essencialmente, uma crise de petróleo. O problema a se enfrentar agora é o de encontrar, através de pesquisas, combustíveis que dêem solução a curto e longo prazo para o problema em questão.

1.4 ANTECEDENTES DA CRISE

Desde o ano de 1895, quando o primeiro poço importante foi perfurado nos Estados Unidos da América, a humanidade acostumou-se a usar o petróleo.

Logo após o início de 1900, o uso deste combustível se intensificou devido as vantagens de sua utilização em relação aos até então utilizados (madeira e carvão). As vantagens técnicas, econômicas e sobretudo na política internacional abriram as portas para o petróleo.

Nestas condições, a prosperidade das sociedades industrializadas passou a ser suportada cada vez mais no petróleo como fonte energética, chegando-se a relegar a segundo plano o uso de fontes tradicionais, como o carvão e a madeira, e a desprezar a pesquisa de outras fontes disponíveis. Bem pior do que isto, o petróleo era utilizado sem quaisquer medidas de conservação e economia, havendo um completo desperdício.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
Mauá

A partir do ano de 1973, pouco após a criação da OPEP, os produtos árabes, já com um certo conhecimento do poder que tinham nas mãos, começaram a reduzir o fornecimento de petróleo. Ao mesmo tempo elevaram drasticamente o seu preço conforme mostra o quadro 1. Teve aí início uma exponencial crescente de efeitos políticos e tecnológicos que ainda não teve fim.

De acordo com os quadros nºs 1, 2, 3 e o gráfico nº 1, observa-se que a crise tem seu início em 1973. De 1973 a janeiro de 1980, houve um aumento de 934% no preço médio no mercado internacional. Isto indica um crescimento médio anual de 133%! Comparando o período de 7 anos (73-80), com o período de 1950 a 1973, período de 23 anos, e que ele só aumentou 110% neste período. É notório então o fato de o mundo ter estranhado todos estes aumentos, e daí o início de uma crise política, técnica e econômica.

As medidas tomadas pelos produtores trouxeram consequências drásticas para a economia dos países industrializados, particularmente os do mundo ocidental e de maneira bem acentuada para os países em desenvolvimento não auto-suficientes na produção de petróleo.

Foi neste ponto que toda a humanidade apercebeu-se de dependência em relação a este combustível para manter seu atual sistema de vida.

Viu também a humanidade que o fácil acesso à esta fonte primária de energia não iria continuar por muito tempo. Uma vez que as suas reservas eram limitadas, conforme mostra o quadro nº 3. Sobreveio então um verdadeiro pânico pois o homem descobriu que a sociedade dependia da máquina e a máquina do

petróleo. O grande problema residia no fato de que a máquina havia sido concebida para utilizar primordialmente o petróleo como fonte de energia.

Um exemplo simples e individual da dependência primária homem-máquina-petróleo, é o automóvel, e de modo geral o transporte rodoviário. Ambos consumidores intensivos dos derivados de petróleo.

Não resta a menor dúvida que estamos realmente vivendo uma crise de petróleo e não de energia. O que ocorre é a confusão entre petróleo e energia, e este não passa de uma parcela de pouco peso na quantidade total das reservas mundiais de energia primária já identificadas e quantificadas na natureza.

1.5 *O CICLO DO PETRÓLEO*

Nos primeiros 25 anos do século atual o carvão foi a principal fonte de energia para o mundo.

Antes, a energia disponível era a energia humana, a energia do animal e a energia fornecida pela combustão da madeira.

O carvão mineral só começou a ser utilizado no século XIII. O seu consumo cresceu, progressivamente, nos séculos seguintes, substituindo a lenha e o carvão vegetal, tanto no aquecimento, como na redução de minérios, nos transportes e na indústria.

O petróleo, descoberto em 1895, na Pennsylvania, não havia ainda assumido papel de importância maior no campo dos combustíveis. O que levou o "ouro negro" a assumir, anos mais tarde,

o primeiro lugar como fonte de energia foi a substituição do carvão pelo óleo diesel nos motores de propulsão das belonaves e dos grandes navios da marinha mercante, logo depois da Primeira Guerra Mundial.

O setor industrial, ante a existência de abundantes fontes energéticas, passou a utilizá-las em larga escala. O consumo mundial de energia dobrou de 1910 a 1950, levando 40 anos. Depois, ele dobrou de novo no período de 1950 a 1970, isto é, em apenas 20 anos.

O fato de exigir uma quantidade mínima de mão-de-obra, o extraordinário número de aplicações que oferecia e, talvez mais importante do que isso, o baixo custo do produto e a abundância proporcionada pela descoberta de imensos depósitos, tudo convergiu para tornar o petróleo e seus derivados a forma mais desejável e mais importante de energia.

A abundância incentivou também a petroquímica. Os plásticos, as fibras sintéticas, os fertilizantes nitrogenados etc. vieram a constituir a base de uma nova indústria química de enormes proporções, cujos produtos promoveram uma verdadeira revolução em diversos aspectos de nossa vida.

Na grande conflagração que abalou o mundo durante seis anos - de setembro de 1939 a maio de 1945 - o petróleo foi um dos fatores mais decisivos no desfecho de todas as batalhas terrestres, aéreas e navais travadas nos extensos teatros de operações em que se desenrolou a guerra.

Depois do gigantesco conflito, o aceleramento da expansão industrial fez crescer espantosamente a fome de energia no mundo inteiro e, desde então, o petróleo passou a ser a principal força propulsora do progresso.

A produção de energia no mundo sempre foi abundante e contou com matérias-primas de baixo valor, incentivando, desta forma, um consumo sempre crescente. O aparecimento do petróleo como fonte produtora de energia contribuiu substancialmente para a manutenção de baixo custo, inclusive concorrendo com o carvão em várias aplicações deste produto.

A produção mundial de óleo acompanhou o ritmo de demanda e em certas ocasiões a oferta chegou a ser maior do que a procura. Oito bilhões de barris de petróleo foram consumidos pelo mundo em 1960; 17 bilhões de barris em 1975 e, possivelmente, 30 bilhões de barris serão consumidos em 1990: um aumento de quase quatro vezes o consumo de petróleo e gás em 30 anos.

O carvão, que havia sido a principal fonte de energia, ainda era responsável por 47% do consumo mundial de energia em 1960, mas em 1976 caiu para 30%.

Em 1960, a participação do petróleo no consumo mundial de energia já era de 48%. Dez anos depois, a participação havia aumentado para 63%; e em 1975 já estava em 67%. Até o ano 2000, os hidrocarburetos (petróleo e gás natural) deverão atender, ainda, a cerca de 60% das necessidades energéticas do mundo.

O período que se desenrolou após a Segunda Guerra Mundial - de 1945 a 1970 - caracterizou-se pelo crescente consumo de petróleo em todo o mundo. A descoberta de grandes jazidas no Oriente Médio e no Caribe possibilitou a intensificação do consumo, principalmente nos países mais desenvolvidos, que não se aperceberam da crescente dependência em que estavam ficando a um único produto energético que não existia abundantemente em toda parte, embora fosse então muito barato. Entre 1945 e 1950,

o preço do barril contendo 158 litros de petróleo cresceu apenas de 1,05 para 2,75 dólares.

No começo da década de 70, as reservas mundiais de petróleo estavam avaliadas em 670 bilhões de barris. Aproximadamente, 53% destas reservas estão localizadas no Oriente Médio; 16% na África; 15% no bloco comunista (URSS e Europa Oriental); 8% na América do Norte; 5% na América Latina; 2% no Extremo Oriente e Austrália e, finalmente, 1% na Europa Ocidental.

A Arábia Saudita sozinha dispunha de um potencial de 137 bilhões de barris, quase tanto quanto o resto do mundo, com exceção dos outros países árabes. O Kuwait vinha em seguida, com 74 bilhões de barris, e o Irã e o Iraque logo após, com 62 bilhões e 33 bilhões, respectivamente. Depois é que estavam os EUA, com 36 bilhões de barris, e a Rússia, com 42 bilhões.

Os três maiores campos petrolíferos até hoje conhecidos estão situados em redor do Golfo Pérsico (ver o quadro nº 4). O de El Ghuar, na Arábia Saudita, é o maior de todos. O de Borkan, no Kuwait, é igual à totalidade das reservas dos Estados Unidos. O terceiro é o de Kirkuk, no Iraque.

As maiores jazidas até hoje conhecidas estão situadas na bacia do Golfo Pérsico (Arábia Saudita, Kuwait, Iraque, Irã, etc.); na sinclinal que acompanha as montanhas rochosas da América do Norte (México, Estados Unidos e Canadá); na bacia do Mar Cáspio e no Cáucaso; e, finalmente, na sinclinal que acompanha a faixa orogênica da Cordilheira dos Andes, desde o lago Maracaibo, na Venezuela, até a Patagônia.

A bacia do Golfo Pérsico e a bacia do lago Maracaibo são duas regiões riquíssimas de óleo, nas quais a produção atinge níveis elevadíssimos.

Em outras regiões, tanto em terra como no mar, a busca do petróleo tem encontrado depósitos petrolíferos, seja em estado sólido (xisto e carvão), seja em estado líquido (lençois de óleo), seja em estado gasoso (gás natural).

Jazidas propriamente ditas, além das já conhecidas, ainda não foram descobertas, apesar do grande empenho geral.

A produção mundial de petróleo, no ano de 1972, atingiu a 18,7 bilhões de barris, dos quais 8 bilhões foram do Oriente Médio e África do Norte; 4,2 bilhões dos EUA e Canadá; 3,3 bilhões da Rússia e outros países do bloco socialista; e, finalmente, 3,2 bilhões da América do Sul, Europa, África Central e Sudoeste da Ásia.

A abundância de óleo subsistirá ainda por alguns lustros, mas os altos níveis de consumo, por certo, provocarão fortes tensões sobre o preço, muito antes do esgotamento das jazidas, como já vem acontecendo desde o final de 1973.

A escassez está longe de ser o fator mais importante da atual crise de petróleo que ocorre no mundo, cuja causa principal é, na realidade, a transferência do centro de decisões dos maiores consumidores (EUA, Mercado Comum Europeu e Japão) para os países produtores que integram a OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), constituída de 11 países: Irã, Iraque, Kuwait, Arábia Saudita, Venezuela, Argélia, Abu Dabi, Quatar, Nigéria, Indonésia e Líbia.

As previsões sugerem que a contribuição da OPEP para o suprimento mundial de petróleo em 1985 será da ordem de 55 a 64 por cento. O Oriente Médio e o Norte da África poderão representar 43 a 54 por cento da produção de petróleo em 1985.

Daí em diante, na falta de imensas descobertas, apenas os países do Golfo Pérsico contarão com uma capacidade ociosa e a importância da Arábia Saudita se tornará assustadora.

À medida em que aumenta o consumo de energia, o fluxo de petróleo das regiões produtoreas para as consumidoras se torna cada vez maior.

Os transportes marítimos são um dos fatores aglutinantes e talvez o mais importante elo entre os povos e as nações da comunidade mundial.

Os principais produtos transportados pelo mar - o petróleo, os minérios, o carvão e os cereais - pelo que significam para a sobrevivência de toda a Humanidade, ilustram essa tese.

O petróleo, com uma participação de mais de 5% no transporte oceânico mundial, continuará, sem dúvida, a ocupar posição proeminente no transporte marítimo, ainda por algum tempo.

Apenas um pequeno número de países exportam petróleo em quantidade significativa: Arábia Saudita, Kuwait, Irã, Iraque, Venezuela, Argélia, Líbia, Nigéria e Indonésia.

O maior consumidor de petróleo no mundo são os Estados Unidos que, em 1985, talvez tenham de importar mais da metade do seu suprimento. O Japão importa 99%. A dependência da Europa Ocidental é pouco inferior, da ordem de 96%. Embora com uma economia que pode-se considerar forte, eles sentiram fortemente o aumento dos preços.

O "preço de referência" do petróleo da Arábia Saudita foi aumentado para US$ 11,651 por barril, o que representou uma elevação de 128% sobre o preço estabelecido em 16 de outu-

bro (US$ 5,1 por barril) e de 350% sobre o preço vigente em 1º de janeiro de 1973, que era de US$ 2,5 por barril.

O estabelecimento de novos preço tão elevados, juntamente com determinadas restrições à produção e à exportação, formaram um quadro pouco alentador, que fatalmente deveria ter profundas repercussões sobre o comércio mundial do produto.

Essa súbita elevação interrompeu um processo de evolução na economia internacional que vinha ocorrendo desde o início da década de 60, quando nações desenvolvidas e em desenvolvimento encontravam um campo adequado para vigoroso crescimento.

As consequências foram imediatas, envolvendo países industrializados e muitas outras nações não produtoras de petróleo numa grave crise econômica.

Para os países desenvolvidos que necessitavam de fornecimento externo de petróleo, como os Estados Unidos, o Japão e as nações da Europa Ocidental, o fenômeno representou drástica redução nas atividades econômicas, aumento da pressão inflacionária, expansão da taxa de desemprego e desequilíbrio nas atividades de comércio exterior.

Os Estados Unidos e o Japão, em 1974, tiveram suas taxas de crescimento econômico reduzidas para 2,1% e 1,8%. A inflação nos principais países industrializados apresentou índices superiores a 10%. O aumento das taxas de desemprego, entre 5% e 8%, provocado pela recessão, continuou em 1975.

Mas foram os países em desenvolvimento não produtores de petróleo que tiveram suas economias mais duramente afetadas. Enquanto os países industrializados sofreram mais as consequências da falta de petróleo, as nações em desenvolvimento

foram mais atingidas pelo aumento no preço do produto.

Quem está pagando caro nesse jogo são os países importadores de óleo: a Europa Ocidental, o Japão, quase todos os países em desenvolvimento e, principalmente, os países mais pobres e subdesenvolvidos.

Os países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, que compõem o chamado Terceiro Mundo, em grande parte situados na zona intertropical dos continentes, também denominada de periferia da economia mundial, são os mais expostos a impactos e pressões de toda a espécie, como a que atualmente sofrem com a crise do petróleo.

A dependência dos países consumidores é inoxorável e extremamente constrangedora, inclusive pela falta de segurança de fornecimento consequente da ameaçante instabilidade do Oriente Médio.

Esta situação poderá perdurar até a década de 90, quando se espera que o maior aproveitamento da energia nuclear, o aumento do potencial hidrelétrico instalado, a liquefação de carvão e o recurso a outras fontes conseguirão reduzir a prepoderância do petróleo, cuja posição dominante no suprimento total de energia está entretanto assegurada, pelo menos até o fim do século.

Seria difícil analisarmos todos os países com respeito a depedência em relação ao petróleo. Vamos então tomar dois países bastante representativos do mundo industrializado, e tomá-los como base. Estados Unidos e Inglaterra.

Os gráficos nºs 2 e 3 mostram as participações percentuais de cada combustível no consumo total de cada um destes países, cobrindo o período que vai de 1850 até o início da

década de 80.

Como pode-se observar nos Estados Unidos, em 1850, a principal fonte de energia era a queima de madeira, com aproximadamente 90% do total, o que o caracterizava praticamente como uma sociedade agrária.

Entretanto, a partir daquela época, verificou-se uma profunda transformação da economia norte americana, com um forte processo de industrialização que motivou a substituição da madeira pelo carvão como fonte energética. Desta forma o crescimento do carvão foi quase exponencial, e, em 1910 atingiu o pico de sua participação, fornecendo 75% das necessidades energéticas Norte-Americanas. Contudo, desde o século passado que o petróleo já havia entrado em uso, e passou a ocupar o lugar do carvão cada vez em maior quantidade. Desta maneira, no início dos anos 70 a energia proveniente do carvão havia caído para 20% do total, enquanto o petróleo e o gás natural cobriam mais de 70% do consumo, o primeiro com mais de 40% e o segundo com cerca de 30%.

É necessário ressaltar qui, que as reservas de carvão nos Estados Unidos são superiores as do petróleo. Em vista disso, concluimos que foi feita a escolha pelo petróleo em detrimento do carvão. Nota-se ainda que as demais fontes como nuclear, hidráulica, em 1970 não tinham participação expressiva no consumo global, como não tem ainda hoje.

Quanto à Inglaterra, a situação difere um pouco, devido ao fato de que em 1850 este país já tinha ultrapassado a era da madeira, e sua principal fonte energética era o carvão.

O carvão como fonte primária de energia havia permitido, sustentado, e ampliado a chamada revolução industrial que

havia sido iniciada a partir da descoberta da máquina a vapor na segunda metade do século XVII e que usando como fonte energética primária a queima de madeira, provocara a quase total destruição das suas reservas florestais. O carvão continuou como rei até 1850, onde vemos o início de seu declínio.

A exemplo dos Estados Unidos, o aumento da utilização do petróleo na Inglaterra foi também uma questão de opção, pois a Inglaterra possui também enormes reservas de carvão. Por outro lado, a participação de outras fontes primárias no consumo energético da Inglaterra ainda é insignificante.

O que aconteceu nestes dois países espelha praticamente o comportamento generalizado de todas as nações no que se refere a opção feita pelo petróleo como principal fonte de energia. É certo que o petróleo apresentava vantagens político-técnico-econômicas capazes de justificar a ampliação do seu uso; entretanto, da forma como agiu, a Humanidade procedeu de modo imaturo, pois um período relativamente curto, aumentou enormemente a sua dependência em relação a esse combustível, sem verificar suas reservas limitadas em relação ao aumento do consumo.

A fim de termos uma idéia mais clara das reservas mundiais de petróleo, é bom observar o quadro nº 5. Evidentemente que este quadro não dá o panorama exato, uma vez que existem poços a serem perfurados, e a demanda também é sempre crescente. Contudo ele nos dá uma idéia da necessidade de medidas não só de conservação, mas também de otimização em relação ao seu uso.

1.6 O PROBLEMA ENERGÉTICO NO BRASIL

Durante muitos anos o Brasil foi sustentado exclusivamente pelo café, desde o segundo quartel do século passado. Facilmente adaptado ao clima a ao solo da província fluminense, os cafeeiros desenvolveram-se com grande desembaraço em quase toda a extensão do vale do rio Paraíba do Sul, cuidados inicialmente pela mão-de-obra escrava.

Em 1930, o Brasil continuava a ser um país predominantemente agrícola, com uma população rural muito superior à população urbana. O comando político permanecia nas mãos dos grandes proprietários, como acontecera no Império, e assim os interessados individuais e regionais continuavam sobrepondo-se aos interesses nacionais, que eram até mesmo desconhecidos de grande parte do povo.

O volume da obra a realizar nos setores básicos da infra-estrutura nacional, tais como produção, transportes, educação e energia, era muito grande, consequência não só das deficiências existentes, como também da imensidão territorial do País e das exigências do rápido crescimento populacional.

Depois da Segunda Guerra Mundial, ao verificar que o seu atraso em relação às nações mais adiantadas vinha aumentando continuamente, muitos países subdesenvolvidos, inclusive o Brasil, decidiram fazer um gigantesco esforço para não ficarem muito distanciados das conquistas da civilização.

Os empreendimentos realizados nas duas últimas décadas, em quase todos os setores, principalmente nos da produção industrial, na vastíssima área dos transportes, no sofisticado campo das comunicações e no quadro energético, revelam a

ocorrência de uma admirável transformação da estrutura e da fisionomia do País, com reflexos bastante significativos, não só para o desenvolvimento econômico e social, como para a própria integração e segurança nacional.

A expansão da indústria automobilística colocou nossa frota de veículos entre as maiores do mundo, em apenas dois decênios.

A Petrobrás, em apenas 20 anos, tornou-se a maior empresa nacional e um grande instrumento do progresso do País, principalmente depois que o nosso parque de refinarias passou a processar 100% do óleo consumido, cujos subprodutos a própria companhia se encarregou de distribuir através de postos de venda instalados por todo o território nacional.

O consumo de petróleo que, em 1964, era de 112 mil barris por dia, no ano de 1979, atingiu a mais de 1 milhão de barris, obrigando-nos a fazer gastos cada vez maiores com a compra desse produto no mercado mundial, para atender à demanda muito superior à produção nacional, apesar do grande empenho pela descoberta de novas fontes.

A partir de 1974, a reviravolta econômica mundial nos obrigou a uma nova forma de adaptação. O estabelecimento dos novos preços do petróleo, juntamente, com determinadas restrições à produção e à exportação, criaram um quadro que haveria de ter profundas repercussões sobre o consumo mundial do petróleo e por certo viria desequilibrar a economia de muitos países.

Todas as nações importadoras de petróleo tiveram um preço a pagar pela alta do custo ocorrida a partir de 1º de janeiro de 1974. Os países ricos mais desenvolvidos possuíam

recursos para pagar à vista; os países subdesenvolvidos, todavia, não tinham outra alternativa senão a de pagar a prazo, aumentando substancialmente seu endividamento.

A economia brasileira, com sua responsabilidade de criar mais de 1 milhão de novos empregos por ano, não poderia adotar o ajustamento pela via de recessão. Ao lado do problema econômico figurava o problema social e, também, o problema de reordenação do sistema político, que a Revolução estava ansiosa para realizar de forma acertada, a fim de que sua obra não ficasse incompleta nem deformada.

Nossa despesa com a importação de petróleo, que em 1973 foi de 680 milhões de dólares, no ano de 1979 atingiu a 6,4 bilhões de dólares, em 1980 chegou a 9,5 bilhões e em 1981 a 10,000 bilhões baixando em 1982 para 9,6. Paralelamente, foram crescendo também a taxa de inflação e a dívida externa.

Estes dados, por si sós, expressam de forma incontestável os desastrosos reflexos da crise do petróleo sobre a marcha do desenvolvimento do Brasil.

Até o final do ano de 1973 o mundo se aproveitou, por várias décadas, de uma situação em que a energia fóssil era muito barata, o que favoreceu a estruturação de uma economia internacional e de economias nacionais de cada país, com base no uso excessivo dos recursos energéticos primários, especialmente o petróleo.

Nos últimos dez anos, o preço do petróleo já subiu, entretanto, mais de dez vezes, isto é, mais de 1000%, atingindo a todos e mais acentuadamente os países em estágio de desenvolvimento como o Brasil, no qual aproximadamente a metade da energia consumida tem origem no petróleo, conforme ilustra o quadro

nº 6. O quadro nº 7 dá o consumo no mundo.

Praticamente só se começou a tratar do problema do petróleo no Brasil em 1938, quando foi criado o Conselho Nacional do Petróleo. Pouco depois, entretanto, no dia 29 de janeiro de 1939, os jornais publicavam a sensacional notícia de que o petróleo começara a jorrar de um poço de Lobato, cuja perfuração atingira apenas a 210 m de profundidade.

Em face do resultado alcançado nas perfurações efetuadas no Recôncavo Baiano, logo depois da guerra, o CNP foi autorizado a montar uma pequena refinaria em Mataripe, com capacidade para destilar inicialmente 2.500 barris de óleo por dia, extraídos dos poços de Candeias, Itaparica e D. João, podendo a capacidade de produção da usina vir a ser ampliada logo em seguida para 5.000 barris, a fim de suprir as necessidades dos Estados da Bahia, Sergipe e Alagoas.

No ano de 1946, o Governo promoveu uma concorrência para construção de duas outras refinarias nacionais, sendo uma em Manguinhos (RJ) e outra em Capuava (SP), com capacidade para processarem 10 mil e 20 mil barris de óleo por dia, respectivamente.

No ano seguinte (1947), o Governo decidiu comprar na França uma refinaria maior, com capacidade para destilar 45 mil barris de óleo por dia, a fim de ser instalada em Cubatão, nas proximidades de Santos (SP), resolvendo também adquirir 21 petroleiros para serem usados no transporte de óleo importado e na navegação de cabotagem.

Poucos anos depois, em 1953, o Congresso Nacional promulgou a Lei nº 2.004, instituindo o monopólio estatal no campo da exploração de petróleo em nosso país, criando também a

Petróleo Brasileiro S/A (Petrobrás), com a finalidade de tratar da propescção, da refinaria e do transporte de petróleo no Brasil.

Com o funcionamento da usina de Cubatão, cuja instalação fora concluída no ano de 1953, e a inauguração das usinas de Capuava e Manguinhos em 1954, além da ampliação da refinaria de Mataripe, entramos na fase da industrialização do petróleo, refinando, no ano de 1955, 90 mil barris de óleo por dia.

Daquele ano (1955) até hoje, o nosso consumo de combustível, lubrificantes e outros derivados de petróleo só tem feito aumentar, seguindo paralelamente o crescimento da indústria automobilística, a expansão da rede rodoviária, a ampliação da petroquímica e o próprio ritmo de desenvolvimento econômico do País.

O crescimento da produção de nossos campos petrolíferos não se fez, entretanto, na mesma proporção.

Até hoje, a produção nacional não foi além de 20% do consumo, apesar do grande esforço que tem sido realizado no setor de propescção, para descoberta de novas fontes produtoras de óleo, inclusive na plataforma continental.

Nos últimos nove anos, a produção vem oscilando na faixa de 170 a 180 mil barris. Observou-se mesmo um declínio anual em torno de 1%, apesar de terem sido descobertos, nesse período, 18 poços na plataforma continental.

Assim, subsiste ainda a grande disparidade entre a produção e o consumo de óleo, o que nos tem obrigado a importar anualmente cerca de 80% da quantidade de petróleo que precisamos para abastecer o mercado interno.

Com a decisão tomada em junho de 1979, pela Comissão Nacional de Energia, limitando as importações de petróleo a 960 mil barris por dia, o consumo nacional de combustíveis só ultrapassaria de um milhão cento e quarenta mil barris por dia se a produção nacional fosse aumentada.

De qualquer modo, para que o País continue importando 960 mil barris de petróleo por dia, a preços majorados periodicamente, o recurso mais indicado é aumentar as exportações, adicionando-se às nossas vendas externas a importância em dólares correspondente aos aumentos ou, então, limitar ainda mais o volume das importações, o que foi decidido pela Comissão Nacional de Energia, em janeiro de 1981, ao reduzir o referido limite para 750 mil barris por dia, nos primeiros quatro meses do ano, quando o preço médio do petróleo já deverá ser de US$ 36 por barril.

A extração de petróleo é uma atividade aleatória e incerta, sujeita a fatores imponderáveis, apesar do contínuo aperfeiçoamento dos processos de pesquisa e lavra. Muitas vezes têm sido consideradas estruturas geológicas promissoras, mas o petróleo ou lá não existe, ou não se acumulou em volume que justifique uma exploração econômica.

Não se pode, portanto, fixar prazos para se alcançar a auto-suficiência na produção nacional de óleo ou mesmo se afirmar que essa auto-suficiência será alcançada algum dia.

Há cerca de 40 anos estamos procurando jazidas de petróleo em nosso território. As prospecções foram incentivadas a partir de 21 de janeiro de 1939, quando se encontrou óleo em um poço situado na localidade do Lobato (Bahia), em cuja área

surgiram outros depósitos posteriormente.

A Petrobrás tem um grande acervo de realizações no setor de refinação, no setor de transporte de óleo e no setor de distribuição de subprodutos do petróleo, mas, no setor de produção de óleo, ela ainda não conseguiu dominar a estrutura geológica de nosso imenso território, rico em muitos recursos naturais, mas infelizmente pobre quanto à existência de jazidas petrolíferas, conforme tem demonstrado o resultado do intenso trabalho que vem sendo realizado, durante vários anos, no setor de prospecção.

A tese de que o Brasil dificilmente, por suas características geológicas, poderá ser auto-suficiente em petróleo não é novidade e vem sendo defendida há muito tempo por diversos técnicos da própria empresa.

Até o ano de 1990, o petróleo deverá continuar liderando a participação no consumo de energia no Brasil, com cerca de 47%, vindo, a seguir, a energia hidrelétrica, com 33%; o carvão, com 10%; a energia nuclear, com 5%; e, finalmente, os resíduos vegetais, também com 5%.

1.7 FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

Estas fontes existem e são perfeitamente conhecidas e identificadas, suficientes para atender as necessidades do homem. Assim, o problema real a ser enfrentado não é o de procurá-las e sim o de saber como fazer o seu bom aproveitamento, através do desenvolvimento de tecnologias específicas. É claro que isto levará alguns anos até se tornar realidade. Mas, graças à própria "crise do petróleo", ainda se dispõe de tempo

razoável para se dominar as novas técnicas e se obter uma transição, da dependência do petróleo para um conjunto mais diversificado de fontes energéticas, sem a obrigação de passar por maiores traumas e sacrifícios.

E quais seriam estas fontes alternativas para substituição do petróleo? Os estudos desenvolvidos em diversos países, pelo mais renomados técnicos, apontam como principais soluções duradouras o carvão, a fissão e fusão nuclear, a energia hidráulica e, sobretudo, a energia solar. E para curto e médio prazos, não se poderia esquecer as medidas de "conservação, que em termos práticos se traduziriam numa verdadeira "fonte equivalente", pela eliminação dos enormes desperdícios de energia que se observa até hoje. Fora destas, outras fontes conhecidas poderão desempenhar importante papel transitório, conjuntural e localizado mas, em termos mundiais, provavelmente não terão qualquer expressão.

Uma visão bastante interessante das principais reservas mundiais de energia e, em especial, da sua utilização provável, pode ser retirada das conclusões obtidas pelo geólogo M. King Hubbert, que conseguiu determinar um conjunto de curvas mostrando, para cada fonte, a produção anual de energia prevista, cobrindo um período bastante amplo que vai até o ano 3000. Para determinação dessas curvas, Hubbert baseou-se fundamentalmente nas quantidades totais estimadas das reservas de cada fonte e numa lei de variação de consumo deduzida da experiência observada no passado.

Tais curvas estão contidas no gráfico nº 4 , onde nas abciças marca-se o tempo e nas ordenadas a produção anual em MWh. Cada curva corresponde a uma fonte primária. Aí estão

petróleo, carvão, fissão e fusão nuclear, energia hidráulica, das marés e geotérmica. E apenas para efeito de comparação, na parte superior está indicada a produção anual de energia, constante, que se poderia esperar captando e convertendo apenas 10% da energia solar que continuamente atinge o nosso planeta.

É bom fazer alguns comentários sobre estas curvas. De início, observa-se que a importância dessa ou daquela fonte é meramente uma questão de data. Enquanto em 1900 a maior produção era proveniente do carvão, situação que perdura até os nossos dias, embora hoje quase em equivalência com o petróleo, por volta do ano 3000 a energia oriunda da fusão deutério-deutério é que terá maior importância, juntamente com a alternativa solar.

Uma outra observação de caráter geral é que as fontes não renováveis, caracterizadas como combustíveis, tais como petróleo e carvão, em geral apresentam uma utilização inicialmente crescente, passando depois por um ponto de máximo, para então tender a cair até o esgotamento completo, salvo no caso da fusão D-D, que se mostra praticamente inesgotável. Mais adiante voltaremos a este ponto.

Agora, particularizando cada uma das fontes representadas, pode-se salientar os seguintes pontos mais importantes das fontes que podem ser utilizadas na substituição do petróleo:

- Carvão

O carvão tem sido a grande fonte energética da humanidade e o seu uso deverá continuar crescendo até por volta do ano 2200, quando entrará na fase de redução da sua partici -

pação relativa. Porém, manterá ainda por vários séculos uma produção importante. O maior problema do carvão é a poluição que está diretamente associada ao seu uso, questão que precisa ser devidamente considerada na ampliação do seu aproveitamento.

- Fissão Nuclear

A fissão nuclear convencional, cujo aproveitamento para fins pacíficos começou há poucos anos, apresenta vida efêmera e se esgotará já no início do próximo século. A razão disto provêm do fato de que o elemento combustível, o urânio 235, é bastante raro na natureza, compondo uma pequena parcela de apenas 0,7% das reservas totais desse minério, que não são grandes, sendo o restante constituído do urânio 238, elemento não físsil.

Não obstante, a utilização da fissão nuclear e, em especial, o domínio da sua técnica são imprescindíveis para o passo seguinte que é a fissão com regeneração, obtida através de reator especial do chamado tipo "breeder", ou regenerativo, cujo aproveitamento prático já está sendo iniciado em alguns países. A fissão com regeneração desempenhará papel importantíssimo no próximo milênio, pois ela consiste na utilização do urânio 238, que é convertido no reator para o plutônio 239, elemento transurânico físsil que vai servir como novo combustível.

Isto significa que o reator, na medida que consome o urânio 235, produz ao mesmo tempo mais combustível, o que evidentemente corresponde a uma ampliação de fato das disponibilidades dessa fonte, através da possibilidade de uso das reservas totais de urânio e não somente do seu isótopo 235.

Entretanto, é bom salientar que existem pelo menos dois problemas sérios com a fissão nuclear, os quais têm sido objeto de muita polêmica. Trata-se da segurança dos reatores e dos resíduos radioativos resultantes da "queima" do urânio, também chamados de "lixo atômico". Esses resíduos permanecem em atividade por 500 anos ou mais, provocando um grande perigo para a humanidade, sobretudo porque ainda hoje não se sabe o que fazer com eles. Na verdade, são problemas de muita importância que precisam ser resolvidos o quanto antes.

Provavelmente haverá necessidade de se atrasar um pouco os programas de implantação de usinas nucleares, até que se possa estabelecer soluções seguras para tais problemas. Mas, não parece lógico que por isso se abandone a energia nuclear, pois perigo por perigo imagina-se que seja muito maior aquele decorrente dos arsenais atômicos já armazenados pelas grandes potências e que se acham prontos para explosão a qualquer momento.

- Fusão Nuclear

A fusão nuclear, forma de obtenção de energia também chamada de temrmonuclear, é a grande esperança da humanidade em termos quantitativos, particularmente no caso da reação deutério-deutério. Conforme já salientado, as reservas mundiais desse isótopo pesado do hidrogênio (H^2) são quase inesgotáveis, pois ele é muito abundante nos oceanos. Estima-se que um quilômetro cúbico de água do mar possui deutério suficiente para produzir tanta energia quanto todo o petróleo que havia sido acumulado pela natureza. Entretanto, para que essa energia se torne utilizável praticamente muitos problemas científicos e

tecnológicos ainda terão que ser resolvidos e economicamente viabilizados. Por esta razão, somente dentro de uns cem anos é que se espera o início efetivo da fusão D-D para produção comercial de energia. Mas, tão logo sejam solucionados tais problemas, o seu uso crescerá com extrema rapidez.

Já a fusão deutério-trítio, este o isótopo de hidrogênio de massa 3, apresenta-se como uma reação tecnicamente menos difícil de materializar e, por isso, supõe-se que ela poderá operar comercialmente ainda no final deste século. Entretanto, o trítio não é tão encontradiço na natureza, pois é um elemento radioativo de vida curta. Mas, ele pode ser obtido artificialmente através do lítio 6, cujas reservas mundiais desafortunadamente também são parcas. É este fato que limita a quantidade total da energia utilizável através dessa forma que, não obstante, ainda é apreciável. Por esta razão, tudo indica que no próximo milênio a fusão deutério-trítio será bastante importante.

- Marés e Geotérmica

A energia proveniente das marés, mostrada no gráfico agregadamente com a energia geotérmica, apresenta-se proporcionalmente pouco relevante diante das demais fontes. Todavia, esta forma de energia, que está começando a ser aproveitada, encontra sua principal importância na possibilidade de utilização perene.

- Hidráulica

Chega-se finalmente à energia hidráulica, forma

já muito conhecida, limpa, que não causa qualquer problema de poluição e que não se esgotará, dispensando maiores comentários. Desafortunadamente, porém, em termos mundiais a energia hidráulica apresenta-se com menor disponibilidade do que seria desejado. Presentemente o seu uso ainda está crescendo mas já no início do próximo século atingirá a saturação. E isto é verdade mesmo para o Brasil, que possui talvez o maior potencial hidráulico do mundo. Até hoje, o Brasil está usando pouco mais de 10% dos aproveitamentos disponíveis, porém o ritmo da expansão está correspondendo praticamente a duplicação a cada 6 ou 7 anos, o que significa que dentro de aproximadamente 20 anos estaremos utilizando plenamente todo o nosso potencial.

- Solar

Por último, quanto à energia solar, já ressaltado no gráfico, a indicação daquilo que representa a utilização de apenas 10% do total que incide sobre a terra. A esse respeito, acrescenta-se mais algumas observações. A razão com que a energia solar chega ao nosso planeta, isto é, a sua potência média, já foi calculada e é da ordem de 173 bilhões de MW. Portanto, 10% seriam cerca de 17 bilhões de MW. Sendo a potência elétrica atualmente instalada em todo o mundo da ordem de um milhão de MW, concluímos que poderíamos multiplicar a atual geração anual de energia elétrica de toda a terra por 17.000, apenas convertendo em eletricidade os 10% de energia solar antes referidos. Esta comparação simples serve para dar uma idéia do que a energia solar significará para o futuro da humanidade.

Entretanto, para que este fim seja alcançado, ain

da terão que ser superados alguns problemas tecnológicos, entre os quais o desenvolvimento de dispositivos capazes de captar e converter grandes quantidades de energia e, também, de equipamentos para estocagem e controle dessa energia. Nesse sentido, importantes pesquisas já vêm sendo efetuadas em diversos paises.

Porém, é necessário registrar que não se poderia pensar em converter e "queimar" os 100% da energia solar que nos atinge, como se está fazendo com o petróleo, por exemplo, pois assim nada sobraria para manter a vida na face terra, que precisa do sol para o feômeno da fotossíntese, para a produção de alimentos e para a evaporação d'água que resulta no regime de chuvas, além de outras reações vitais.

1.8 CONCLUSÃO

Pelo exposto até aqui, pode-se notar que ainda resta alguns anos até que não mais tenha-se acesso ao petróleo. Nesse interim, novas fontes serão estudadas, mas há uma necessidade de se conservar e otimizar o uso dos derivados de petróleo. A conservação cabe aos órgãos governamentais, no caso Ministério das Minas e Energia, associada à Petrobrás.

A otimização do uso deve contudo ser objeto de pesquisa das indústrias concessionárias, que utilizam seus derivados na obtenção seja de vapor, energia elétrica ou os dois.

Não espera-se que o exposto neste primeiro capítulo cubra tudo sobre tão profundo tema. Deseja-se contudo ter dado uma amostra clara, e de fácil compreensão.

O objetivo deste capítulo estará concluído se após a sua leitura, o leitor sentir dentro de si a necessidade de um

programa que além de uma política ministerial de economia e conservação, houvesse também um esforço por parte de todos os sistemas consumidores dos derivados de petróleo, no sentido de otimizar seu uso.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BMI

1.9 TABELAS E GRÁFICOS

A seguir, as tabelas e gráficos mencionados nos itens anteriores.

PREÇO NOMINAL MÉDIO DO PETRÓLEO CRÚ NO MERCADO INTERNACIONAL

ANOS	PREÇO NOMINAL (US$/Barril)
1950.....	1,71
1955.....	1,63
1960.....	1,53
1965.....	1,33
1970.....	1,26
1971.....	1,66
1972.....	1,84
1973.....	2,91
1974.....	10,77
1975.....	10,72
1976.....	11,51
1977.....	13,12
1978.....	13,70
1979.....	16,97
1980.....	29,58
1981.....	34,39
1982.....	32,87

Fonte: M. GRIFFIN e H.B. STEELE ENERGY ECONOMICS AUD POLICY
Academic Press New York, 1980
Conjuntura Econômica, FGV, vários números.

QUADRO Nº 1

MERCADO "SPOT" DE ROTTERDAM				
PERÍODO	GASOLINA (US$)	ÓLEO DIESEL (US$)	ÓLEO COMBUSTÍVEL (US$)	ÓLEO CRU (árabe leve) (US$)
1980 - JAN	45,83	45,89	25,52	30,23
FEV	44,30	41,09	22,57	31,95
MAR	43,48	39,62	22,41	31,26
ABR	42,66	42,55	24,13	32,92
MAI	42,34	42,82	25,06	33,32
JUN	42,66	41,75	23,97	32,02
JUL	41,37	40,82	23,34	31,10
AGO	37,25	36,42	23,81	31,05
SET	38,55	38,01	25,40	30,87
OUT	40,66	40,15	31,44	30,29
NOV	43,48	42,82	36,11	33,84
DEZ	42,07	40,02	34,24	37,34
MÉDIA	42,05	41,00	26,50	32,18
1981 - JAN	42,19	40,95	33,77	36,18
FEV	43,48	40,55	32,99	35,59
MAR	40,90	41,09	32,84	34,97
ABR	40,66	38,55	31,59	35,15
MAI	41,23	36,15	28,32	34,11
JUN	41,01	36,15	26,15	31,55
JUL	44,07	38,15	26,15	30,95
AGO	42,78	39,22	25,06	32,24
SET	42,78	39,62	25,52	32,45
OUT	42,66	41,35	26,77	33,54
NOV	41,95	43,22	27,39	34,34
DEZ	39,49	42,95	26,45	33,42
MÉDIA	41,93	39,83	28,56	33,71
1982 - JAN	38,08	42,02	25,52	32,68
FEV	37,25	37,48	25,52	30,46
MAR	32,55	34,95	25,83	28,91
ABR	38,19	37,08	25,99	30,67
MAI	41,37	39,49	26,30	32,45
JUN	42,31	38,01	26,00	31,85
JUL	40,42	36,41	25,37	30,67
AGO	38,19	38,15	24,12	30,47
SET	39,96	40,42	25,21	32,21
OUT	39,96	41,75	26,77	33,37
NOV	36,78	39,09	25,06	33,86
DEZ	34,90	38,42	24,59	
MÉDIA	38,33	38,61	25,52	

Fonte: Platt's Oilgram Price Service

QUADRO Nº 2

QUADRO Nº 3

PREÇO MÉDIO MENSAL DE PETRÓLEO BRUTO IMPORTADO - 1976/82 - US$/BARRIL

MÊS	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
JAN	11,44	11,37	12,46	12,37	26,16	31,91	34,02
FEV	11,49	11,63	12,48	12,45	27,10	33,59	33,69
MAR	11,49	12,34	12,58	13,08	28,00	35,50	33,52
ABR	11,49	12,45	12,48	13,85	28,09	36,04	32,94
MAI	11,54	12,37	12,50	17,03	29,11	35,10	32,17
JUN	11,45	12,42	12,53	15,83	29,52	34,10	32,27
JUL	11,53	12,29	12,45	16,82	30,12	34,69	32,45
AGO	11,58	12,49	12,40	18,98	30,14	34,69	32,03
SET	11,50	12,46	12,45	20,23	31,42	33,64	32,75
OUT	11,61	12,59	12,32	19,75	31,81	35,33	33,28
NOV	11,46	12,61	12,27	20,52	31,78	33,69	32,66
DEZ	11,44	12,47	12,38	22,77	31,68	34,34	32,61

Fonte: CNP

EVOLUÇÃO DO PREÇO MÉDIO DO PETRÓLEO NOS ÚLTIMOS 12 ANOS

1970 = US$1.26 — 1982 = US$ 32.87 (2.508% de aumento)

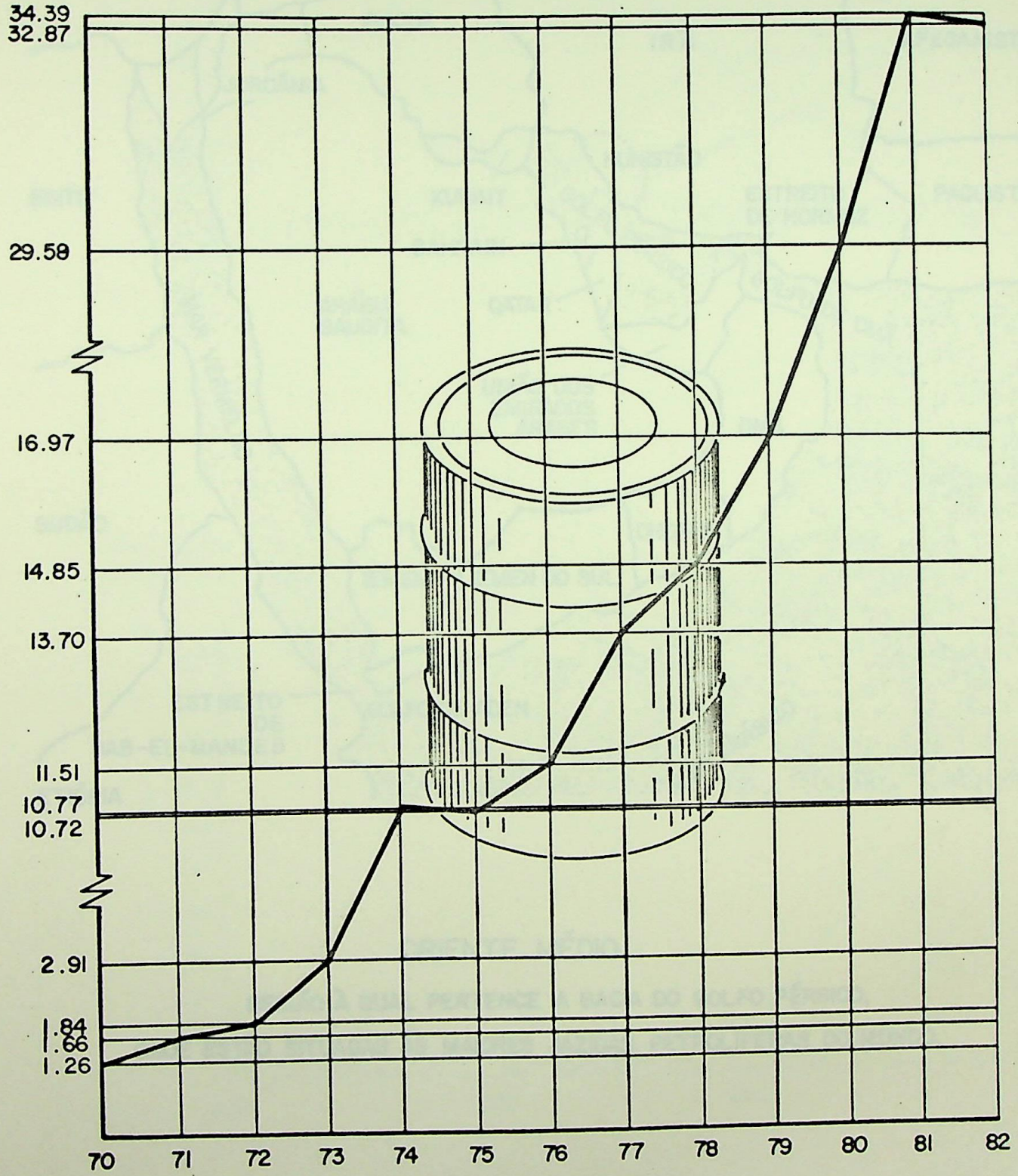
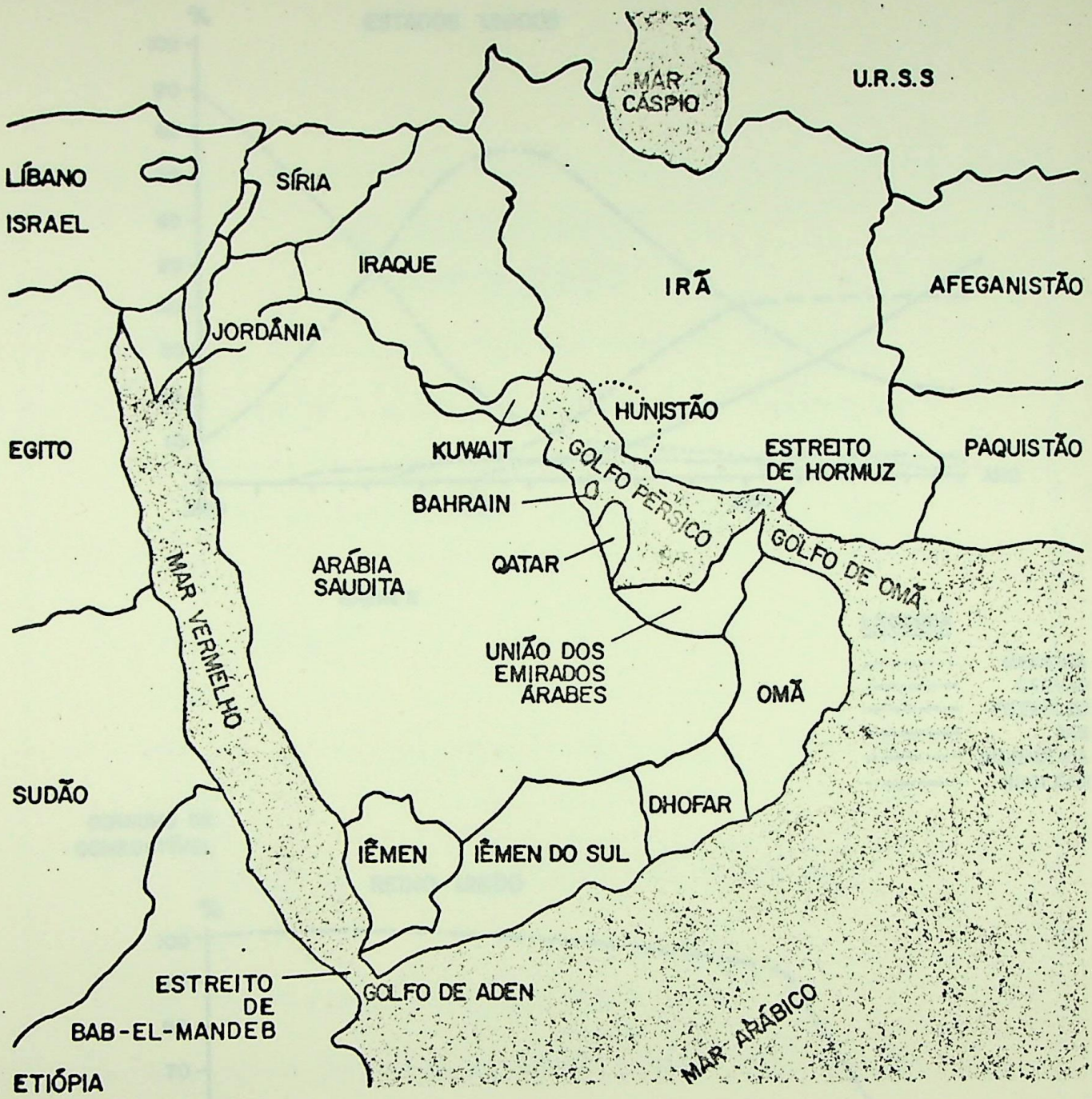


gráfico nº 1



ORIENTE MÉDIO

REGIÃO À QUAL PERTENCE A BACIA DO GOLFO PÉRSICO,
ONDE ESTÃO SITUADAS AS MAIORES JAZIDAS PETROLÍFERAS DO MUNDO.

QUADRO Nº 4

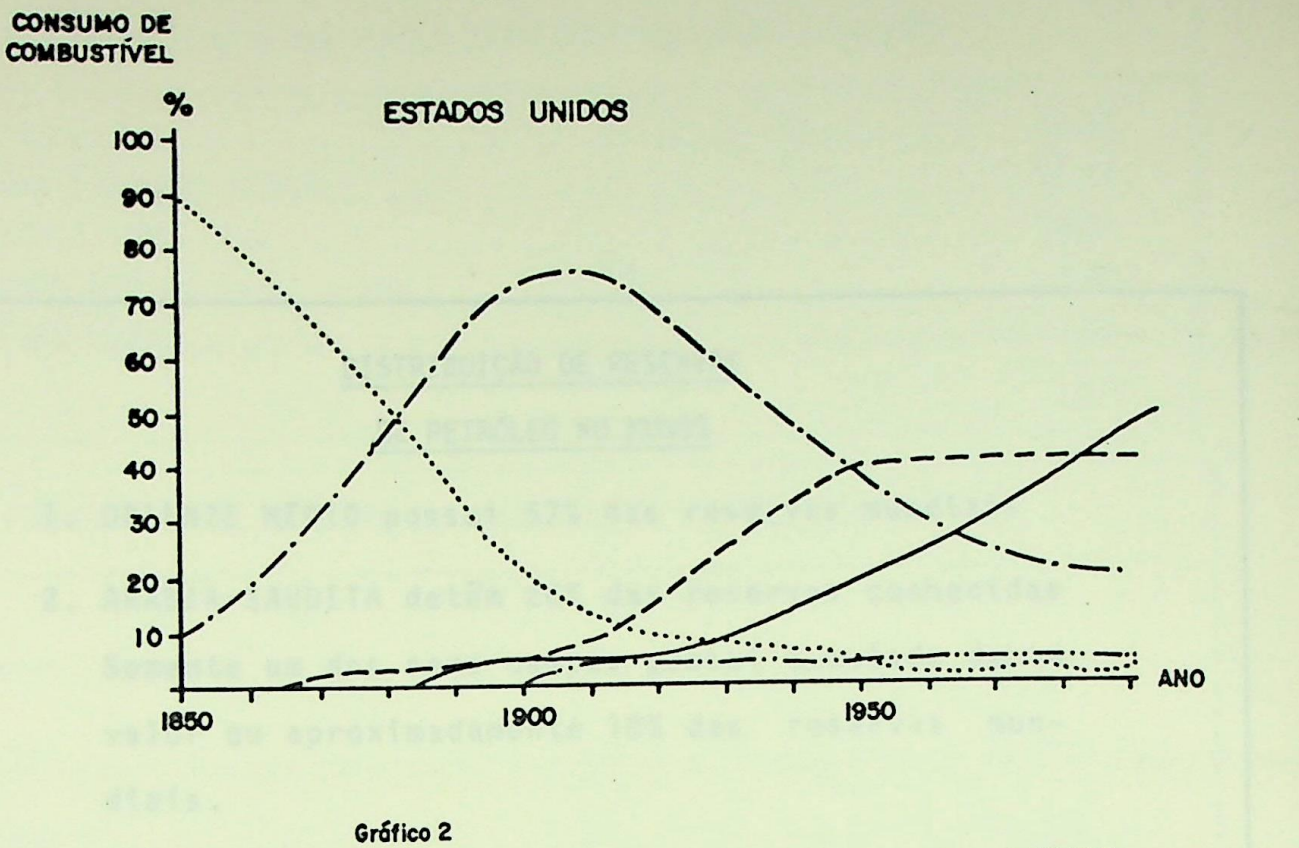


Gráfico 2

LEGENDA

MADEIRA
CARVÃO
PETRÓLEO
GÁS
HIDRAÚLICA
NUCLEAR

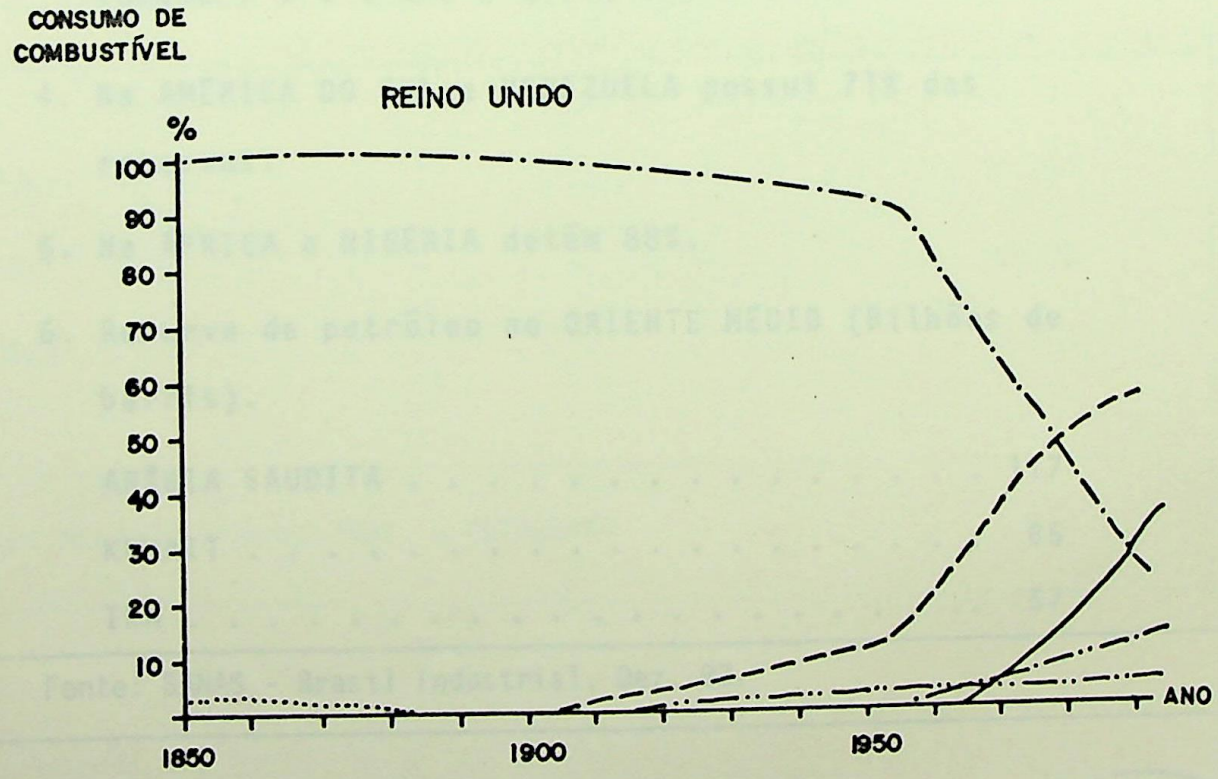


Gráfico 3

DISTRIBUIÇÃO DE RESERVAS

DE PETRÓLEO NO MUNDO

1. ORIENTE MÉDIO possui 57% das reservas mundiais

2. ARÁBIA SAUDITA detém 26% das reservas conhecidas Somente um dos seus campos possui a metade deste valor ou aproximadamente 10% das reservas mundiais.

3. ARÁBIA SAUDITA 26%
   KUWAIT 10%
   IRÃ 9%
   IRAQUE 5%

4. Na AMÉRICA DO SUL e VENEZUELA possui 71% das reservas.

5. Na ÁFRICA a NIGÉRIA detém 88%.

6. Reserva de petróleo no ORIENTE MÉDIO (Bilhões de barris).

   ARÁBIA SAUDITA 117
   KUWAIT 65
   IRÃ 57

Fonte: BANAS - Brasil Industrial, Dez. 82.

QUADRO Nº 5

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
BIM

PARTICIPAÇÃO DAS FONTES SUPRIDORAS DE ENERGIA NO PAÍS	
PETRÓLEO	49,0%
LENHA E CARVÃO VEGETAL	25,0%
ENERGIA HIDRÁULICA	21,0%
CARVÃO MINERAL (nac. e imp.)	3,2%
OUTRAS FONTES	1,8%
	100%

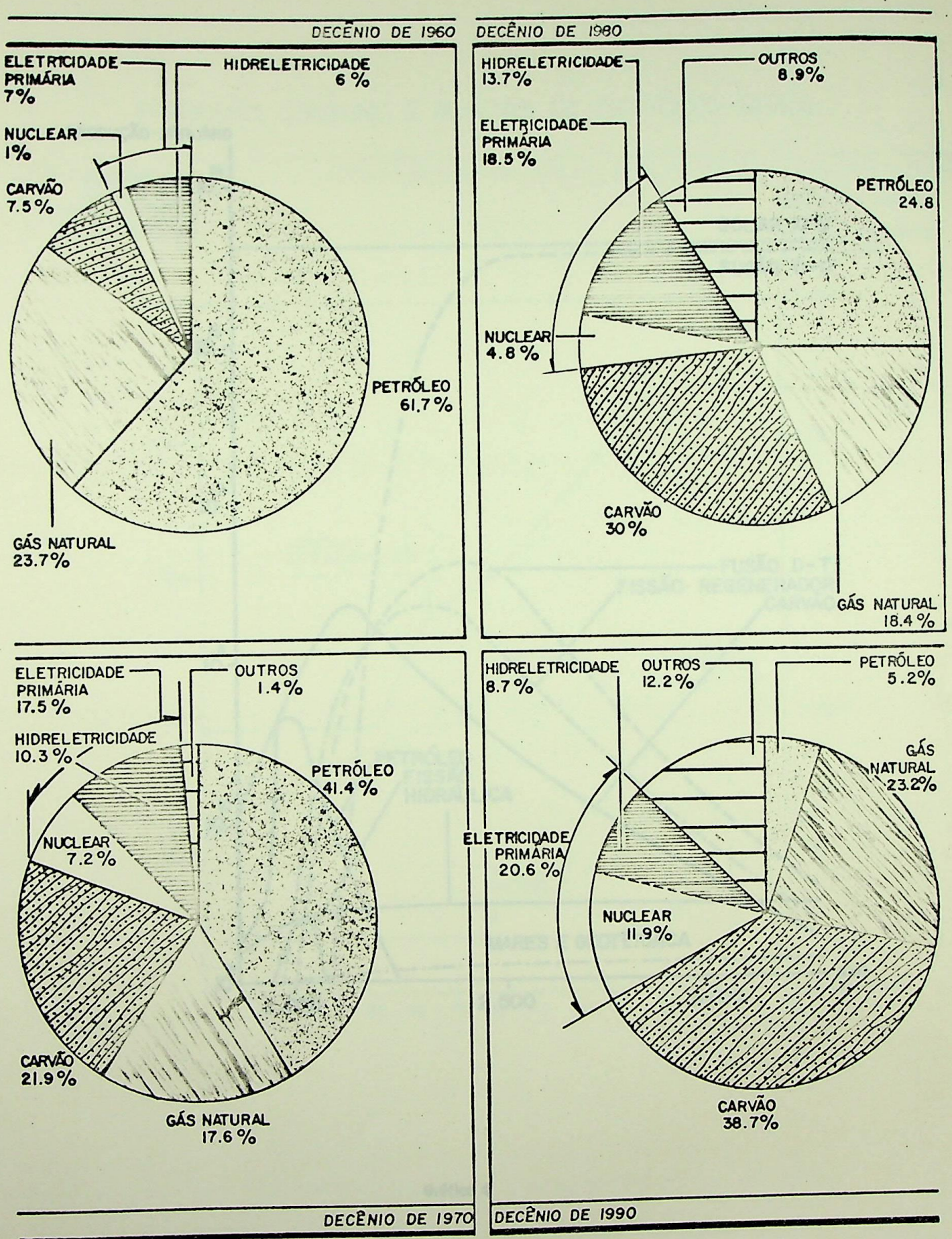
CONSUMO NACIONAL APARENTE DE DERIVADOS DO PETRÓLEO EM 1.000 m^3	
1980	63.562
1981	58.951
1982	59.089

PRODUÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL EM 1.000 m^3	
1980	10.890
1981	12.770
1982	15.531

Fonte: RELATÓRIO ANUAL 1982 - PETROBRÁS

QUADRO Nº 6

CONSUMO DE ENERGIA NO MUNDO



Fonte: BANAS - 1982

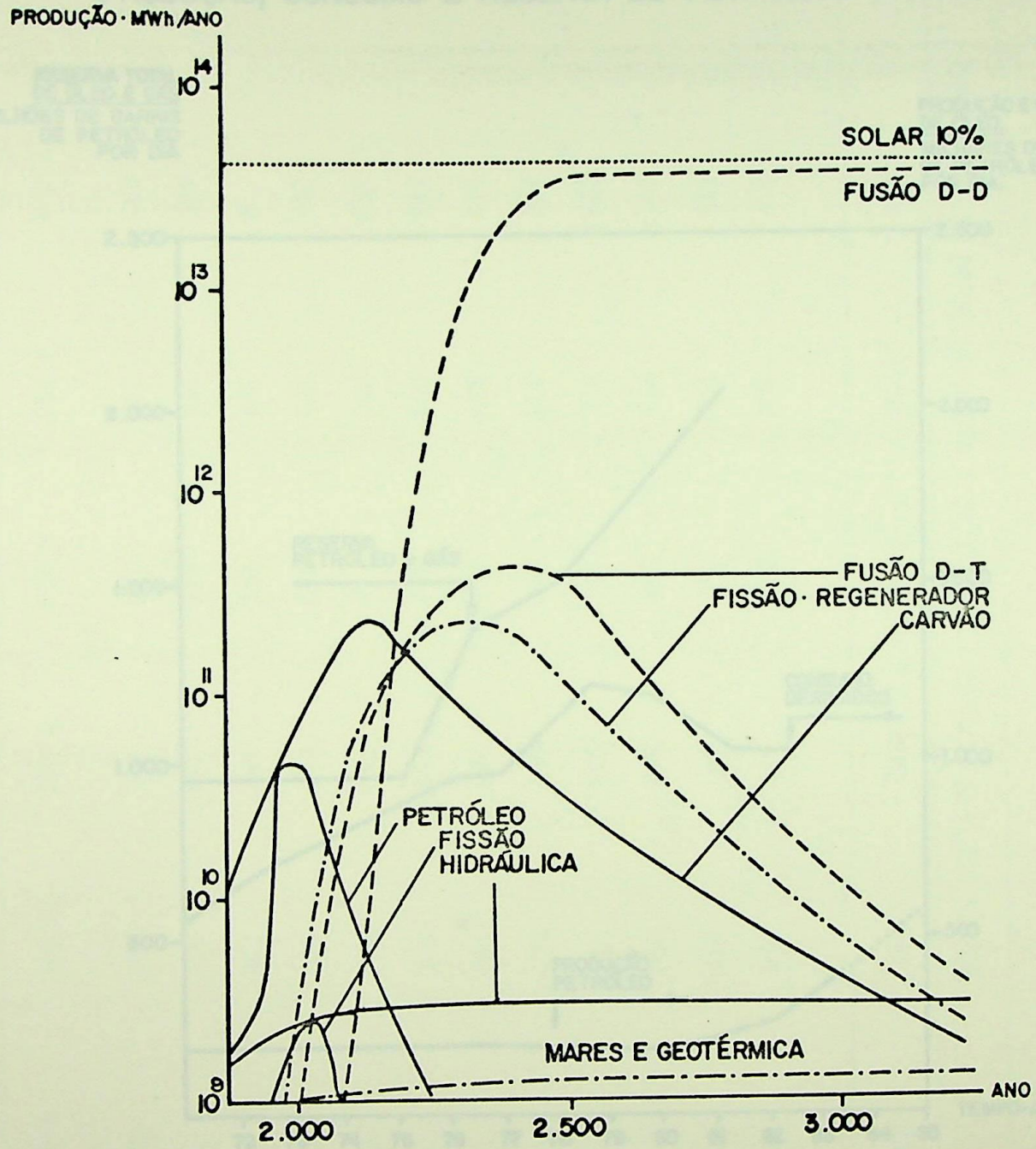
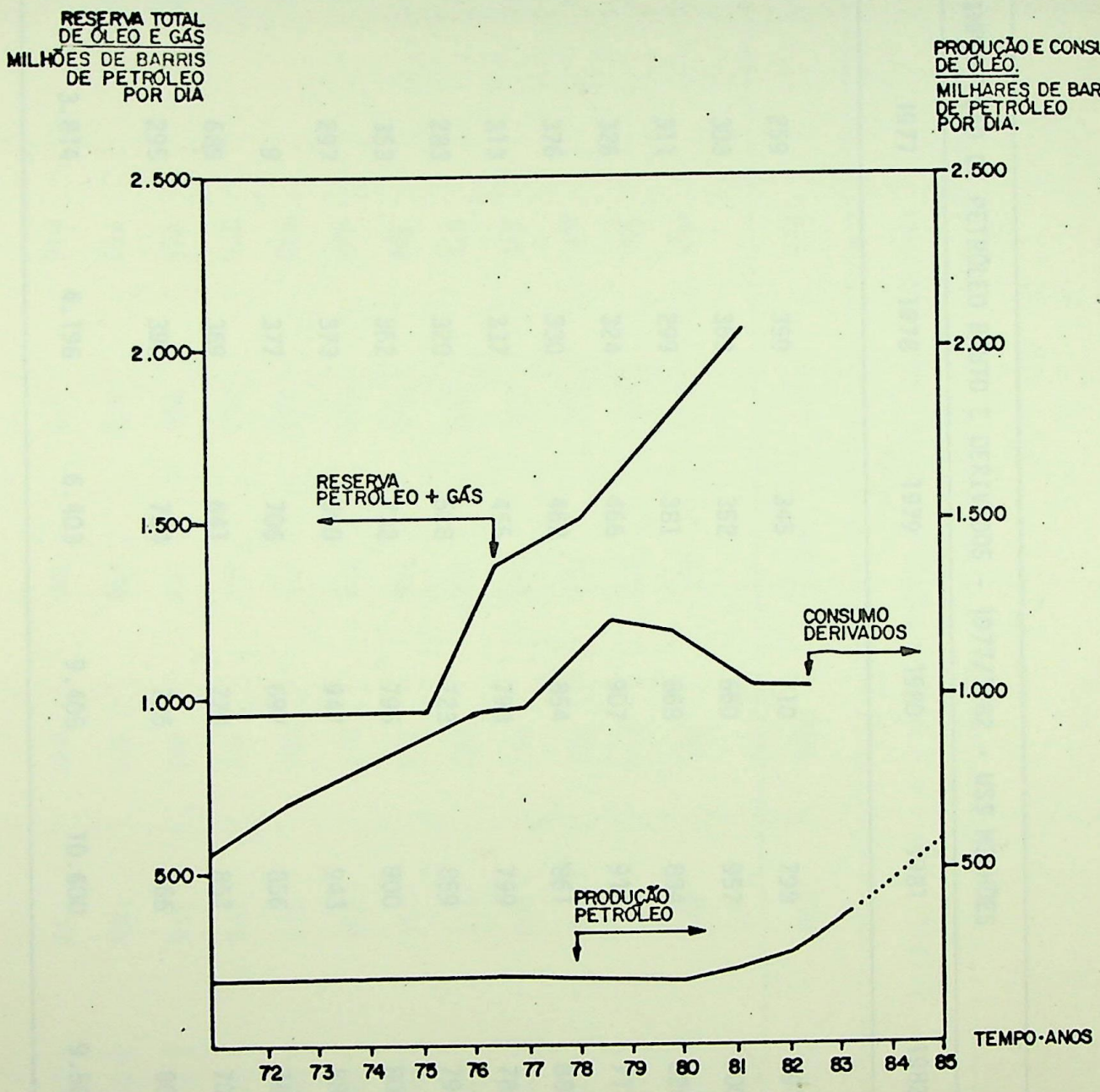

PRODUÇÃO · MWh/ANO
10^{14}
10^{13}
10^{12}
10^{11}
10^{10}
10^{9}
SOLAR 10%
FUSÃO D-D
FUSÃO D-T
FISSÃO · REGENERADOR
CARVÃO
PETRÓLEO
FISSÃO
HIDRÁULICA
MARES E GEOTÉRMICA
ANO
2.000
2.500
3.000

Gráfico 4

PRODUÇÃO, CONSUMO E RESERVA DE PETRÓLEO - BRASIL



FONTE: ENERGIA · FONTES ALTERNATIVAS - ANO 1982 · VOL. IV - Nº 22.

IMPORTAÇÃO DE PETRÓLEO BRUTO E DERIVADOS - 1977/1982 - US$ MILHÕES

MÊS	1977	1978	1979	1980	1981	1982
JAN	259	350	345	710	798	891
FEV	303	363	352	660	957	700
MAR	311	299	381	868	894	820
ABR	326	324	466	907	916	712
MAI	376	330	462	854	861	880
JUN	313	337	456	793	799	780
JUL	283	320	528	723	859	798
AGO	353	362	732	796	900	800
SET	297	373	550	947	943	883
OUT	9	377	706	697	856	788
NOV	689	369	641	720	851	709
DEZ	295	392	784	725	966	806
TOTAL	3.814	4.196	6.403	9.405	10.600	9.567

Fonte: CIEF-MF

PRODUÇÃO BRASILEIRA DE PETRÓLEO BRUTO - mil m^3 - 1976/82

MÊS	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
JAN	850	814	801	766	895	902	1.180
FEV	798	721	731	716	835	958	1.094
MAR	831	794	797	785	849	1.079	1.244
ABR	799	774	766	761	884	971	1.244
MAI	818	790	788	790	917	1.077	1.266
JUN	794	759	746	765	916	1.007	1.265
JUL	826	768	772	811	959	1.047	1.289
AGO	810	766	771	805	973	1.098	1.259
SET	776	764	754	809	802	962	1.231
OUT	805	796	806	856	826	1.102	1.340
NOV	781	773	792	855	839	1.081	1.342
DEZ	814	813	780	889	868	1.100	1.428
TOTAL	9.702	9.332	9.304	9.608	10.563	12.384	15.082

Fonte: CNP

CAPÍTULO II

O DESPACHO ÓTIMO

2.1 INTRODUÇÃO:-

Em geral o esquema de despacho consiste na escolha dos valores de geração ativa, além dos módulos das tensões, que equivale grosseiramente a um despacho de potência reativa.

O despacho escolhido deve satisfazer as equações do balanço energético do sistema, ou seja: A potência ativa gerada deve satisfazer a demanda e as perdas ocorridas no processo de transmissão. A potência reativa gerada deve satisfazer a demanda e a necessidade dela nas linhas de transmissão.

O despacho ótimo visa determinar a escolha que atenda o seguinte critério: satisfazer a demanda com um mínimo gasto de combustível.

Os métodos de despacho ótimo atualmente empregados, consideram uma demanda constante no tempo. Na prática,eles são válidos durante períodos em que a variação da carga em relação aos valores previstos são desprezíveis.

A determinação destes períodos é feita tendo em vista a natureza do sistema, a locação do período dentro da evolução da demanda e circunstâncias contingentes, as vezes imprevisíveis. Após tais períodos, a escolha deve ser mudada a fim de atender a nova situação decorrente da demanda. A isto chama-se de reprogramação do despacho.

Dentro da hipótese de demanda constante, observa-se que a demanda da potência reativa não se reflete diretamente nas máquinas primárias.

Contudo, a fixação dos módulos de tensão nas barras geradoras para atender esta demanda reativa, irá incidir principalmente na circulação de potência reativa nas linhas, e não na circulação de potência ativa. E isto é tão mais certo quanto mais firme for o sistema.

Entretanto, a circulação de potência reativa numa linha produz perdas nesta linha como se fossem watts. E tais perdas valem aproximadamente p.u.

$$R\,Q^2$$

Desta forma uma redistribuição de potência reativa muda o valor das perdas totais no sistema. Conclui-se portanto que deve existir um "perfil" de tensões nas barras do sistema que otimizem as perdas provocadas pelo fluxo de reativo.

Ora, a prática mostra que a poupança conseguida com esse "perfil" de tensões é apenas uma pequena percentagem das perdas, que por seu turno são geralmente uma pequena parcela de geração.

Conclui-se então que tal poupança não será de forma nenhuma significativa a respeito daquela conseguida com a otimização de geração ativa. Daí que um esforço feito em procura do despacho ótimo de potência reativa tenha uma remuneração bastante inferior ao correspondente em watts.

Existe ainda um outro argumento em prô de se executar apenas otimização da geração ativa. Pode ocorrer que um perfil ótimo de tensões nas barras de geração, determine nas barras de carga tensões que não satisfaçam especificações de qualidade de serviço. Desta forma, uma otimização na geração rea

tiva deverá estar acompanhada de restrições que evitem valores proibitivos para as tensões nas barras. Isto complica o método e implica maiores gastos em cálculos.

Em resumo, na prática atual o centro de despacho fixa o perfil de tensões de geração com um critério empírico. Durante o algorítimo de despacho econômico, tais valores são imaginados constantes.

2.2 *UM BREVE HISTÓRICO:-*

O problema do despacho ótimo teve seu início no momento em que duas ou mais unidades geradoras foram aplicadas a servir uma demanda menor do que a potência total dessas unidades. A situação de excesso de geração instalada, outorga ao operador a faculdade de decidir entre um cúmulo de distribuições possíveis entre as potências individuais das unidades geradoras.

Com uma infinidade de soluções, a situação é paradoxalmente incômoda, pois coloca o operador no dilema de escolher a configuração de geração mais conveniente.

Muito embora a teoria que serve de base à otimização de sistemas elétricos, seja ele gerador ou consumidor (no caso de grandes indústrias) tenha se desenvolvido de forma acelerada nos últimos vinte anos, chega-se a década de 80 com uma utilização predominante de métodos clássicos, cuja essência data de vários decênios. Os motivos da lentidão na incorporação de métodos mais modernos são vários, e as vezes difíceis de elucidar. Mas, provavelmente, o principal deles é o aspecto de segurança na operação, elemento adicional e importante que muitas vezes entra em conflito aberto com as aspirações de uma automatização sofisticada

nas funções operativas do serviço. Isso sem esquecer o gap existente entre a capacidade computacional disponível, e a possibilidade de entregar ao sistema processador com devida diligência, dados completos e confiáveis sobre a situação instantânea do sistema.

O despacho econômico remota-se aos anos vinte, quando a multiplicação de unidades instaladas deram o primeiro passo em direção ao dilema mencionado no início desta seção.

Os métodos da "etapa pré-histórica" do despacho econômico não deixam de ter uma certa vigência atual. Entre eles, destacam-se:

2.2.a O método da carga máxima:-

Neste método, a unidade mais eficiente é carregada até sua capacidade máxima (PMC), com a continuação é carregada a segunda mais eficiente, e assim por diante.

2.2.b Método da carga mais eficiente:-

Neste método a carga das unidades segue a mesma ordem em 2.2.a. Porém, o momento de começar a carregar uma nova unidade acontece quando a anterior tiver chegado a potência de máxima eficiência (PME). Se a demanda for maior que a soma dos PME de todas as unidades disponíveis, a sobre-potência remanente entre a PME e PMC é despachada na mesma ordem de incorporação.

Em 1930 descobre-se o fundamental "princípio de igualdade dos custos incrementais". A forma inicial deste concei

to foi, na verdade, "o princípio de absorção de incremento de carga", que pode ser enunciado assim:

"Quando um conjunto de máquinas atende uma demanda, qualquer incremento dela deve ser absorvida pela unidade com menor custo incremental".

Até 1931 o princípio de igualdade dos custos incrementais já era conhecido pelos operadores das principais empresas. O grande problema, porém era que embora a teoria fosse conhecida, o rápido acréscimo do número de unidades envolvidas num despacho econômico implicava um volume de cálculo da ordem de oito horas, levando em conta os recursos computacionais disponíveis.

Nessa época (1934) começa-se a considerar no problema de otimização o item de perdas de transmissão. Após métodos pioneiros, ingeniosos mais lentos, o panorama da otimização é profundamente afetado pela publicação, por Gabriel Kron no princípio da década de 50, da fórmula que expressa as perdas em função apenas das potências de geração. Este trabalho foi o fundamento dos métodos de despacho da potência ativa, completados por Kirchmayer, Stagg e por Ward.

2.3 DESPACHO ÓTIMO IGNORANDO AS PERDAS NA TRANSMISSÃO:-

Uma hipótese simplificativa, contudo um pouco drástica, é desprezar as perdas de transmissão. Neste caso, o consumo de combustível fica apenas ligado aos rendimentos energéticos que possuam as plantas geradoras no regime de operação determinado para cada uma delas. Além de significar uma solução aproximada ao caso "com" perdas, este despacho "sem" perdas for

nece um ponto inicial para aplicar o método iterativo que conduz a solução exata do caso com perdas, uma vez que com a introdução das perdas o problema torna-se não linear.

2.4 EQUACIONAMENTO DO DESPACHO:-

Uma unidade térmica geralmente tem o aspecto da figura 2.1*

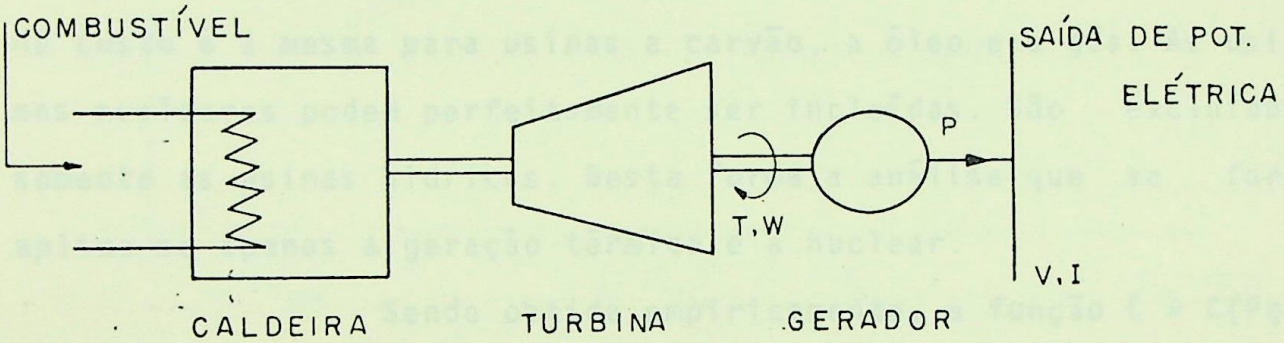


Figura 2.1

Deve-se construir uma função que reproduza o custo de combustível utilizado por unidade de tempo, e seja unicamente função das saídas.

No item 2.1 deste capítulo, ficou bem claro que o custo de funcionamento global é fortemente influenciado pela distribuição das potências ativas geradas. Outras variáveis,tais

* *no capítulo 3, vai-se considerar um elemento adicional a esta planta que será a saída de vapor para aproveitamento no processo industrial.*

como os módulos das tensões afetam o custo de forma fraca. Desta forma ao assumir-se que o custo seja uma função explícita da potência ativa gerada, comete-se um erro desprezível.

Tratando este trabalho de sistemas consumidores - produtores já existentes, não se deve preocupar com os componentes fixos da função dos custos, como salários, custo de instalação de usinas, etc. Vai-se considerar os custos que por meio de um algorítimo de otimização, se pode controlar, isto é, os custos de combustível nas várias barras de geração.

As funções de custo chamadas C = C(Pg), são sempre determinadas empiricamente. A natureza geral das funções de custo é a mesma para usinas a carvão, a óleo e a gás. As usinas nucleares podem perfeitamente ser incluídas. São excluídos somente as usinas hidricas. Desta forma a análise que se fará aplica-se apenas a geração térmica e a nuclear.

Sendo obtida empiricamente, a função C = C(Pg) se aproxima muito de uma função do segundo grau. Este fato é bem conhecido na prática. O gráfico da figura 2.2 mostra uma curva típica de custos.

Vê-se então que na região de operação da unidade geradora uma aproximação parabólica tem muito sentido. Deste modo, é possível equacionar a função C.

Para a unidade i-gesina, tem-se:

$$C_1(Pg) = A_1 Pg_1^2 + D_1 Pg_1 + Co_1 \qquad (1)$$

Afim de facilitar a nomenclatura, e para fins de simplificação no uso, substitui-se o termo $C_1(Pg_1)$ por apenas C_1. Desta forma (1) fica:

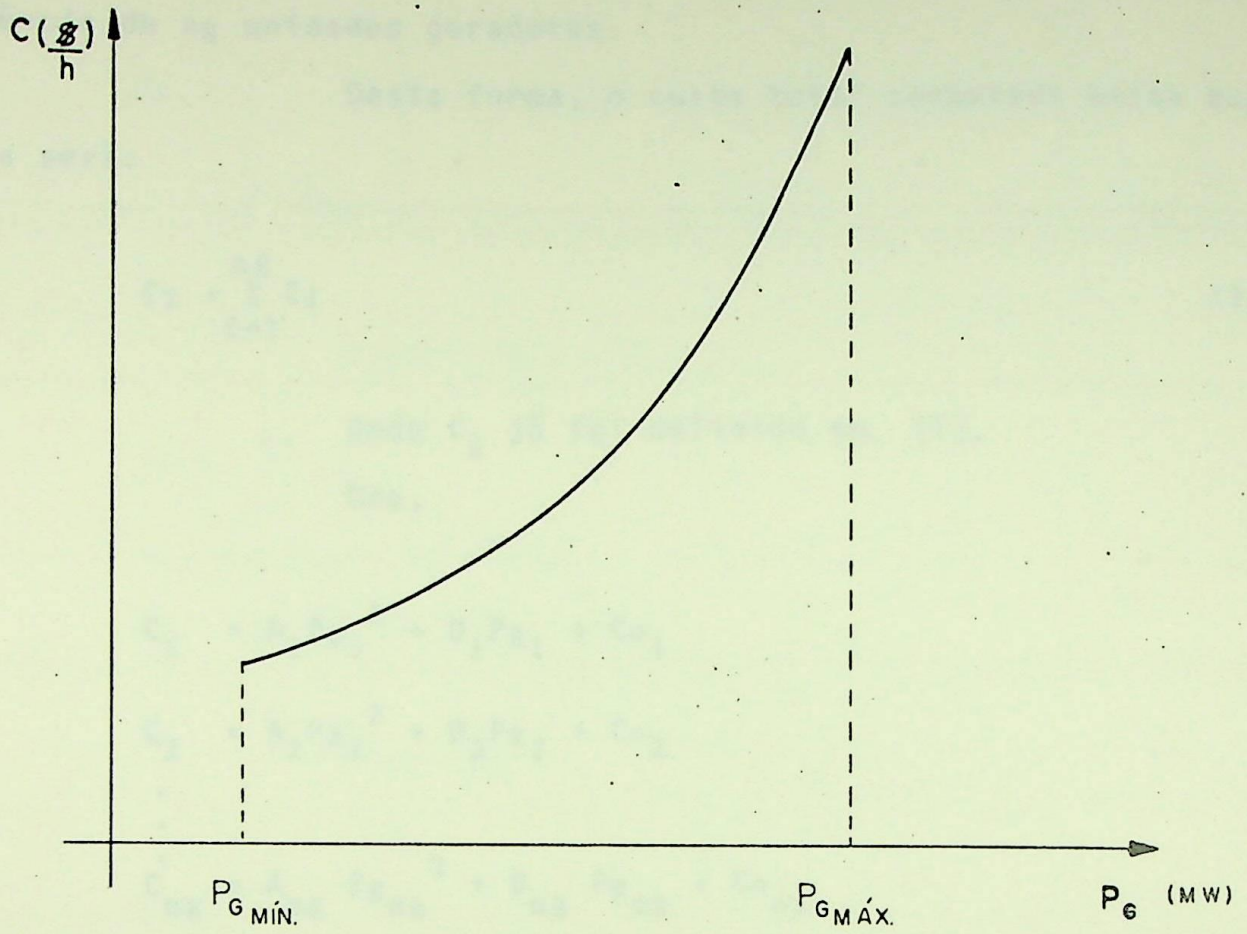


Figura 2.2

$$C_i = A_i Pg_i^2 + D_i Pg_i + Co_i \quad (\frac{Cr}{h})$$

Onde para cada unidade i, de cada barra j do sistema os coeficientes da equação de custos são obtidos através de testes simples de custos versus potência gerada. Para estas funções geralmente são feitos três testes a 50%, 75% e 100% de carga. A partir daí um programa do método dos minimos quadrados faz o ajuste*.

* *no programa geral deste trabalho está inclusa uma sub rotina que cuida disso automáticamente.*

Supõem-se na barra j do sistema a existência de ng unidades geradoras.

Desta forma, o custo total computado nesta barra será:

$$C_T = \sum_{i=1}^{ng} Ci \qquad (2)$$

Onde C_i já foi definido em (1).

Ora,

$$C_1 = A_1 Pg_1^2 + D_1 Pg_1 + Co_1$$

$$C_2 = A_2 Pg_2^2 + D_2 Pg_2 + Co_2$$

$$\vdots$$

$$C_{ng} = A_{ng}\, Pg_{ng}^2 + D_{ng}\, Pg_{ng} + Co_{ng}$$

Pode-se ainda por isto na seguinte forma:

$$C_1 = Pg_1 A_1\, Pg_1 + D_1 Pg_1 + Co_1$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$C_{ng} = Pg_{ng}\, A_{ng} Pg_{ng} + D_{ng}\, P_{ng} + Co_{ng}$$

Definindo agora:

$$\underline{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad ; \quad \underline{A} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \cdots & & A_{ng} \end{bmatrix}$$

$$\underline{Pg} = \begin{bmatrix} Pg_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \\ \\ Pg_{ng} \end{bmatrix} \quad ; \quad \underline{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \\ D_{ng} \end{bmatrix} \quad ; \quad \underline{Co} = \begin{bmatrix} Co_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Co_{ng} \end{bmatrix}$$

Então conclui-se que:

$$C_T = \sum_{i=1}^{ng} Ci$$

ou, em forma matricial

$$C_T = \underline{Pg}^t \underline{\underline{A}} \underline{Pg} + \underline{D}^t \underline{Pg} + \underline{1}^t \underline{Co}$$

Chamando,

$$C_T = C$$

$\underline{1}^t \underline{Co} = Co$; custo total fixo da barra j

vem

$$C = \underline{Pg}^t \underline{\underline{A}}\ \underline{Pg} + \underline{D}^t\ \underline{Pg} + Co \qquad (3)$$

A equação (3) engloba todas as unidades existentes em uma determinada barra.

2.5 *DESPACHO ÓTIMO IGNORANDO AS PERDAS:-*

Tem-se a equação que dá o custo total por hora, a ela acrescenta-se então a equação de restrição ou equação

do balanço energético do sistema. $\underline{1}^t\underline{Pg} - Pd = 0$, ou seja: a geração vai satisfazer completamente toda demanda Pd.

Deve-se otimizar portanto;

$$C = \underline{Pg}^t \underline{\underline{A}}\ \underline{Pg} + \underline{D}^t\underline{Pg} + Co \qquad (3)$$

sujeito a,

$$\psi(\underline{Pg}) = \underline{1}^t\underline{Pg} - Pd = 0 \qquad (4)$$

Devido a natureza das funções e do problema, se é fortemente levado a utilizar o método dos multiplicadores de Lograngе como instrumento matemático para otimizar.
O Lagrangeano fica sendo então:

$$F = C - \lambda\psi$$

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}} = \frac{\partial C}{\partial \underline{Pg}} - \lambda \frac{\partial \psi}{\partial \underline{Pg}}$$

Diferenciando (3) e (4), vem:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}}\right) = 2\ \underline{Pg}^t\underline{\underline{A}} + \underline{D}^t - \lambda(\underline{1}^t)$$

Transpondo ambos os membros, vem:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}}\right)^t = 2\ \underline{Pg}\ \underline{\underline{A}} + \underline{D} - \lambda\underline{1}$$

Este gradiente deve ser nulo, $\left(\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}}\right)^t = \underline{0}^t$

$$\underline{Pg} = \frac{1}{2} \underline{\underline{A}}^{-1}(\lambda \underline{1} - \underline{D}) \qquad (5)$$

Para encontrar o valor de λ, usa-se a equação de balanço em (5)

$$\underline{1}^t \underline{Pg} = Pd$$

Fica-se com

$$Pd = \frac{1}{2} \underline{1}^t \underline{\underline{A}}^{-1}(\lambda \underline{1} - \underline{D})$$

$$\lambda = (\underline{1}^t \underline{\underline{A}}^{-1} \underline{1})^{-1}(\underline{1}^t \underline{\underline{A}}^{-1} \underline{D} + 2Pd) \qquad (6)$$

(5) e (6) fornecem a solução para o despacho sem perdas.A fim de facilitar a compreensão dos resultados (5) e (6) podem ser escritos respectivamente da seguinte maneira.

$$Pg(i) = (\lambda - D(i))/2\ A(i) \quad ; \quad i = 1, ng \qquad (7)$$

$$\lambda = \left(\sum_{i=1}^{ng} \frac{1}{A(i)} \right)^{-1} \left[\left(\sum_{i=1}^{ng} \frac{D(i)}{A(i)} \right) + 2\ Pd \right] \qquad (8)$$

fatos de se observar é que como as perdas não foram consideradas, o custo incremental de cada unidade é o mesmo, uma vez que as perdas é quem influenciam diretamente em tais custos, isto observa-se em:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}} \right)^t = \underline{0}^t$$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

$$2\,\underline{\underline{PgA}} + \underline{D} = \lambda \underline{1}$$

ou,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial Pg_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial C}{\partial Pg_{ng}} \end{bmatrix} = \lambda \underline{1} \; \frac{CR}{MWh}$$

Praticamente é quase que sem utilidade um despacho deste tipo, pois foge da realidade. Utiliza-se como um primeiro passo para o despacho com perdas, pois dá uma boa aproximação para isto.

2.6 *DESPACHO CONSIDERANDO AS PERDAS DE TRANSMISSÃO:-*

Deve-se otimizar (3) sujeito agora ao balanço real do sistema.

$$C = \underline{Pg}^t \; \underline{\underline{A}} \; \underline{Pg} + \underline{D}^t \; \underline{Pg} + Co \qquad (3)$$

$$\psi\,(\underline{Pg}) = \underline{1}^t \; \underline{Pg} - Pd - PL = 0 \qquad (9)$$

Onde em PL estão inclusos as perdas do sistema.

O processo matemático é o mesmo, e dá os seguintes resultados:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}}\right)^t = 2\ \underline{Pg}\ \underline{\underline{A}} + \underline{D} - \lambda\left(\underline{1} - \left(\frac{\partial PL}{\partial \underline{Pg}}\right)^t\right) = \underline{0}^t$$

$$\text{Chama-se } \underline{1} - \left(\frac{\partial PL}{\partial \underline{Pg}}\right)^t = \underline{E}$$

Desta forma vem:

$$\underline{Pg} = \frac{1}{2}\ \underline{\underline{A}}^{-1}(\lambda \underline{E} - \underline{D}) \qquad (10)$$

Utilizando o mesmo procedimento, encontra-se para λ, o valor de

$$\lambda = (\underline{1}^t\ \underline{\underline{A}}^{-1}\underline{E})^{-1}(\underline{1}^t\ \underline{\underline{A}}^{-1}\underline{D} + 2\ Pd + 2\ PL) \qquad (11)$$

(10) e (11) dão o despacho considerando as perdas. O vetor $\underline{E}$ é conhecido como vetor de penalização, e o termo $\partial PL/\partial \underline{Pg}$ como vetor das perdas incrementais.

É interessante notar neste ponto que o custo incremental de cada unidade ficou agora afetado pela penalização de suas respectivas unidades.

É fácil observar que:

$$\frac{\partial C}{\partial \underline{Pg}} = \lambda\ \underline{E} \qquad (12)$$

O termo $\dfrac{1}{1 - \dfrac{\partial PL}{\partial Pg_i}} = \dfrac{1}{E_i}$ é conhecido como fator de penalidade da usina i-gesima.

Quando uma unidade tem alto fator de penalidade, vai ter seu custo incremental muito baixo, terá um bom peso no cálculo das perdas. Quanto mais próximo da unidade for o fator de penalidade de uma usina, menos ela influenciará nas perdas totais.

O fator de penalidade ideal para uma usina seria o unitário, onde não teria nenhuma influência nas perdas.

Com a introdução das perdas no despacho, torna-se o problema não linear, o que requer uma solução iterativa.

Como foi dito antes, o despacho sem perdas é um ótimo passo inicial.

2.7 ALGORITIMO PARA O PROCESSO ITERATIVO:-

Na figura 2.3 está descrito o processo de solução para o despacho econômico incluindo as perdas. O erro considerado no processo iterativo é da ordem de 10^{-4}, dando sempre um resultado bem preciso.

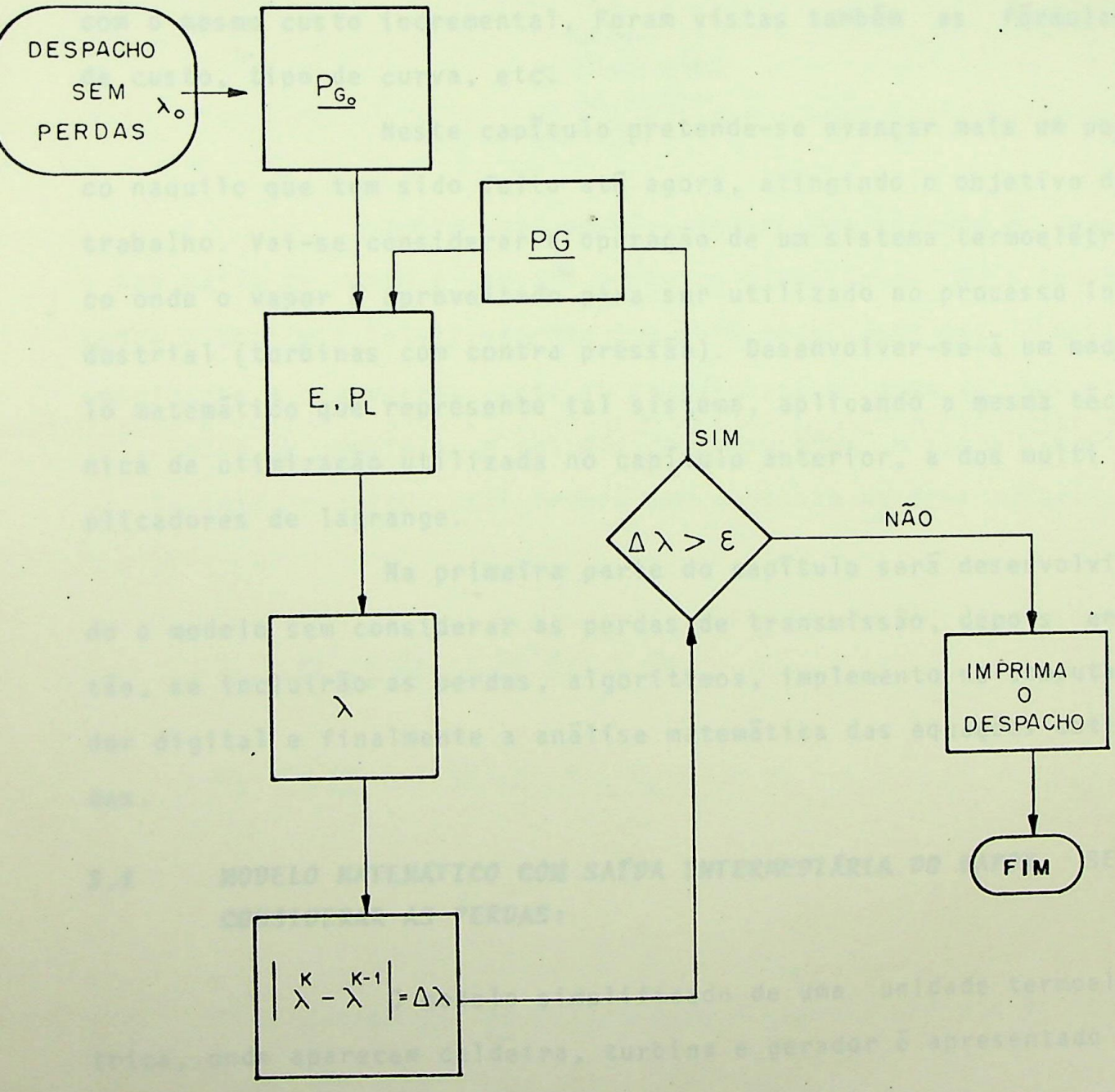


Figura 2.3

C A P Í T U L O I I I

DESPACHO ÓTIMO DE UNIDADES GERADORAS TÉRMICAS COM SAÍDA INTERMEDIÁRIA DO VAPOR, E EM PARALELO COM A CONCESSIONÁRIA

3.1 INTRODUÇÃO:-

No capítulo anterior viu-se o modelo clássico da operação econômica dos sistemas elétricos de potência. Modelo onde todas as unidades de uma dada usina operavam economicamente com o mesmo custo incremental. Foram vistas também as fórmulas de custo, tipo de curva, etc.

Neste capítulo pretende-se avançar mais um pouco naquilo que tem sido feito até agora, atingindo o objetivo do trabalho. Vai-se considerar a operação de um sistema termoelétrico onde o vapor é aproveitado para ser utilizado no processo industrial (turbinas com contra pressão). Desenvolver-se-á um modelo matemático que represente tal sistema, aplicando a mesma técnica de otimização utilizada no capítulo anterior, a dos multiplicadores de lagrange.

Na primeira parte do capítulo será desenvolvido o modelo sem considerar as perdas de transmissão, depois então, se incluirão as perdas, algoritimos, implemento no computador digital e finalmente a análise matemática das equações obtidas.

3.2 MODELO MATEMÁTICO COM SAÍDA INTERMEDIÁRIA DO VAPOR SEM CONSIDERAR AS PERDAS:

O modelo simplificado de uma unidade termoelétrica, onde aparecem caldeira, turbina e gerador é apresentado a seguir na figura 3.1.

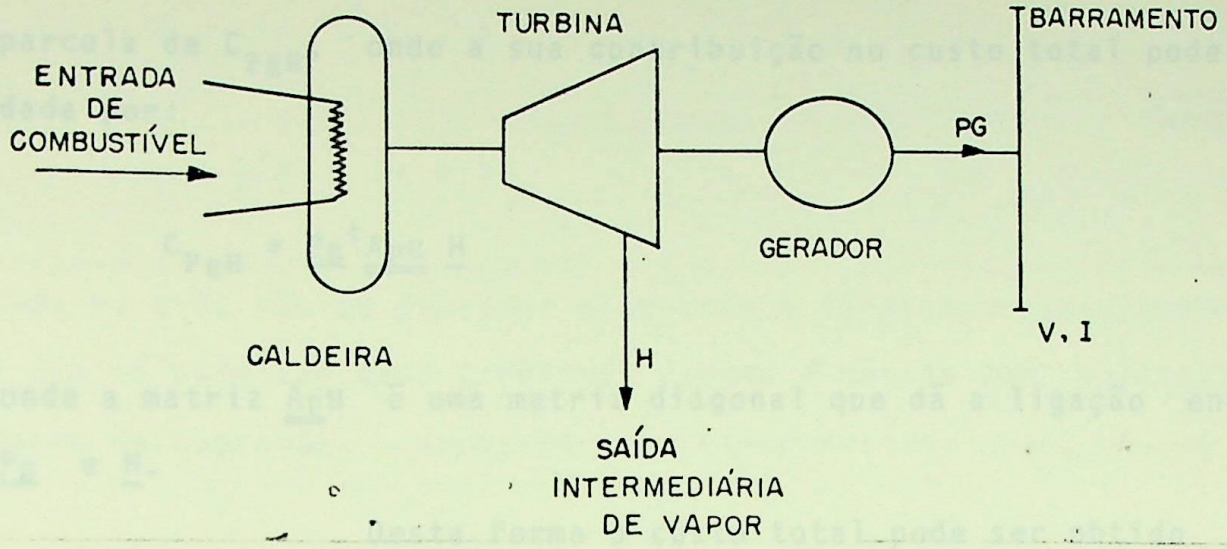


Figura 3.1

Neste novo modelo, tem-se uma entrada de vapor e uma saída de vapor e energia elétrica simultâneas. Se é levado então a concluir intuitivamente que será necessária uma equação semelhante a precedente, onde se relacionará entrada de combustível, saída de entalpia, e entrada de combustível e saída elétrica. Ou seja: o custo total deverá ser composto de dois custos:

$$C_1 = \underline{Pg}^t \underline{\underline{Ap}}\ \underline{Pg} + \underline{Dp}^t \underline{Pg} + Co_1$$

*

$$C_2 = \underline{H}^t \underline{\underline{AH}}\ \underline{H} + \underline{DH}^t\ \underline{H} + Co_2$$

* *os termos* $\underline{DH}$, $\underline{\underline{AH}}$ *desenvolvem o mesmo papel que os termos* $\underline{\underline{Ap}}$ e $\underline{Dp}$.

Entretanto, a prática tem mostrado que ainda existe uma parcela a ser considerada, que relaciona a potência elétrica de saída com a saída de entalpia. Chama-se à esta parcela de C_{PgH}, onde a sua contribuição no custo total pode ser dada por:

$$C_{PgH} = \underline{Pg}^t \underline{\underline{ApH}}\ \underline{H}$$

onde a matriz $\underline{\underline{ApH}}$ é uma matriz diagonal que dá a ligação entre $\underline{Pg}$ e $\underline{H}$.

Desta forma o custo total pode ser obtido somando-se os três custos componentes.

$$C = C_1 + C_2 + C_{PgH}$$

ou:

$$C = \underline{Pg}^t \underline{\underline{ApPg}} + \underline{Dp}^t \underline{Pg} + \underline{H}^t \underline{\underline{AH}}\ \underline{H} + \underline{DH}^t\ \underline{H} + \underline{Pg}^t \underline{\underline{ApH}}\ \underline{H} + Co \quad (1)$$

Co aqui é também o custo necessário para se manter as unidades quentes (prontas para absorver carga), custos de manutenção, mão de obra, etc.

O problema matemático agora pode ser colocado da seguinte forma:

Função Objetiva - $C = C(\underline{Pg}, \underline{H})$

Restrições - $\phi = \phi(\underline{Pg})$

$\psi = \psi(\underline{H})$

Onde as funções ϕ, e ψ dão o balanço enérgico do sistema elétrico e térmico respectivamente. Em termos analíticos tem-se:

$$\phi = \underline{1}^t \underline{Pg} - Pd = 0 \qquad (2)$$

$$\psi = \underline{1}^t \underline{H} - Hd = 0 \qquad (3)$$

onde Pd e Hd são as demandas elétricas e térmicas respectivamente. A fim de otimizar este problema usando o método dos multiplicadores de Lagrange, segue-se a rotina abaixo.

$$F(\underline{Pg}, \underline{H}, \lambda, \eta) = C(\underline{Pg}, \underline{H}) - \lambda\, \phi(\underline{Pg}) - \lambda\, \psi(\underline{H})$$

O mínimo vai acontecer quando $\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}}$, e $\frac{\partial F}{\partial \underline{H}}$ forem nulos.

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}} = \frac{\partial C}{\partial \underline{Pg}} - \lambda \frac{\partial \phi}{\partial \underline{Pg}} - \eta \frac{\partial \psi}{\partial \underline{Pg}} \qquad (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{H}} = \frac{\partial C}{\partial \underline{H}} - \lambda \frac{\partial \phi}{\partial \underline{H}} - \eta \frac{\partial \psi}{\partial \underline{H}} \qquad (5)$$

Aplicando as regras de diferenciação a matrizes e vetores, vem:

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}} = 2.\underline{Pg}^t \underline{\underline{Ap}} + \underline{Dp}^t + \underline{H}^t \underline{\underline{ApH}} - \lambda \underline{1}^t$$

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{H}} = 2\, \underline{H}^t \underline{\underline{AH}} + \underline{DH}^t + \underline{Pg}^t \underline{\underline{ApH}} - \eta \underline{1}^t$$

Transpondo ambos os membros, vem:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}}\right)^t = 2\ \underline{\underline{Ap}}\,\underline{Pg} + \underline{Dp} + \underline{\underline{ApH}}\ \underline{H} - \lambda \underline{1}$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \underline{H}}\right)^t = 2\ \underline{\underline{AH}}\ \underline{H} + \underline{DH} + \underline{\underline{ApH}}\,\underline{Pg} - \eta \underline{1}$$

Como (4) e (5) devem ser iguais a um valor nulo, obtem-se:

$$2\ \underline{\underline{Ap}}\,\underline{Pg} + \underline{\underline{ApH}}\ \underline{H} = \lambda \underline{1} - \underline{Dp}$$

$$2\ \underline{\underline{AH}}\ \underline{H} + \underline{\underline{ApH}}\ \underline{Pg} = \eta \underline{1} - \underline{DH}$$

Obtendo

$$\begin{bmatrix} 2\ \underline{\underline{Ap}} & \underline{\underline{ApH}} \\ \underline{\underline{ApH}} & 2\ \underline{\underline{AH}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Pg} \\ \underline{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \underline{1} - \underline{Dp} \\ \eta \underline{1} - \underline{DH} \end{bmatrix}$$

Seja:

$$A = \begin{bmatrix} 2\ \underline{\underline{Ap}} & \underline{\underline{ApH}} \\ \underline{\underline{ApH}} & 2\ \underline{\underline{AH}} \end{bmatrix}$$

Supondo que a matriz $\underline{\underline{A}}$ é uma matriz regular, e chamando sua inversa de $\underline{\underline{X}}$, então $\underline{\underline{X}} = \underline{\underline{A}}^{-1}$

$$X = \begin{bmatrix} \underline{\underline{Xp}} & \underline{\underline{XpH}} \\ \underline{\underline{XpH}} & \underline{\underline{XH}} \end{bmatrix} *$$

**Vai-se mostrar no decorrer do capítulo que $\underline{\underline{X}}$ é simétrica.*

Portanto,

$$\underline{Pg} = \underline{\underline{X_p}}\,(\lambda \underline{1} - \underline{D_p}) + \underline{\underline{X_{pH}}}\,(\eta \underline{1} - \underline{D_H}) \qquad (6)$$

$$\underline{H} = \underline{\underline{X_{pH}}}\,(\lambda \underline{1} - \underline{D_p}) + \underline{\underline{X_H}}\,(\eta \underline{1} - \underline{D_H}) \qquad (7)$$

Uma vez que se tenha calculado os multiplicadores de Lagrange λ e η, as equações (6) e (7) dão já as gerações elétricas, e de vapor que otimizam os custos operativos relativos ao despacho.

3.2.1 *Cálculo dos Multiplicadores de Lagrange:-*

Inserindo (2) e (3) em (6) e (7), obtem-se:

$$Pd = \underline{1}^t \underline{\underline{X_p}} \lambda \underline{1} + \underline{1}^t\, \underline{\underline{X_{pH}}} \eta \underline{1} - \underline{1}^t \underline{\underline{X_p}}\, \underline{D_p} - \underline{1}^t \underline{\underline{X_{pH}}}\, \underline{D_H}$$

$$Hd = \underline{1}^t \underline{\underline{X_{pH}}}\, \lambda \underline{1} + \underline{1}^t \underline{\underline{X_H}}\, \eta \underline{1} - \underline{1}^t \underline{\underline{X_{pH}}}\, \underline{D_p} - \underline{1}^t\, \underline{\underline{X_H}}\, \underline{D_H}$$

Fazendo:

$$Po = Pd + \underline{1}^t\, \underline{\underline{X_p}}\, \underline{D_p} + \underline{1}^t\, \underline{\underline{X_{pH}}}\, \underline{D_H}$$

$$Ho = Hd + \underline{1}^t\, \underline{\underline{X_{pH}}} \underline{D_p} + \underline{1}^t \underline{\underline{X_H}}\, \underline{D_H}$$

Facilmente conclui-se que:

$$\begin{bmatrix} Po \\ Ho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{1}^t \underline{\underline{X_p}}\, \underline{1} & \underline{1}^t \underline{\underline{X_{pH}}}\, \underline{1} \\ \underline{1}^t \underline{\underline{X_{pH}}}\, \underline{1} & \underline{1}^t \underline{\underline{X_H}}\, \underline{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \eta \end{bmatrix}$$

Chamando $\underline{\underline{X\lambda\eta}}$ a matriz anterior de $\underline{\underline{X\lambda\eta}}$, obtem-se:

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \\ \eta \end{bmatrix} = \underline{\underline{X\lambda\eta}}^{-1} \begin{bmatrix} Po \\ \\ Ho \end{bmatrix}$$

Desde que $\underline{\underline{X\lambda\eta}}$ seja inversível.

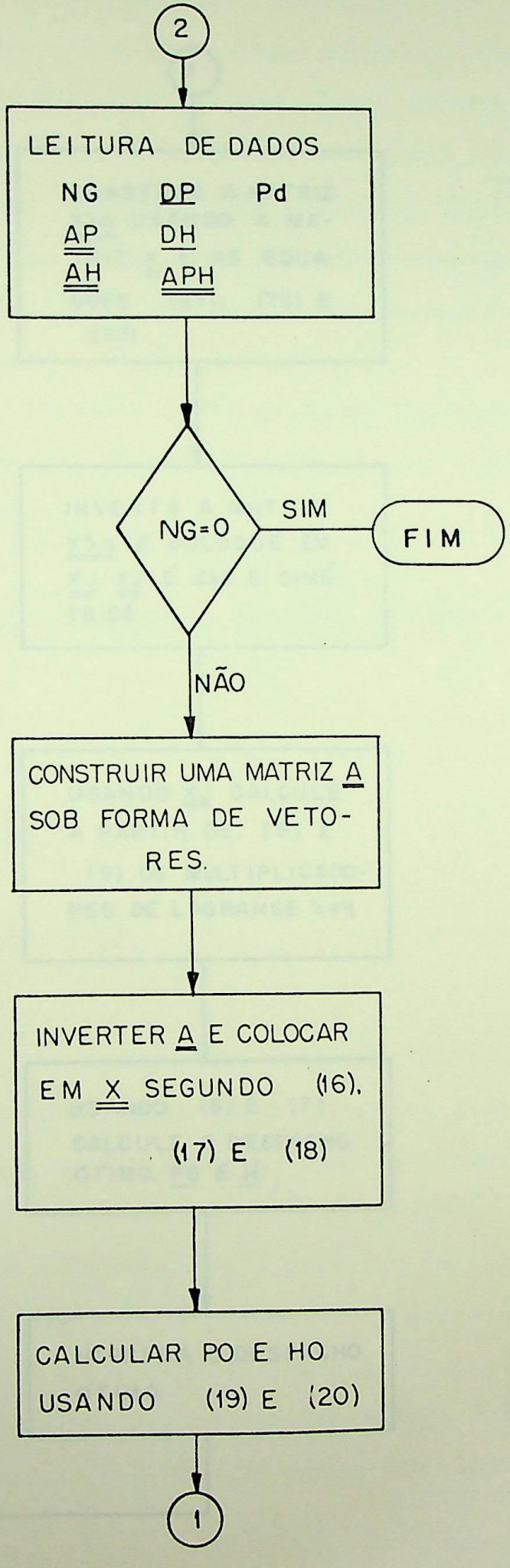
Chamando $\underline{\underline{XJ}} = \underline{\underline{X\lambda\eta}}^{-1}$

$$\lambda = XJ\ (1,1)\ Po + XJ\ (1,2)\ Ho \qquad (8)$$

$$\eta = XJ\ (2,1)\ Po + XJ\ (2,2)\ Ho \qquad (9)$$

Descreve-se a seguir na figura 3.2 um fluxograma com os passos necessários ao cálculo de despacho sem perdas.

FLUXOGRAMA PARA O CASO SEM PERDAS.



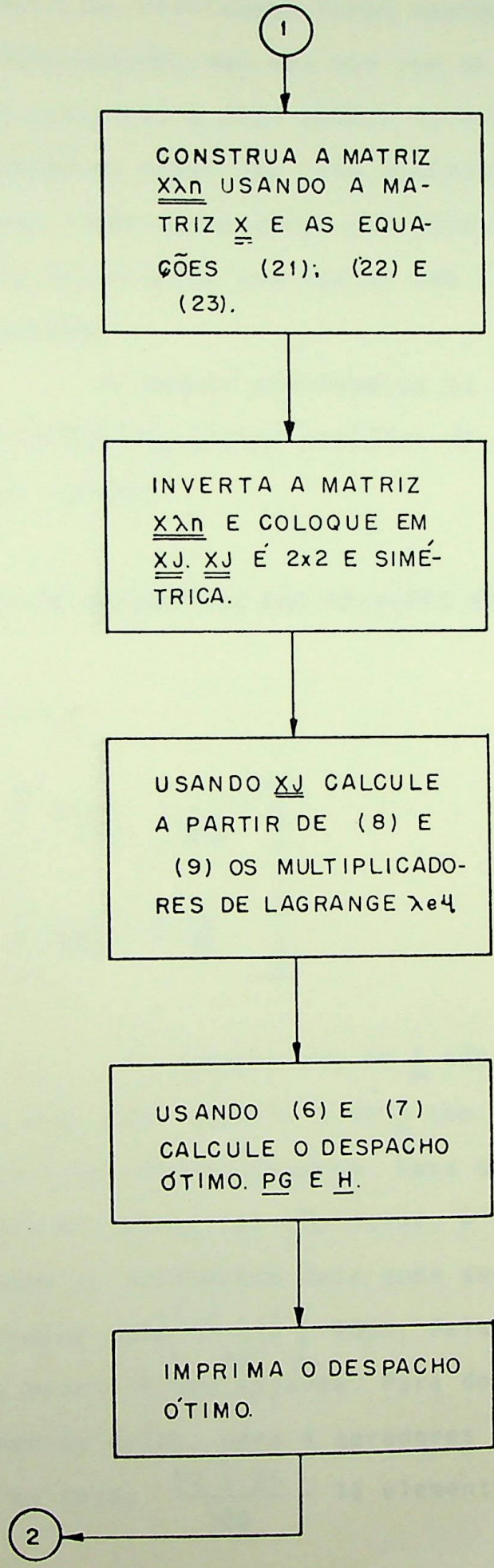

1
CONSTRUA A MATRIZ Xλn USANDO A MATRIZ X E AS EQUAÇÕES (21); (22) E (23).
INVERTA A MATRIZ Xλn E COLOQUE EM XJ. XJ É 2x2 E SIMÉTRICA.
USANDO XJ CALCULE A PARTIR DE (8) E (9) OS MULTIPLICADORES DE LAGRANGE λe4
USANDO (6) E (7) CALCULE O DESPACHO ÓTIMO. PG E H.
IMPRIMA O DESPACHO ÓTIMO.
2

Figura 3.2

Analiticamente, até agora tudo correu muito bem. Se as matrizes utilizadas forem realmente inversíveis o problema está solucionado, uma vez que com os valores de λ e π colocados nas equações (6) e (7), tem-se os valores de potência elétrica, e geração de vapor que irão minimizar os custos operativos do sistema. Como neste passo não considerou-se as perdas, o problema fica solucionado com apenas uma iteração, e o despacho ótimo é conseguido.

A seguir analisam-se os aspectos matemáticos do modelo, verificando alguns aspectos de sua implementação em um computador digital.

3.3 *ANÁLISE MATEMÁTICA DAS RELAÇÕES OBTIDAS:-*

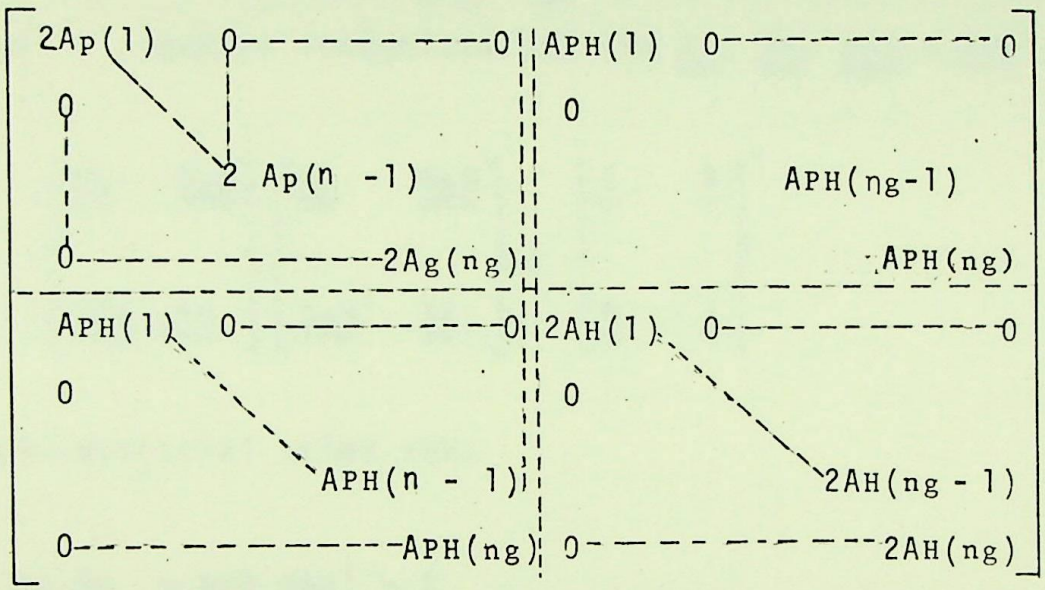
3.3.1 *Matriz* $\underline{\underline{A}}$

$$A = \begin{bmatrix} 2\,\underline{\underline{A_P}} & \underline{\underline{A_{PH}}} \\ \underline{\underline{A_{PH}}} & 2\,\underline{\underline{A_H}} \end{bmatrix}$$

As submatrizes de $\underline{\underline{A}}$ são matrizes diagonais de ordem $2ng \times 2ng$. Cada submatriz de $\underline{\underline{A}}$ tem sua diagonal principal cheia, e ela é uma matriz esparsa. Para um sistema com ng unidades, ela terá $4ng$ elementos não nulos, e $4\,(ng^2 - ng)$ elementos nulos. A ordem de enchimento dela pode ser calculada como $\frac{1}{ng}$, e a de esparcidade vale $\left(\frac{ng - 1}{ng}\right)$ 100%. Pela ordem de esparsidade vê-se que a matriz é bem esparsa. Para dois geradores ela terá 50% de elementos nulos, para 4 geradores terá 25% de elementos não nulos, ou seja, $\frac{64 \times 25}{100} = 16$ elementos. Desta forma fica

evidente que num programa para computador digital por questões de memória e tempo computacional a esparsidade da matriz $\underline{A}$ deve ser levada em consideração.

Para ng geradores, o aspécto de $\underline{\underline{A}}$ é como se descreve abaixo:



CÁLCULO DA INVERSA DE $\underline{\underline{A}}$

Observando o aspecto da matriz, vê-se que não seria muito lógico se calcular sua inversa pelos métodos tradi - cionais (pór exemplo Shipley). Uma vez que ela é simétrica, e formada por quatro submatrizes diagonais.

De posse destas informações se é levado a pensar qua sua inversa contenha também quatro sumatrizes, e que até seja simétrica. Baseado nesse pensamento, e na teoria das matrizes particionadas calcula-se sua inversa. Chamando sua inversa de $\underline{\underline{X}}$, e a fim de que $\underline{\underline{X}}$ seja inversa de $\underline{\underline{A}}$, deve-se ter:

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
RJM

$$\underline{\underline{A}}\ \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{I}} \tag{10}$$

e

$$\underline{\underline{X}}\ \underline{\underline{A}} = \underline{\underline{I}} \tag{11}$$

vamos provar (10) e por simplicidade chamar $2\ \underline{\underline{Ap}}$ de $\underline{\underline{Ap}}$, e $2\ \underline{\underline{AH}}$ de $\underline{\underline{AH}}$.

A equação $\underline{\underline{A}}\ \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{I}}$ fornece quatro equações para as quatro incógnitas que são $\underline{\underline{Xp}}$, $\underline{\underline{XH}}$, $\underline{\underline{XpH}}$ e $\underline{\underline{XpH}}^{1}$.

$$\begin{bmatrix} \underline{\underline{Ap}} & \underline{\underline{ApH}} \\ \underline{\underline{ApH}} & \underline{\underline{AH}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\underline{Xp}} & \underline{\underline{XpH}} \\ \underline{\underline{XpH}}^{1} & \underline{\underline{XH}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{I}} & \underline{\underline{0}} \\ \underline{\underline{0}} & \underline{\underline{I}} \end{bmatrix}$$

Da equação matricial acima vem:

$$\underline{\underline{Ap}}\ \underline{\underline{Xp}} + \underline{\underline{ApH}}\ \underline{\underline{XpH}}^{1} = \underline{\underline{I}} \tag{12}$$

$$\underline{\underline{Ap}}\ \underline{\underline{XpH}} + \underline{\underline{ApH}}\ \underline{\underline{XH}} = \underline{\underline{0}} \tag{13}$$

$$\underline{\underline{ApH}}\ \underline{\underline{Xp}} + \underline{\underline{AH}}\ \underline{\underline{XpH}}^{1} = \underline{\underline{0}} \tag{14}$$

$$\underline{\underline{ApH}}\ \underline{\underline{XpH}} + \underline{\underline{AH}}\ \underline{\underline{XH}} = \underline{\underline{I}} \tag{15}$$

De (12) vem:

$$\underline{\underline{Xp}} = \underline{\underline{Ap}}^{-1}\ (\underline{\underline{I}} - \underline{\underline{ApH}}\ \underline{\underline{XpH}}^{1})$$

De (14) vem:

$$\underline{\underline{Xp}} = -\underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{AH}}\ \underline{\underline{XpH}}^{1}$$

igualando tem-se:

$$\underline{\underline{Ap}}^{-1} - \underline{\underline{Ap}}^{-1} \underline{\underline{ApH}}\ \underline{\underline{XpH}}^{1} = -\underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{AH}}\ \underline{\underline{XpH}}^{1}$$

$$\rightarrow \quad (\underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{AH}} - \underline{\underline{Ap}}^{-1}\ \underline{\underline{ApH}})\ \underline{\underline{XpH}}^{1} = -\ \underline{\underline{Ap}}^{-1}$$

Segue-se que: $\underline{\underline{XpH}}^{1} = (\underline{\underline{ApH}} - \underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{Ap}}\ \underline{\underline{AH}}\ )$

Pode-se provar que $\underline{\underline{XpH}} = \underline{\underline{XpH}}^{1}$ pela substituição de $\underline{\underline{XH}}$ em (13). Substituindo $\underline{\underline{XpH}}^{1}$ em $\underline{\underline{Xp}}$, vem:

$$\underline{\underline{Xp}} = -\underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{AH}}\ (\underline{\underline{ApH}} - \underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{Ap}}\ \underline{\underline{AH}})$$

Substituindo $\underline{\underline{Xp}}$ em (13), vem:

$$\underline{\underline{XH}} = -\underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{Ap}}\ (\underline{\underline{ApH}} - \underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{Ap}}\ \underline{\underline{AH}}\ )$$

A matriz $\underline{\underline{X}}$ tem por valor então:

$$\underline{\underline{XpH}} = (\underline{\underline{ApH}} - \underline{\underline{Ap}}\ \underline{\underline{AH}}\ \underline{\underline{ApH}}^{-1}) \qquad (16)$$

$$\underline{\underline{Xp}} = \underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{AH}}\ (-\underline{\underline{XpH}}) \qquad (17)$$

$$\underline{\underline{XH}} = \underline{\underline{ApH}}^{-1}\ \underline{\underline{Ap}}(-\underline{\underline{XpH}}) \qquad (18)$$

Pelas relações obtidas pode-se concluir que a matriz $\underline{\underline{X}}$ é uma matriz simétrica, e que suas submatrizes $\underline{\underline{Xp}}$, $\underline{\underline{XH}}$, e $\underline{\underline{XpH}}$ são diagonais, pois são formadas por soma e multiplicação de matrizes diagonais. Como cada submatriz da matriz $\underline{\underline{A}}$ é diago

nalmente cheia, segue-se que sempre vai existir $\underline{\underline{A}}_{pH}^{-1}$, $\underline{\underline{A}}_{p}^{-1}$, $\underline{\underline{A}}_{H}^{-1}$, o que conclui-se com segurança que a matriz $\underline{\underline{A}}$ para qualquer sistema termelétrico considerado, vai ser uma matriz regular.

3.3.2 *Cálculo de Po e Ho:-*

$$Po = Pd + \underline{1}^{t}\underline{\underline{X}}_{p}\underline{D}_{p} + \underline{1}^{t}\underline{\underline{X}}_{pH}\underline{D}_{H}$$

$$Ho = Hd + \underline{1}^{t}\underline{\underline{X}}_{pH}\underline{D}_{p} + \underline{1}^{t}\underline{\underline{X}}_{H}\underline{D}_{H}$$

Isto pode ser colocado de uma forma mais simples; em forma de somatório:

$$Po = Pd + \left[\sum_{I=1}^{ng} (Xp(I)\ Dp(I) + XpH(I)\ \ DH(I) \right] \qquad (19)$$

e

$$Ho = Hd + \left[\sum_{I=1}^{ng} (XpH(I)\ Dp(I) + XH(I)\ DH(I) \right] \qquad (20)$$

3.3.3 *Matriz* $\underline{\underline{X}}\lambda\eta$:-

Pela forma como seus elementos são definidos, ela é uma matriz cheia, regular e simétrica. Seus elementos podem ser calculados facilmente pela fórmula abaixo:

$$X\lambda\eta(1,1) = \sum_{i=1}^{ng} Xp(I) \qquad (21)$$

$$X\lambda\eta(1,2) = \sum_{i=1}^{ng} XpH(I) \qquad (22)$$

$$X\lambda\eta\ (2,2) = \sum_{I=1}^{ng} XH(I) \qquad (23)$$

Para qualquer sistema ela será sempre uma matriz 2 x 2, pois a ordem dela é definida pelo número de equações de restrições usadas com a função custos. Como se está usando duas equações de restrições, sua ordem será sempre 2 x 2 independente do tamanho do sistema a ser estudado.

Ela vai ser sempre inversível e o cálculo da inversa pode ser feito por qualquer método, pois levará poucos passos e será bem simples.

3.4 *CONSIDERAÇÕES DAS PERDAS:-*

Nas secções anteriores, desenvolveu-se o modelo matemático para no sistema termelétrico sem considerar as perdas elétricas e térmicas. As perdas elétricas são constituídas quase que exclusivamente por perdas nas resistências das linhas que levam a potência até o centro de carga. Semelhantemente as perdas térmicas são perdas de vapor (queda de pressão e temperatura) nos coletores de vapor.

O modelo matemático utilizado no caso sem perdas continua com a mesma estrutura, só que as perdas irão influenciar no aspécto geral do despacho, pois a penalização de cada unidade geradora vai ser levada em conta. O outro aspecto a ser levado em conta é que agora se entra em um processo iterativo para a solução do problema, uma vez que as perdas são consideradas, e elas não variam linearmente com a potência. Mais adiante se fará comentários à este respeito ao calcular as

fórmulas representativas das perdas.

Além das perdas, se vai nesta secção incorporar outros dois elementos (que poderiam também ter sido incorporados no caso sem perdas) quase sempre presentes nos sistemas industriais que utilizam auto-geração. O primeiro elemento é a potência que a indústria adquire da concessionária para que juntamente com a potência gerada internamente, a demanda mais as perdas sejam supridas convenientemente. Esta potência comprada pela indústria chama-se Pc, potência comprada ou vendida, dependendo do seu sinal ser positivo ou negativo.

De forma semelhante, o segundo elemento será a parcela de vapor que a indústria adquire de outros sistemas, ou cede a outros sistemas. Se vai chamar esta parcela de Hc. E de forma semelhante a potência Pc, se Hc for positivo indicará vapor comprado, se for negativo o vapor está sendo vendido.

Feitas que foram as considerações acima, pode se passar a este novo modelo e desenvolver suas equações.

3.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO FINAL INCLUINDO AS PERDAS:-

A representação física fica agora sendo a da figura 3.3 para duas unidades.

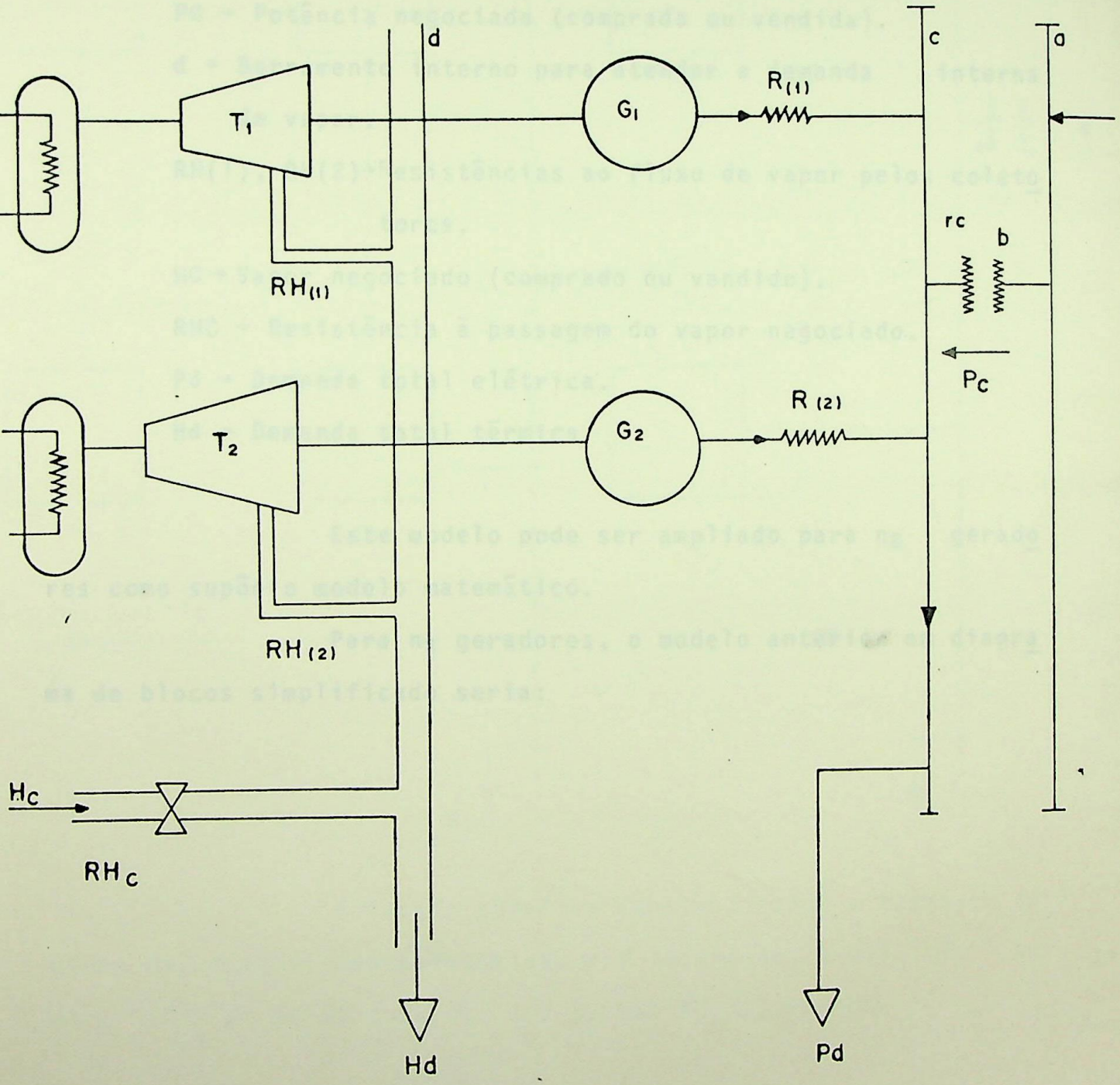


Figura 3.3

onde:

a → Barramento externo da concessionária.

b → Transformador de interligação.

c → Barramento interno do sistema.

R(1), R(2) → Resistência à passagem das potências Pg(1) e Pg(2) respectivamente.

RC → Resistência à passagem da potência negociada PC.

PC → Potência negociada (comprada ou vendida).

d → Barramento interno para atender a demanda interna de vapor.

RH(1), RH(2) → Resistências ao fluxo de vapor pelos coletores.

HC → Vapor negociado (comprado ou vendido).

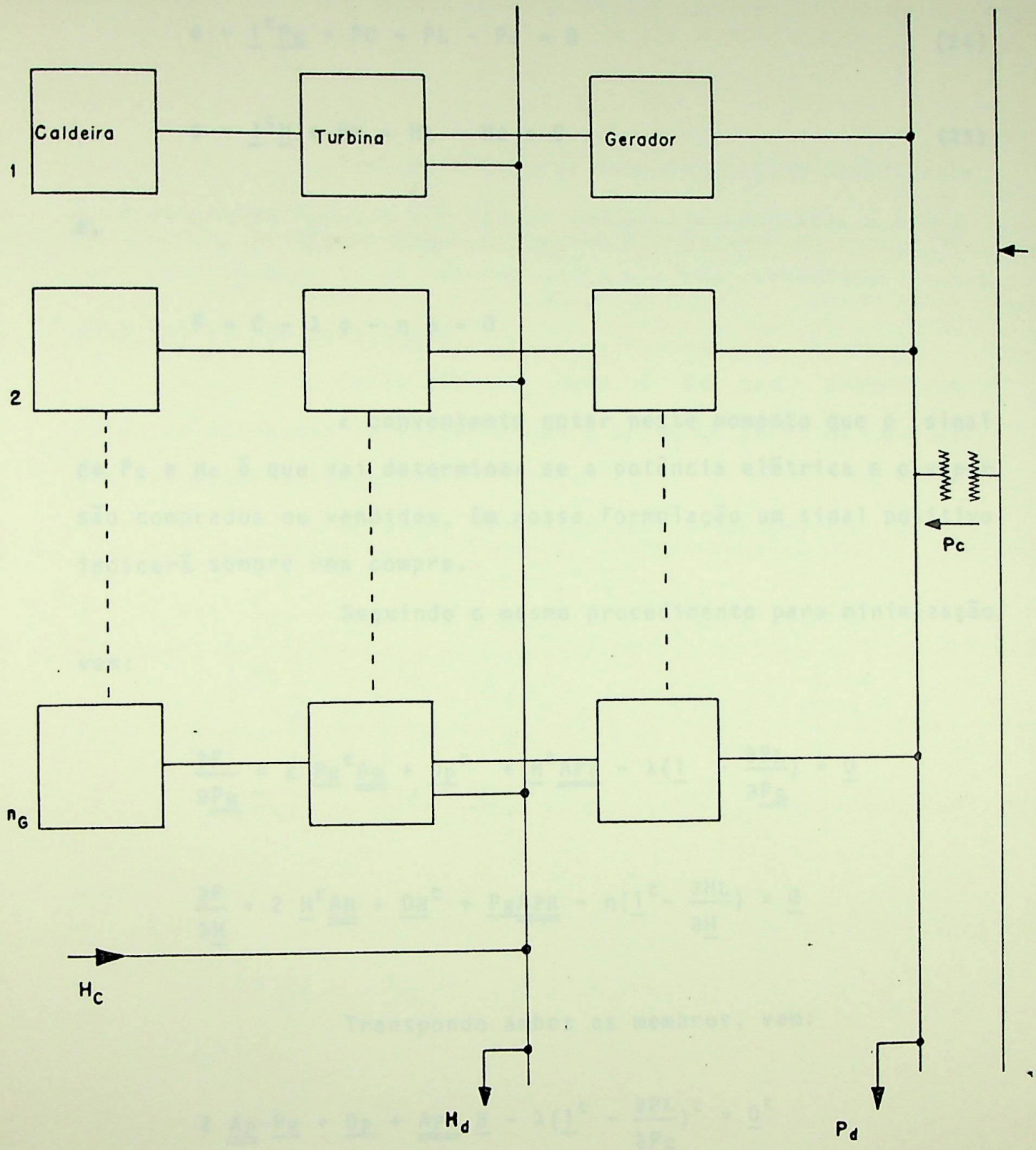
RHC → Resistência à passagem do vapor negociado.

Pd → Demanda total elétrica.

Hd → Demanda total térmica.

Este modelo pode ser ampliado para ng geradores como supõe o modelo matemático.

Para ng geradores, o modelo anterior em diagrama de blocos simplificado seria:



A função objetiva continua sendo a mesma, somente as equações representativas das restrições é que irão mudar, a fim de se acomodarem aos termos PC, HC, PL, HL.

$$C = \underline{Pg}^t \underline{\underline{Ap}}\ \underline{Pg} + \underline{Dp}^t \underline{Pg} + \underline{H}^t \underline{\underline{AH}}\ \underline{H} + \underline{DH}^t \underline{H} + \underline{Pg}^t \underline{\underline{APH}}\ \underline{H} \pm Co$$

$$\phi = \underline{1}^t \underline{Pg} + Pc - PL - Pd = 0 \qquad (24)$$

$$\psi = \underline{1}^t \underline{H} + Hc - HL - Hd = 0 \qquad (25)$$

e,

$$F = C - \lambda\,\phi - \eta\,\psi = 0$$

É conveniente notar neste momento que o sinal de P_c e H_c é que vai determinar se a potência elétrica e o vapor são comprados ou vendidos. Em nossa formulação um sinal positivo indicará sempre uma compra.

Seguindo o mesmo procedimento para minimização, vem:

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{Pg}} = 2\,\underline{Pg}^t \underline{\underline{Ap}} + \underline{Dp}^t + \underline{H}^t \underline{\underline{APH}} - \lambda(\underline{1} - \frac{\partial PL}{\partial \underline{Pg}}) = \underline{0}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{H}} = 2\,\underline{H}^t \underline{\underline{AH}} + \underline{DH}^t + \underline{Pg}\,\underline{\underline{APH}} - \eta(\underline{1}^t - \frac{\partial HL}{\partial \underline{H}}) = \underline{0}$$

Transpondo ambos os membros, vem:

$$2\,\underline{\underline{Ap}}\;\underline{Pg} + \underline{Dp} + \underline{\underline{APH}}\;\underline{H} - \lambda(\underline{1}^t - \frac{\partial PL}{\partial \underline{Pg}})^t = \underline{0}^t$$

$$2\,\underline{\underline{AH}}\;\underline{H} + \underline{DH} + \underline{\underline{APH}}\;\underline{Pg} - \eta(\underline{1}^t - \frac{HL}{\underline{H}})^t = \underline{0}^t$$

onde,

$$(\underline{1}^t - \frac{\partial PL}{\partial \underline{Pg}}) = \underline{E} \qquad (26)$$

$$(\underline{1}^t - \frac{\partial HL}{\partial \underline{H}})^t = \underline{F} \qquad (27)$$

Também conhecidos como vetores de penalização. E os vetetores $\frac{\partial PL}{\partial \underline{Pg}}$, e $\frac{\partial HL}{\partial \underline{H}}$ são as perdas incrementais. E ainda , para cada unidade i, os números $\frac{1}{Ei}$ e $\frac{1}{Fi}$ são conhecidos também como fatores de penalidade.

Estes números, como já se tem conhecimento estão relacionados intimamente com o despacho ótimo de qualquer sistema elétrico-térmico.

Da mesma forma que para o sistema sem perdas, vem:

$$\underline{\underline{A}} \begin{bmatrix} \underline{Pg} \\ \\ \underline{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \underline{E} - \underline{Dp} \\ \\ \eta \underline{F} - \underline{DH} \end{bmatrix}$$

onde

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} 2\ \underline{\underline{Ap}} & \underline{\underline{APH}} \\ \\ \underline{\underline{ApH}} & 2\ \underline{\underline{AH}} \end{bmatrix}$$

Sendo $\underline{\underline{X}} = \underline{\underline{A}}^{-1}$, obtem-se para o despacho

$$\underline{Pg} = \underline{\underline{Xp}}\ (\lambda \underline{E} - \underline{Dp}) + \underline{\underline{XpH}}(\eta \underline{F} - \underline{DH}) \qquad (28)$$

$$\underline{H} = \underline{\underline{XpH}}(\lambda \underline{E} - \underline{Dp}) + \underline{\underline{XH}}\ (\eta \underline{F} - \underline{DH}) \qquad (29)$$

3.5.1 *Cálculo dos Multiplicadores de Lagrange:-*

Usando as equações de restrições (24) e (25) a fim de calcular os valores de λ e η, tem-se:

$$\underline{1}^t \underline{Pg} = PL + Pd - PC$$

$$\underline{1}^t \underline{H} = HL + Hd - HC$$

Substituindo os valores encontrados para $\underline{Pg}$ e $\underline{H}$ encontrados nas equações (28) e (29), encontra-se

$$PL + Pd - PC = \underline{1}^t \underline{\underline{Xp}}(\lambda \underline{E} - \underline{Dp}) + \underline{1}^t \underline{\underline{XPH}}(\eta \underline{F} - \underline{DH})$$

$$HL + Hd - HC = \underline{1}^t \underline{\underline{XPH}}(\lambda \underline{E} - \underline{Dp}) + \underline{1}^t \underline{\underline{XH}}(\eta \underline{F} - \underline{DH})$$

Separando, vem

$$PL + Pd - PC + \underline{1}^t \underline{\underline{Xp}}\ \underline{Dp} + \underline{1}^t \underline{\underline{XPH}}\ \underline{DH} = \lambda \underline{1}^t \underline{\underline{Xp}}\ \underline{E} + \eta \underline{1}^t \underline{\underline{XPH}}\ \underline{F}$$

$$HL + Hd - HC + \underline{1}^t \underline{\underline{XPH}}\ \underline{Dp} + \underline{1}^t \underline{\underline{XH}}\ \underline{DH} = \lambda \underline{1}^t \underline{\underline{XPH}}\ \underline{E} + \eta \underline{1}^t \underline{\underline{XH}}\ \underline{F}$$

É fácil lembrar que:

$$Pd + \underline{1}^t \underline{\underline{Xp}}\ \underline{Dp} + \underline{1}^t \underline{\underline{XPH}}\ DH = Po$$

$$Hd + \underline{1}^t \underline{\underline{XPH}}\ \underline{Dp} + \underline{1}^t \underline{\underline{XH}}\ \underline{DH} = Ho$$

valôres já calculados no caso sem perdas.

Seja,

$$Po1 = Po + PL - PC \tag{30}$$

$$Po1 = Ho + HL - HC \tag{31}$$

Tem-se portanto,

$$\begin{bmatrix} Po1 \\ Po1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{1}^t \underline{\underline{X_P}}\ \underline{E} & \underline{1}^t \underline{\underline{X_{PH}}}\ \underline{F} \\ \underline{1}^t \underline{\underline{X_{PH}}}\ \underline{E} & \underline{1}^t \underline{\underline{X_H}}\ \underline{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \eta \end{bmatrix}$$

Chamando

$$\underline{\underline{XJ1}} = \begin{bmatrix} \underline{1}^t \underline{\underline{X_P}}\ \underline{E} & \underline{1}^t \underline{\underline{X_{PH}}}\ \underline{F} \\ \underline{1}^t \underline{\underline{X_{PH}}}\ \underline{E} & \underline{1}^t \underline{\underline{X_H}}\ \underline{F} \end{bmatrix}$$

Obtem-se para os valores dos multiplicadores de Lagrange

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \eta \end{bmatrix} = \underline{\underline{XJ1}}^{-1} \begin{bmatrix} Po1 \\ Ho1 \end{bmatrix} \tag{32}$$

(33)

Nota-se agora com muita facilidade como os vetores de penalização $\underline{E}$ e $\underline{F}$, e logo as perdas incrementais afetam de forma decisiva o cálculo dos multiplicadores de Lagrange, tanto na matriz $\underline{\underline{XJ1}}$, como no cálculo dos números Po1 e Ho1.

Os vetores de penalização elétrica e térmica apa

recem desde o início, sendo que seu efeito é sentido de formas acentuadas nas equações (28) e (29) que dão os vetores P_g e H. Daí a importância da penalização das unidades quando se deseja obter um despacho econômico. Se nas equações (28) e (29) se fizer $\underline{E} = \underline{F} = \underline{1}$, tem-se o caso particular de um sistema sem perdas, o que era de se esperar, pois isto implicaria em unidades com penalização unitária, fator de penalidade unitário, e perdas incrementais nulos.

Para terminar o modelo matemático, é preciso calcular uma fórmula para as perdas e perdas incrementais.

Isto é feito de forma simplificada no item a seguir.

3.6 *CÁLCULO DAS PERDAS:-*

Seguindo o mesmo princípio do capítulo II em relação a consideração da potência ativa e reativa no despacho ótimo, as fórmulas mais simples que pode-se encontrar para as perdas do sistema podem ser dadas por:

$$PL = \left[\frac{Pg}{PC}\right]^t \underline{\underline{R}} \left[\frac{Pg}{PC}\right] \tag{34}$$

$$HL = \left[\frac{H}{HC}\right]^t \underline{\underline{RH}} \left[\frac{H}{HC}\right] \tag{35}$$

Onde a matriz $\underline{\underline{RH}}$ semelhantemente a matriz $\underline{\underline{R}}$ representa a resistência ao fluxo de vapor nos coletores. A equação (34) é de fácil compreensão para, contudo, se é levado a não crer

o mesmo por parte da equação (35), que pensa-se ser de um equacionamento mais complexo. Isto não deixa de ser verdade, entretanto, ao se deter em minúcias das máquinas térmicas geradoras de vapor, perde-se além de muito tempo, o objetivo real deste trabalho. O cálculo exato das perdas térmicas pode ser tema para um outro tipo de trabalho que complementaria este. De uma forma ou de outra, os resultados obtidos para um despacho usando (35) são bem aceitáveis a níveis industriais.

3.7 PERDAS INCREMENTAIS:-

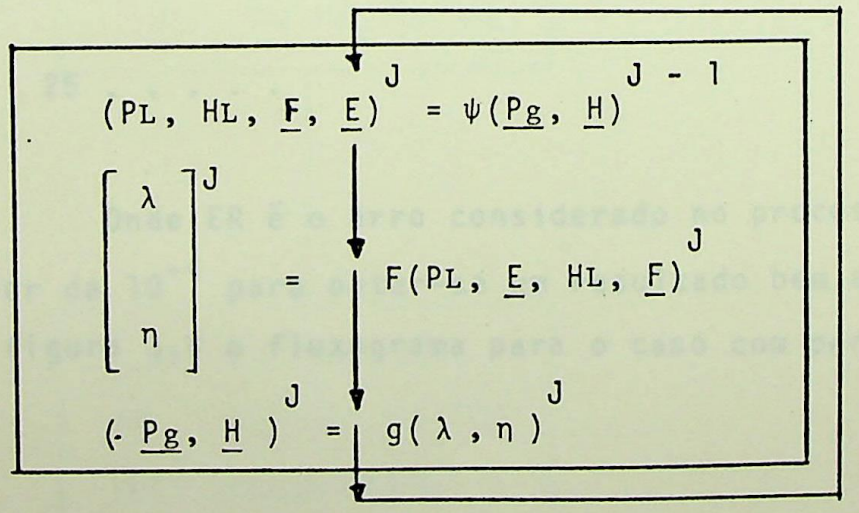
É fácil a partir das perdas concluir que

$$\frac{\partial PL}{\partial \underline{Pg}} = 2\ \underline{\underline{R}}\ \underline{Pg} \qquad (36)$$

$$\frac{\partial HL}{\partial \underline{H}} = 2\ \underline{\underline{R_H}}\ \underline{H} \qquad (37)$$

3.8 ALGORITIMO E FLUXOGRAMA:-

Em termos do equacionamento que foi feito, o processo iterativo pode ser visto da seguinte forma:



J = J + 1

J = nº de iterações. Deve-se iniciar com J = 1.

O processo iterativo tem início com J = 1, ou seja com o resultado do caso sem perdas. Com os valores de Pg e H oriundos do caso sem perdas, calcula-se os valores de E, F, HL, e PL para a primeira iteração, e com eles obtem-se os valores iniciais para os multiplicadores de Lagrange. E assim por diante como indica o esquema anterior.

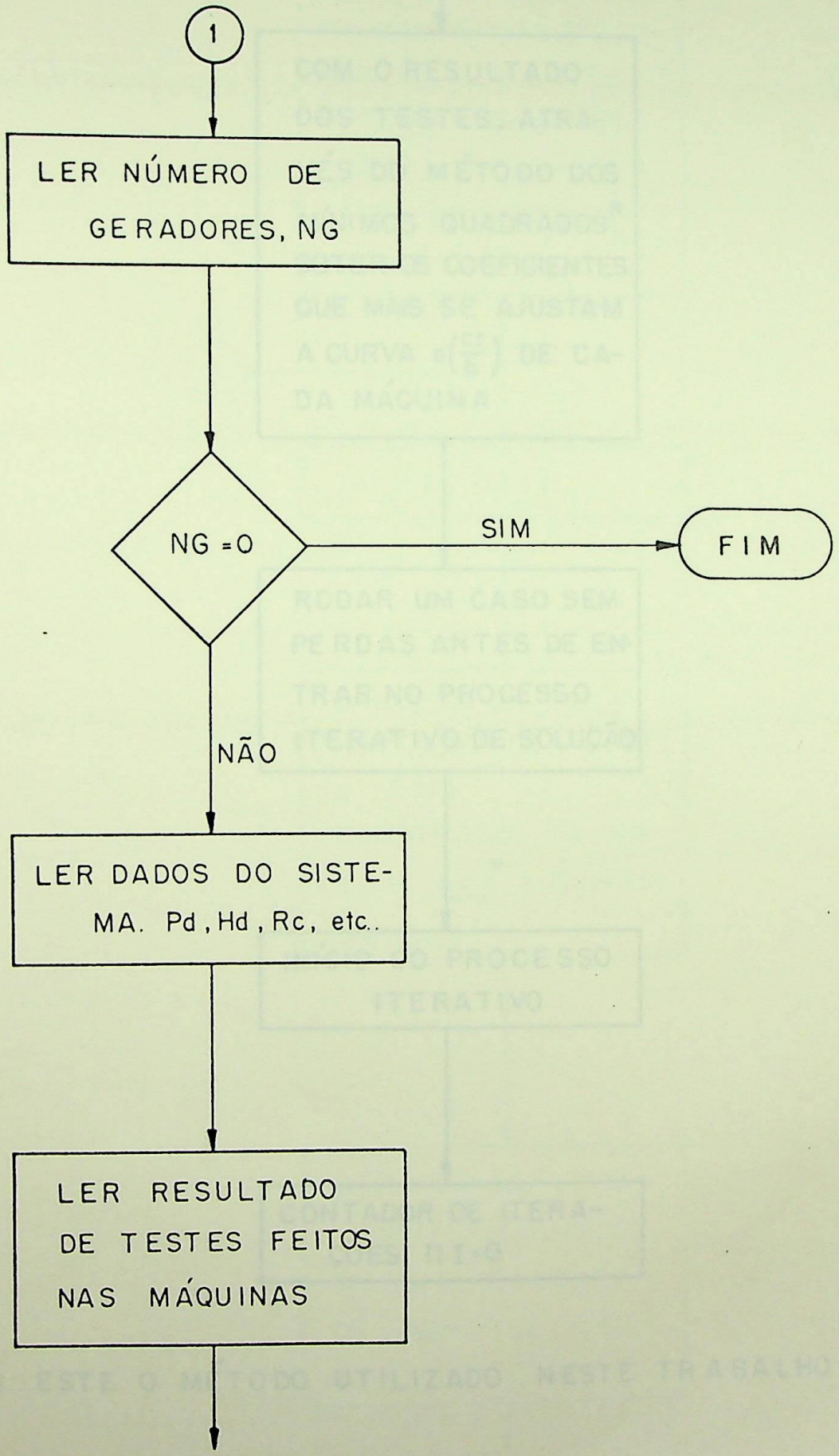
Esse processo iterativo deverá findar quando a convergência for conseguida. A fim de verificar a convergência pode-se usar a diferença entre dois valores consecutivos dos multiplicadores de Lagrange, perdas, etc. qualquer deles oferece bons resultados. Se por exemplo tomar como critério de convergência os valores de λ e η, o teste de convergência pode ser feito da seguinte forma.

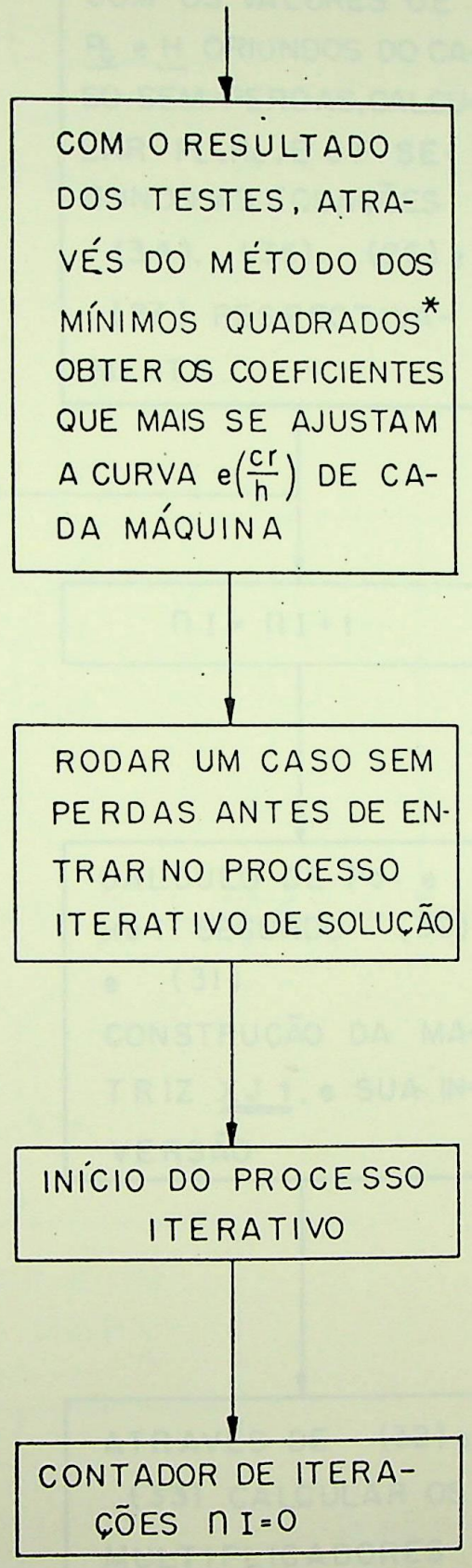
Na iteração K

```
      If (λ(K) - λ(K-1) L.Q.E.R. go to 21)

   21 If (η(K) - η(K-1) L.Q.E.R. go to 25)

   25 . . . . .
```

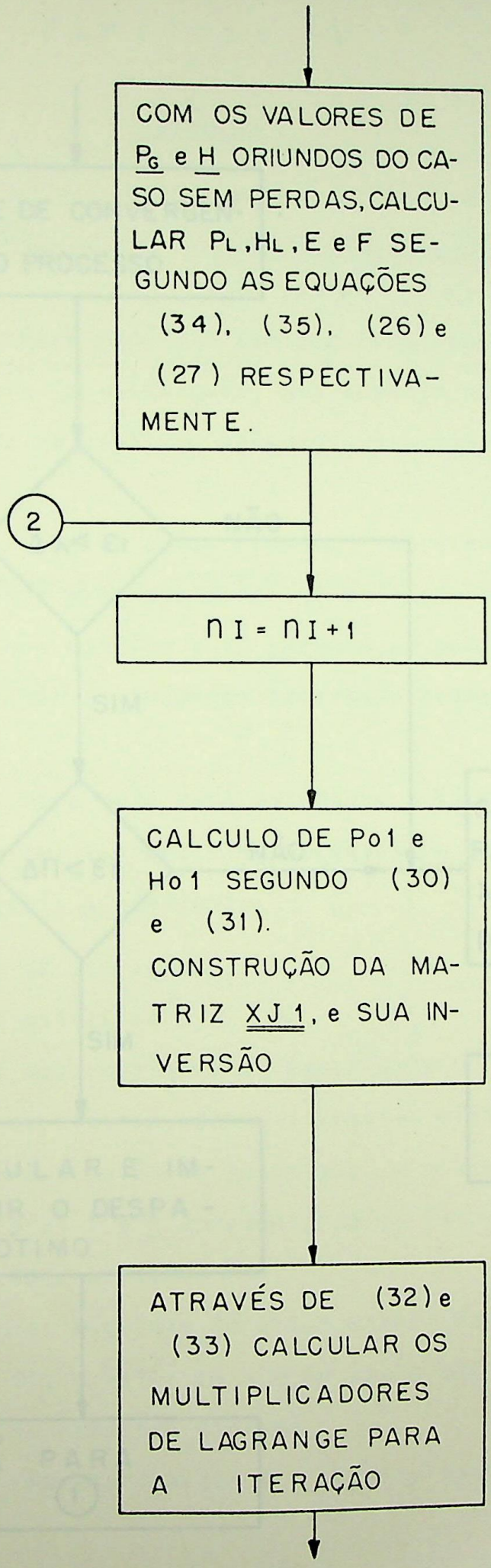
Onde ER é o erro considerado no processo. Geralmente tem valor de 10^{-4} para obter-se um resultado bem aceitável. A seguir na figura 3.4 o fluxograma para o caso com perdas consideradas.

— FLUXOGRAMA.


1
LER NÚMERO DE GERADORES, NG
NG = 0
SIM
FIM
NÃO
LER DADOS DO SISTEMA. Pd, Hd, Rc, etc..
LER RESULTADO DE TESTES FEITOS NAS MÁQUINAS



*FOI ESTE O MÉTODO UTILIZADO NESTE TRABALHO


COM OS VALORES DE $\underline{P_G}$ e $\underline{H}$ ORIUNDOS DO CASO SEM PERDAS, CALCULAR P_L, H_L, E e F SEGUNDO AS EQUAÇÕES (34), (35), (26) e (27) RESPECTIVAMENTE.
2
$\Pi I = \Pi I + 1$
CALCULO DE Po1 e Ho1 SEGUNDO (30) e (31). CONSTRUÇÃO DA MATRIZ $\underline{\underline{XJ1}}$, e SUA INVERSÃO
ATRAVÉS DE (32) e (33) CALCULAR OS MULTIPLICADORES DE LAGRANGE PARA A ITERAÇÃO

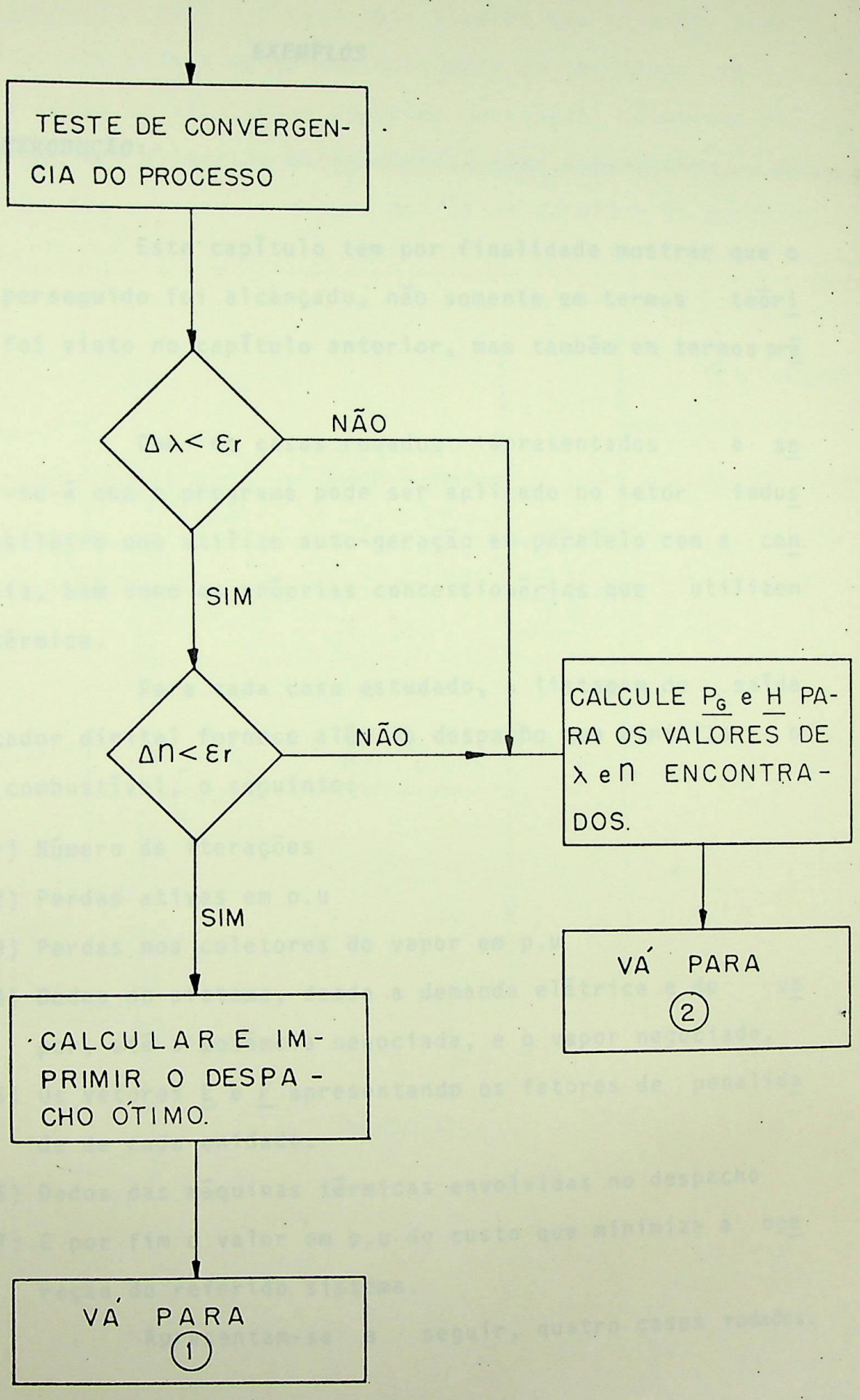

TESTE DE CONVERGENCIA DO PROCESSO
Δλ< εr
NÃO
SIM
Δn< εr
NÃO
SIM
CALCULE P_G e H PARA OS VALORES DE λ e n ENCONTRADOS.
VÁ PARA (2)
CALCULAR E IMPRIMIR O DESPACHO ÓTIMO.
VÁ PARA (1)

Figura 3.4

CAPÍTULO IV

EXEMPLOS

INTRODUÇÃO:-

Este capítulo tem por finalidade mostrar que o objetivo perseguido foi alcançado, não somente em termos teóricos como foi visto no capítulo anterior, mas também em termos práticos.

Com os casos rodados apresentados a seguir, ver-se-á que o programa pode ser aplicado no setor industrial brasileiro que utilize auto-geração em paralelo com a concessionária, bem como as próprias concessionárias que utilizem geração térmica.

Para cada caso estudado, a listagem de saída do computador digital fornece além do despacho que minimiza o gasto do combustível, o seguinte:

1) Número de iterações
2) Perdas ativas em p.u
3) Perdas nos coletores do vapor em p.u
4) Dados do sistema, desde a demanda elétrica e de vapor, até a potência negociada, e o vapor negociado.
5) Os vetores E e F apresentando os fatores de penalidade de cada unidade.
6) Dados das máquinas térmicas envolvidas no despacho
7) E por fim o valor em p.u do custo que minimiza a operação do referido sistema.

Apresentam-se a seguir, quatro casos rodados.

EXEMPLO NÚMERO 1 - Este é o caso mais simples que se pode rodar (não existe caso mais simples que este para se verificar se o despacho é ótimo ou não). Duas unidades geradoras, idênticas até quanto as perdas, alimentam um pequeno sistema consumidor de energia elétrica e vapor. A figura 4.1 dá os detalhes do referido sistema.

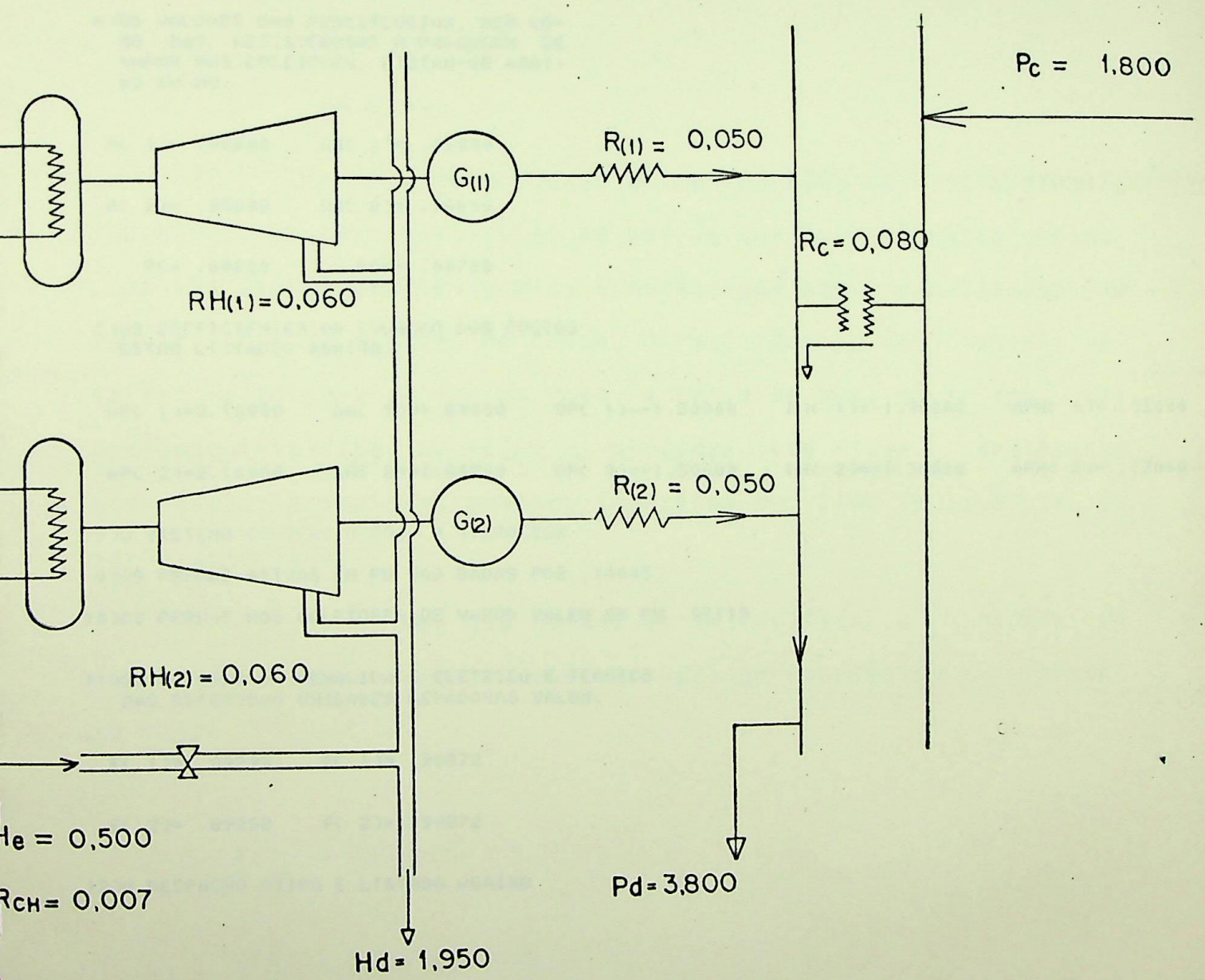


Figura 4.1

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

RESULTADO:-

CARACTERISTICAS DO SISTEMA EM ESTUDO

1)O SISTEMA E COMPOSTO POR 2 UNIDADES TERMOELETRICAS

2)A DEMANDA ELETRICA EM PU. E DADA POR 3.0000

3)A DEMANDA DE VAPOR EM PU. TEM POR VALOR 1.9500

4)A POTENCIA COMPRADA EM PU. TEM POR VALOR 1.3000

5)O VAPOR COMPRADO EM PU TEM POR VALOR .5000

6)OS VALORES DAS RESISTENCIAS, BEM CO-
MO DAS RESISTENCIAS A PASSAGEM DE
VAPOR NOS COLETORES, LISTAM-SE ABAI-
XO EM PU.

R(1)= .05000 RH(1)= .06000

R(2)= .05000 RH(2)= .06000

RC= .00800 RCH= .00700

7)OS COEFICIENTES DA EQUACAO DOS CUSTOS
ESTAO LISTADOS ABAIXO.

AP(1)=2.10000	AH(1)=1.80000	DP(1)=-1.50000	DH(1)=-1.30000	APH(1)= .03000
AP(2)=2.10000	AH(2)=1.80000	DP(2)=-1.50000	DH(2)=-1.30000	APH(2)= .03000

8)O SISTEMA CONVERGIU COM 8 ITERACOES

9)AS PERDAS ATIVAS EM PU SAO DADAS POR .14045

10)AS PERDAS NOS COLETORES DE VAPOR VALEM EM PU .07119

11)OS FATORES DE PENALIDADE ELETRICO,E TERMICO
DAS REFERIDAS UNIDADES GERADORAS VALEM.

E(1)= .89298 F(1)= .90872

E(2)= .89298 F(2)= .90872

12)O DESPACHO OTIMO E LISTADO ABAIXO

PG(1)= 1.0702 H(1)= .76070

PG(2)= 1.0702 H(2)= .76070

O CUSTO OPERATIVO MINIMO E DADO EM PU POR

CUSTO= 1.75303

O caso rodado acima foi além de o mais simples possível, um caso particular em que as unidades térmicas geradoras são absolutamente iguais, e estão igualmente penalizadas (ver coeficientes da equação de custo, e resistências das linhas). Isto foi feito para provar um fato, a cerca do qual já se tem uma resposta intuitiva, ou seja: as unidades irão ficar igualmente carregadas, e seu carregamento independe do valor da potência, ou vapor negociados.

Uma das formas de se verificar a validade do resultado é fazer a comprovação do balanço energético do sistema; ou seja:

$$\underline{1}^t \underline{Pg} = Pd + PL - Pc$$

$$\underline{1}^t \underline{H} = Hd + HL - Hc$$

$$Pd + PL - Pc = 2,14050 \text{ p.u.}$$

$$Hd + HL - Hc = 1,52119 \quad p.u$$

da listagem vem:

$$1^t\underline{Pg} = 2,1404$$

$$\underline{1}^t\underline{H} = 1,5214$$

É fácil verificar que:

$$\underline{1}^t\underline{Pg} - Pd - PL + Pc \simeq 10^{-4}$$

e, $$\underline{1}^t\underline{H} - Hd - HL + Hc \simeq 10^{-4}$$

Este erro é absolutamente aceitável a níveis industriais, uma vez que lida-se com grandes quantidades de energia. No entanto ele ainda pode ser reduzido, contudo, isto implicaria em maior número de iterações, significando mais gasto computacional que talvez não compense em termos econômicos.

EXEMPLO NÚMERO 2 - Sistema idêntico ao do exemplo número 1, só que agora ele vende energia elétrica e vapor, conforme mostra a figura 4.2.

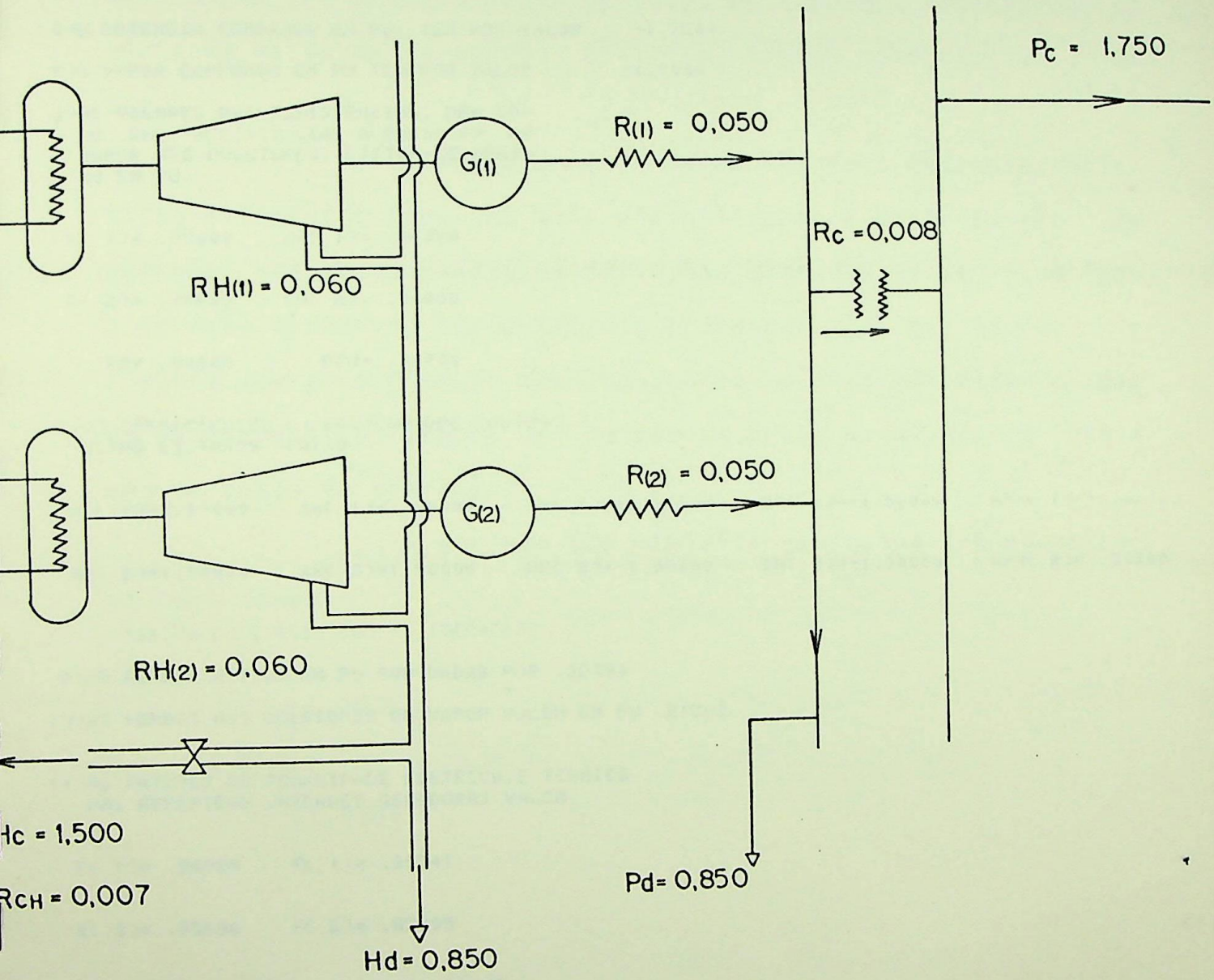


Figura 4.2

RESULTADO:-

CARACTERISTICAS DO SISTEMA EM PU100

1)O SISTEMA E COMPOSTO POR 2 UNIDADES TERMOELETRICAS

2)A DEMANDA ELETRICA EM PU. E DADA POR .0500

3)A DEMANDA DE VAPOR EM PU. TEM POR VALOR .0500

4)A POTENCIA COMPRADA EM PU. TEM POR VALOR -1.7500

5)O VAPOR COMPRADO EM PU TEM POR VALOR -1.5000

6)OS VALORES DAS RESISTENCIAS, DEM CO-
MO DAS RELACIONADAS A PASSAGEM DE
VAPOR NOS COLETORES, LISTAM-SE ABAI-
XO EM PU.

RK(1)= .05000 DK(1)= .06000

RK(2)= .05000 DK(2)= .06000

RC= .00000 PCH= .00700

7)OS COEFICIENTES DA FUNCAO DOS CUSTOS
ESTAO LISTADOS ABAIXO.

APK(1)=2.10000 BPK(1)=1.90000 DPK(1)=-1.90000 DHK(1)=-1.50000 APHK(1)= .00300

APK(2)=1.90000 BPK(2)=1.50000 DPK(2)=-1.50000 DHK(2)=-1.30000 APHK(2)= .00300

8)O SISTEMA E COMPOSTO DE 10 ITERACOES

9)AS PERDAS ATIVAS EM PU SAO DADAS POR .22390

10)AS PERDAS NOS COLETORES DE VAPOR VALEM EM PU .21082

11)OS FATORES DE PENALIDADE ELETRICO,E TERMICO
DAS REFERIDAS UNIDADES GERADORAS VALEM.

E(1)= .86065 F(1)= .85541

E(.2)= .85696 F(2)= .83695

12.0 DESPACHO OTIMO E LISTADO ABAIXO

```
PGK 1)= 1.3935     HK 1)=1.20488

PGK 2)= 1.4304     HK 2)=1.35971

1300 CUSTO OPERATIVO MININO E DADO EM PU POR

 CUSTO= 4.99166
```

Como se pode observar pelos dados, trata-se de um sistema predominantemente gerador, um tipo de concessionária que além da venda de energia elétrica, também comercializa o vapor.

Neste exemplo onde as máquinas têm características diferentes fica bem mais difícil fazer a distribuição da geração, uma vez que existem infinitas maneiras de se combinar a geração atendendo perfeitamente a demanda. Daí que operar o sistema sem procedimento técnico-operativo para minimizar o gasto de combustível sempre vai deixar um pouco de dúvida em relação ao custo da operação.

A geração que minimiza os custos foi encontrada como sendo:

$$\underline{Pg} \begin{bmatrix} 1,3935 \\ \\ 1,4304 \end{bmatrix} \text{ p.u}$$

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} 1,2049 \\ \\ 1,3588 \end{bmatrix} \text{ p.u}$$

$$\underline{1}^t\underline{Pg} = 2,8239 \text{ p.u}$$

$$\underline{1}^t\underline{H} = 2,5637 \text{ p.u}$$

Suponha que o sistema esteja operando com a seguinte configuração.

$$P = \begin{bmatrix} 1,4304 \\ \\ 1,3935 \end{bmatrix} \text{ p.u}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1,3588 \\ \\ 1,2049 \end{bmatrix} \text{ p.u}$$

Analisa-se a seguir seu peso nos custos operativos do sistema.

O custo total vale:

$$C = C_1 + C_2$$

Onde C_1 é o custo operativo da unidade 1, e C_2 o custo operativo da unidade 2.

Em termos matriciais, o custo total como já é conhecido tem a forma abaixo:

$$C = \underline{Pg}^t \underline{\underline{AP}}\ \underline{Pg} + \underline{DP}^t \underline{Pg} + \underline{H}^t \underline{\underline{AH}}\ \underline{H} + \underline{DH}^t \underline{H} + \underline{Pg}^t \underline{\underline{APH}}\ \underline{H}$$

ou, em termos numéricos

$$C = \begin{bmatrix} 1,4304 & 1,3935 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2,1000 & \\ & 1,9000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,4304 \\ \\ 1,3935 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} - 1,9000 & - & 1,5000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,4304 \\ \\ 1,3935 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 1,3588 & 1,2049 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,8000 & \\ & 1,5000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,3588 \\ 1,2049 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 1,5000 - 1,3000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,3588 \\ 1,2049 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 1,4304 & 1,3935 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,0030 & \\ & 0,0030 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,3588 \\ 1,2049 \end{bmatrix}$$

Efetuando os cálculos, obtem-se:

C = 5,0856 p.u

O que corresponde a um aumento de 9,394% em relação ao custo ótimo. O que é que isto significa em termos de dinheiro?

Suponha que o custo base seja de 10.000 Cr$/h para a geração elétrica e de vapor respectivamente, e que esta demanda seja a demanda média durante todo o dia. Em um dia o custo do despacho feito a olho será de:

$$5,0856 \times 10.000 \frac{Cr\$}{h} \times 24\ h = 1.220.544,00\ Cr\$$$

contra

$$4,99166 \times 10.000 \frac{Cr\$}{h} \times 24 = 1.197.998,40\ Cr\$$$

do despacho otimizado

Em um ano tem-se:

Despacho a olho - 445.498.560,00 Cr$

Despacho ótimo = 437.269.416,00 Cr$

O despacho ótimo acarretaria neste caso uma economia de 8.229.144 Cr$ por ano.

Qual o significado destes números em dez anos? E se nestes anos se levar em conta o crescimento do sistema?

Pode-se pegar alguma outra configuração, contudo, este exemplo mostrou a grande necessidade de se ter um programa que otimize o custo operativo.

EXEMPLO NÚMERO 3 - A figura 4.3 mostra um sistema com três turbinas de características diferentes. É um sistema tipicamente industrial, cujo vapor gerado é utilizado pela própria indústria.

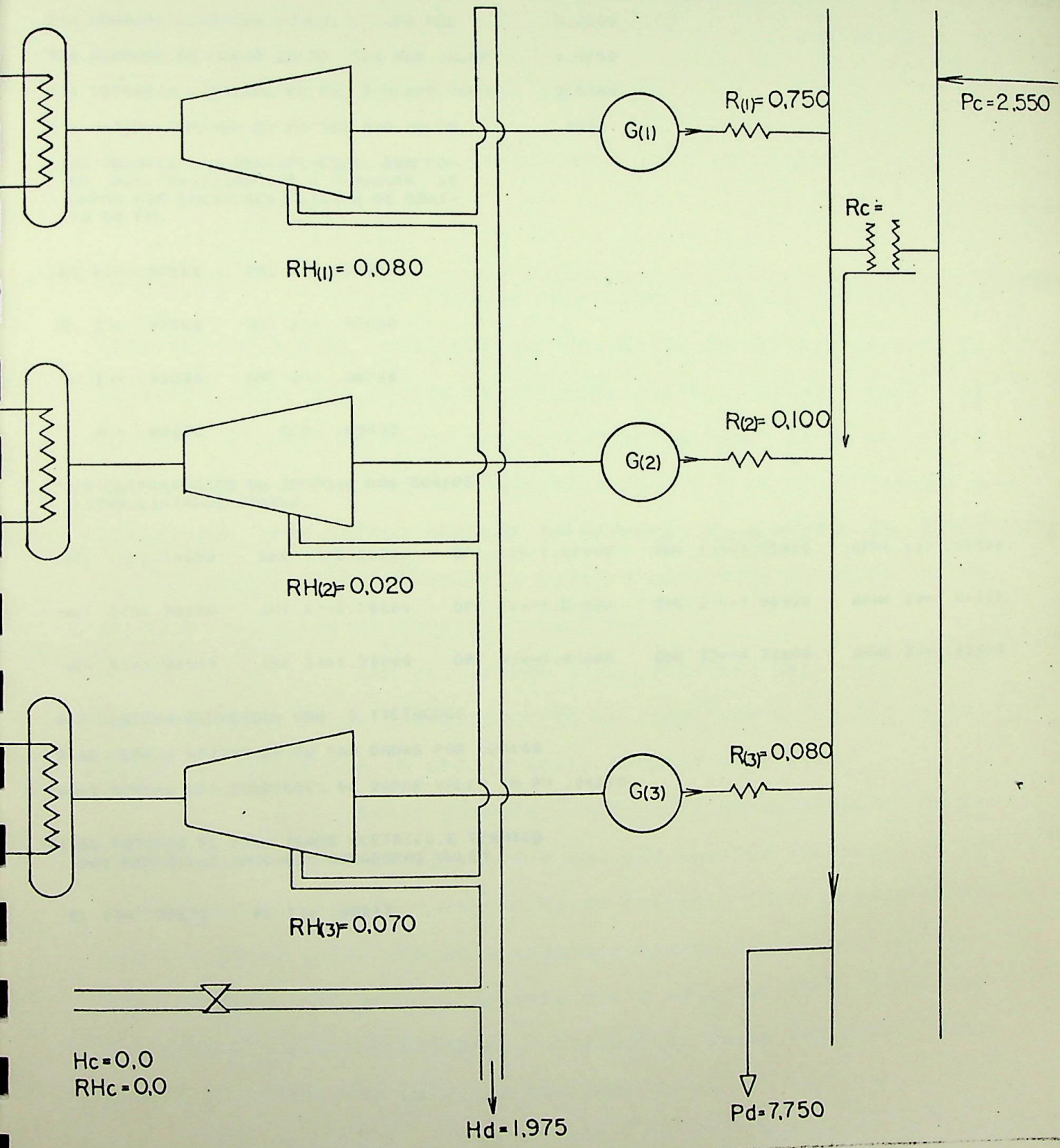


Figura 4.3

RESULTADO:-

CARACTERISTICAS DO SISTEMA EM ESTUDO

1)O SISTEMA E COMPOSTO POR 3 UNIDADES TERMOELETRICAS

2)A DEMANDA ELETRICA EM PU. E DADA POR 7.7500

3)A DEMANDA DE VAPOR EM PU. TEM POR VALOR 1.9750

4)A POTENCIA COMPRADA EM PU. TEM POR VALOR 2.5500

5)O VAPOR COMPRADO EM PU TEM POR VALOR .0000

6)OS VALORES DAS RESISTENCIAS, BEM COMO DAS RESISTENCIAS A PASSAGEM DE VAPOR NOS COLETORES, LISTAM-SE ABAIXO EM PU.

R(1)= .07500 RH(1)= .03000

R(2)= .01000 RH(2)= .02000

R(3)= .00000 RH(3)= .00700

RC= .00200 RCH= .00000

7)OS COEFICIENTES DA EQUACAO DOS CUSTOS ESTAO LISTADOS ABAIXO.

AP(1)=2.10000	AH(1)=2.00000	DP(1)=-1.60000	DH(1)=-1.85000	APH(1)= .03000
AP(2)=1.90000	AH(2)=2.70000	DP(2)=-1.50000	DH(2)=-1.90000	APH(2)= .01000
AP(3)=1.80000	AH(3)=1.90000	DP(3)=-1.40000	DH(3)=-1.70000	APH(3)= .01000

8)O SISTEMA CONVERGIU COM 9 ITERACOES

9)AS PERDAS ATIVAS EM PU SAO DADAS POR .25140

10)AS PERDAS NOS COLETORES DE VAPOR VALEM EM PU .04320

11)OS FATORES DE PENALIDADE ELETRICO,E TERMICO DAS REFERIDAS UNIDADES GERADORAS VALEM.

E(1)= .77523 F(1)= .89217

```
E( 2)= .96137     F( 2)= .97406

E( 3)= .96766     F( 3)= .99017

12)O DESPACHO OTIMO E LISTADO ABAIXO

PG( 1)= 1.4985    H( 1)= .67395

PG( 2)= 1.9314    H( 2)= .64846

PG( 3)= 2.0213    H( 3)= .70221

13)O CUSTO OPERATÍVO MÍNIMO E DADO EM PU POR

  CUSTO=10.18741
```

Este sistema representa o típico sistema industrial. A grande indústria que necessita de uma boa reserva de potência, mantendo sempre as unidades quentes, prontas para absorver o excesso de carga provocado por qualquer falha no sistema fornecedor. É o tipo de indústria em que o material industrializado não pode sofrer nenhuma interrupção no processo de fabricação, pois isto comprometeria muito a qualidade final do produto a ser colocado no mercado consumidor.

Num caso deste tipo, fica bem mais difícil para o operador fazer a distribuição de carga com o intuito de otimizar os custos sem um procedimento técnico confiável.

Neste exemplo é bem fácil de comprovar a importância dos fatores de penalidade que dão uma boa indicação da relação entre a geração e as perdas no processo da transmissão, uma vez que ele é calculado pela seguinte expressão, $E(i) = 1 - \frac{\partial PL}{\partial Pg(i)}$ onde, quanto mais próximo de zero for o valor de E(i), mais penalizada vai estar a unidade, contribuindo assim com menor peso para o suprimento da carga em questão.

De forma semelhante, quanto maior for E(i)mais próximo de zero vai estar a relação $\frac{\partial PL}{\partial Pg(i)}$.

Indicando assim que para esta unidade em questão, as perdas por transmissão não serão tão significantes. Ela torna-se então uma candidata a ficar bem mais carregada que as demais. Em nosso exemplo tem-se:

$E(1) = 0,77523$

$E(2) = 0,96137$

$E(3) = 0,96766$

O que indica,

$$\frac{\partial PL}{\partial Pg(1)} = 0,22477$$

$$\frac{\partial PL}{\partial Pg(2)} = 0,03863$$

$$\frac{\partial PL}{\partial Pg(3)} = 0,03224$$

Fica completamente confirmado que, se o operador de um sistema não tiver conhecimento destes fatores de penalidade e seus significados, bem como das qualidades internas das máquinas (seus coeficientes na equação dos custos), fica quase impossível operar de forma econômica, e esta impossibilidade aumenta com o aumento do número de unidades.

Da mesma maneira que no exemplo anterior, vai-

se a partir de uma distribuição aproximada verificar os gastos excessivos em um ano de operação.

A geração deve satisfazer:

$$\underline{1}^t \underline{Pg} = PL + Pd - Pc$$

$$\underline{1}^t \underline{H} = HL + Hd$$

ou,

$$Pg(1) + Pg(2) + Pg(3) = 5,4514 \text{ p.u}$$

$$H(1) + H(2) + H(3) = 2,0232 \text{ p.u}$$

Suponha a seguinte distribuição de carga:

$$Pg(1) = 2,00 \text{ p.u}$$

$$Pg(2) = 1,71 \text{ p.u}$$

$$Pg(3) = 1,75 \text{ p.u}$$

e,

$$H(1) = H(2) = H(3) = 0,68 \text{ p.u}$$

De forma semelhante ao que fizemos no exemplo anterior, o custo tem por valor:

$$C = \begin{bmatrix} 2,00 & 1,71 & 1,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2,10 & & \\ & 1,90 & \\ & & 1,80 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2,00 \\ 1,71 \\ 1,75 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} -1,60 & -1,50 & -1,40 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2,00 \\ 1,71 \\ 1,75 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0,68 & 0,68 & 0,68 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2,00 & & \\ & 2,20 & \\ & & 1,90 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,68 \\ 0,68 \\ 0,68 \end{bmatrix}.$$

$$+ \begin{bmatrix} -1,85 & -1,90 & -1,70 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,68 \\ 0,68 \\ 0,68 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 2,00 & 1,71 & 1,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,03 & & \\ & 0,01 & \\ & & 0,01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,68 \\ 0,68 \\ 0,68 \end{bmatrix}$$

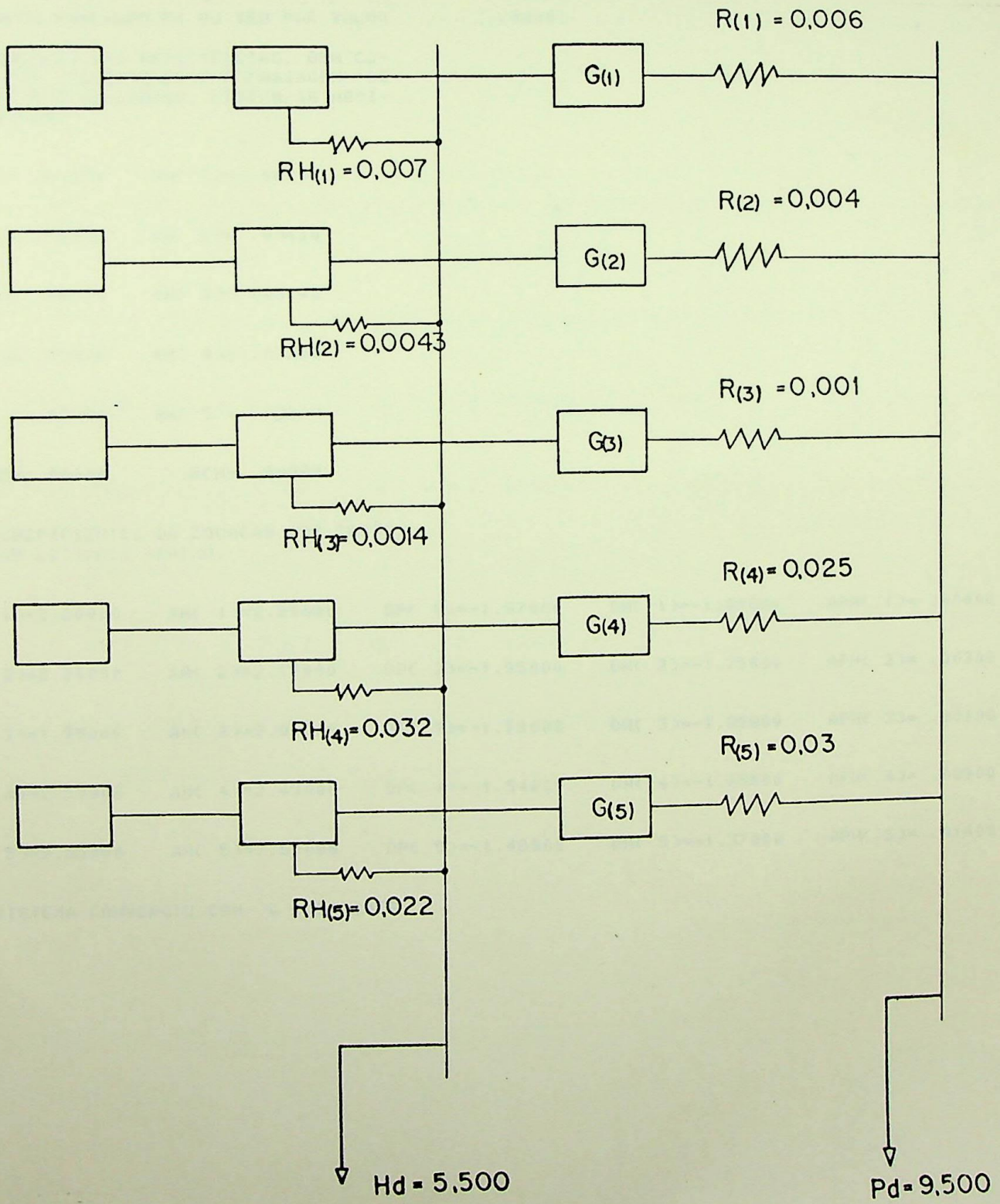
$C = 10,44$ p.u

Isto significa uma variação de aproximadamente 2,4 % . em relação ao custo ótimo. Tomando o mesmo valor base para o custo que no exemplo anterior, ou seja 10.000 $\frac{Cr\$}{h}$, vemos que em cada hora há um gasto de 2.530,00 Cr$ a mais.

Isto significa que em um dia este gasto passaria para 60.720,00 Cr$, em um ano este gasto excessivo seria de

22.162.800,00 Cr$ (vinte e dois milhões cento e sessenta e dois mil e oitocentos cruzeiros). Este é o valor que se pouparia por ano aplicando o processo de otimização.

EXEMPLO NÚMERO 4 - Este sistema representa uma indústria ou con - cessionária cem por cento térmica. Ver figura 4.4.



RESULTADO:-

CARACTERISTICAS DO SISTEMA EM ESTUDO

1)O SISTEMA E COMPOSTO POR 5 UNIDADES TERMOELETRICAS

2)A DEMANDA ELETRICA EM PU. E DADA POR 9.5000

3)A DEMANDA DE VAPOR EM PU. TEM POR VALOR 5.5000

4)A POTENCIA COMPRADA EM PU. TEM POR VALOR .0000

5)O VAPOR COMPRADO EM PU TEM POR VALOR .0000

6)OS VALORES DAS RESISTENCIAS, BEM CO-
MO DAS RESISTENCIAS A PASSAGEM DE
VAPOR NOS COLETORES, LISTAM-SE ABAI-
XO EM PU:

R(1)= .00600 RH(1)= .00700

R(2)= .00400 RH(2)= .00430

R(3)= .00100 RH(3)= .00140

R(4)= .02500 RH(4)= .03200

R(5)= .03000 RH(5)= .03200

RC= .00000 RCH= .00000

7)OS COEFICIENTES DA EQUACAO DOS CUSTOS
SAO LISTADOS ABAIXO.

AP(1)=2.20000	AH(1)=2.21000	DP(1)=-1.97000	DH(1)=-1.80000	APH(1)= .00400
AP(2)=2.25000	AH(2)=2.19000	DP(2)=-1.95000	DH(2)=-1.75000	APH(2)= .00300
AP(3)=1.95000	AH(3)=2.00000	DP(3)=-1.78000	DH(3)=-1.85000	APH(3)= .00100
AP(4)=2.50000	AH(4)=2.45000	DP(4)=-1.54000	DH(4)=-1.65000	APH(4)= .00900
AP(5)=2.50000	AH(5)=2.50000	DP(5)=-1.40000	DH(5)=-1.37000	APH(5)= .01400

8)O SISTEMA CONVERGIU COM 6 ITERACOES

9)AS PERDAS ATIVAS EM PU SAO DADAS POR .19131

10)AS PERDAS NOS COLETORES DE VAPOR VALEM EM PU .06799

11)OS FATORES DE PENALIDADE ELETRICO,E TERMICO
DAS REFERIDAS UNIDADES GERADORAS VALEM.

E(1)= .97505 F(1)= .98366

E(2)= .98366 F(2)= .98992

E(3)= .99533 F(3)= .99632

E(4)= .91714 F(4)= .93676

E(5)= .90540 F(5)= .95224

12)O DESPACHO OTIMO E LISTADO ABAIXO

PG(1)= 2.0789 H(1)=1.16724

PG(2)= 2.0434 H(2)=1.17199

PG(3)= 2.3358 H(3)=1.31463

PG(4)= 1.6372 H(4)= .98817

PG(5)= 1.5767 H(5)= .92637

13)O CUSTO OPERATIVO MINIMO E DADO EM PU POR

CUSTO=30.27669

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

5.1 INTRODUÇÃO:-

Com a conclusão do capítulo quatro espera-se ter atingido o objetivo proposto, o de representar em um modelo matemático um sistema térmico com geração de vapor e/ou energia elétrica. E, a partir de técnicas matemáticas obter a otimização dos custos operacionais, encontrando a geração que satisfaça o critério de despacho ótimo.

5.2 COMENTÁRIO SOBRE O CÁLCULO DAS PERDAS:-

As perdas foram calculadas de forma amplificada. Um cálculo exato iria exigir um fluxo de carga para a obtenção das perdas incrementais da geração elétrica e, sem sombra de dúvida, um estudo mais detalhado no cálculo das perdas nos coletores de vapor e dos respectivos fatores de penalidade. Pode-se, ainda acrescentar que, as perdas térmicas, bem como sua diferenciação em relação a geração de vapor constituiriam um tema para um trabalho deste tipo. Devido ao valume de estudo adicional, e ao fato que iria desviar um pouco o objetivo proposto, não se fez isto.

O modelo, embora simplificado na obtenção das perdas na transmissão, deu-nos, ainda assim, resultados bastante confiáveis. Lidamos com grandes blocos de energia, e as perdas são uma pequena parcela da geração. Em termos simplificados a

relação potência perdida numa linha versus potência gerada pode ser calculado como se descreve abaixo:

$$\frac{\text{Perda na linha i}}{\text{Potência que circula nesta linha}} \cong R(i)$$

Daí que, para cada linha a potência gerada é aproximadamente cem vezes maior que a perda. O que se conclui que para sistemas onde grandes massas de potências estão em jogo, esta aproximação pode ser levada em conta sem pesar muito nos resultados finais.

5.3 *ASPECTOS GERAIS DO PROGRAMA:-*

O programa é constituido básicamente de quatro sub-programas descritos como segue:

5.3.1 *Sub-Programa número um:*

O Sub-Programa número um faz basicamente o seguinte:

1. Leitura dos dados do sistema
2. Leitura dos testes realizados nas máquinas com a finalidade de obter os coeficientes das equações de custo.
3. Obtenção através do Método dos Mínimos Quadrados dos valores em p.u. dos coeficientes das equações de custo.

5.3.2 *Sub-Programa número dois:*

A partir do conhecimento que o despacho ótimo sem considerar as perdas na transmissão é um ótimo passo inicial para o processo iterativo, o Sub-Programa número dois realiza este despacho utilizando os resultados do Sub-Programa número um.

O fluxograma para este Sub-Programa encontra-se nas páginas 68 e 69 (Capítulo três).

5.3.3 *Sub-Programa número três:*

É considerado o coração do Programa. Nele é feito o processo iterativo.

O esquema de ação para este Sub-Programa encontra-se nas páginas 87, 88, 89 e 90 (Capítulo três).

5.3.4 *Sub-Programa número quatro:*

Impressão dos resultados.

Dentre os diversos esquemas de ajustes de curvas, foi escolhido o método dos mínimos quadrados. O ajuste é feito á partir de alguns testes com as máquinas. Desta forma a otimização leva em consideração a constituição interna da unidade geradora. Isto nos dá uma margem de confiança bem maior, uma vez que a otimização não vai ser obtida apenas a partir dos fato

res de penalidade, perdas incrementais, mas também de fatores internos de construção que se refletem nos coeficientes da curva de custos a tal ponto que uma unidade com perda incremental bem reduzida pode funcionar como se estivesse bem mais penalizada.

A segunda parte do programa realiza o despacho sem levar em conta as perdas por transmissão. Uma vez que já viu se ser esse um bom passo inicial como inicio ao processo iterativo. Para sistemas bem projetados, a solução sem perdas fica bem próxima daquela onde as perdas são consideradas.

Na terceira parte do programa, o processo iterativo é iniciado. As perdas são consideradas, e o despacho ótimo é então conseguido como um erro da ordem de 10^{-4}, para, em média 6 e 7 iterações, que básicamente independem do tamanho do sistema. O teste de convergência é feito com base nos multiplicadores do Lagrange. O desvio considerado é também da ordem de 10^{-4}.

A convergência é básicamente linear e praticamente independe do tamanho do sistema em questão. Para sistemas bem projetados a solução é alcançada com, em média 6 a 7 iterações. Quando ocorre um aumento nas perdas, o número de iterações aumenta, não ultrapassando contudo a casa das onze ou doze iterações por caso rodado.

5.4 *FLEXIBILIDADE DO PROGRAMA:-*

O trabalho foi edealizado para sistemas industriais que tivessem auto-geração elétrica em paralelo com o sistema fornecedor, e ainda gerassem vapor.

Contudo, o moderno conceito de sistema, bem como a semelhança entre gerar e consumir deram ao modelo representativo do sistema as seguintes opções para aplicação:

1. Aplicação a sistemas industriais com auto geração, e geração de vapor.
2. Aplicação a sistemas onde só os custos relativos a geração de vapor devem ser otimizados. Em outras palavras: sistemas que só geram vapor.
3. Aplica-se a qualquer parque térmico de geração. Concessionários que tenham geração térmica em paralelo com a hidroeletricidade, ou geração isolada.
4. Qualquer tipo de unidade térmica geradora (o modelo não faz nenhuma exigência quanto a isso). Desde as mais simples até as usinas nucleares. Todos os tipos de máquinas térmicas geradoras têm a curva de saída semelhante. Daí que, para cada caso o trabalho é obter a equação dos custos.
5. E, finalmente, o programa aceita modificações, introdução de novas rotinas com vistas a futuras ampliações tais como: Introdução de um fluxo de carga, cálculo exato das perdas, etc.

5.5 *CONCLUSÃO FINAL:-*

O desejo é, não somente ter atingido o objetivo técnico, mas que se tenha dado um passo a mais no estudo

da otimização dos sistemas elétricos. E que este passo não tenha, de forma nenhuma, sido isolado dos já dados, nem tão pouco dos que se há de dar. A realização consiste não tanto em ter feito, como no fato de sua inclusão no conjunto de todos os trabalhos que têm uma aplicação prática, especialmente no que diz respeito às necessidades brasileiras.

A N E X O

NEGOCIAÇÃO DO VAPOR A ALTA PRESSÃO

Como se observa, especificamente no capítulo três , figura 3.3, página 77, o vapor negociado (Hc) para ser utilizado no processo industrial, se dá em baixa pressão. O modelo matemático contudo se aplica a ambos os casos, uma vez que a variável pressão não está incorporada diretamente as equações de custo e restrições conforme mostram as equações (1), (2) e (3) do capítulo três, que são a base matemática para o modelo físico apresentado.

Apresenta-se a seguir na figura nº 1 um modelo físico para duas unidades onde o vapor é negociado a alta pressão.

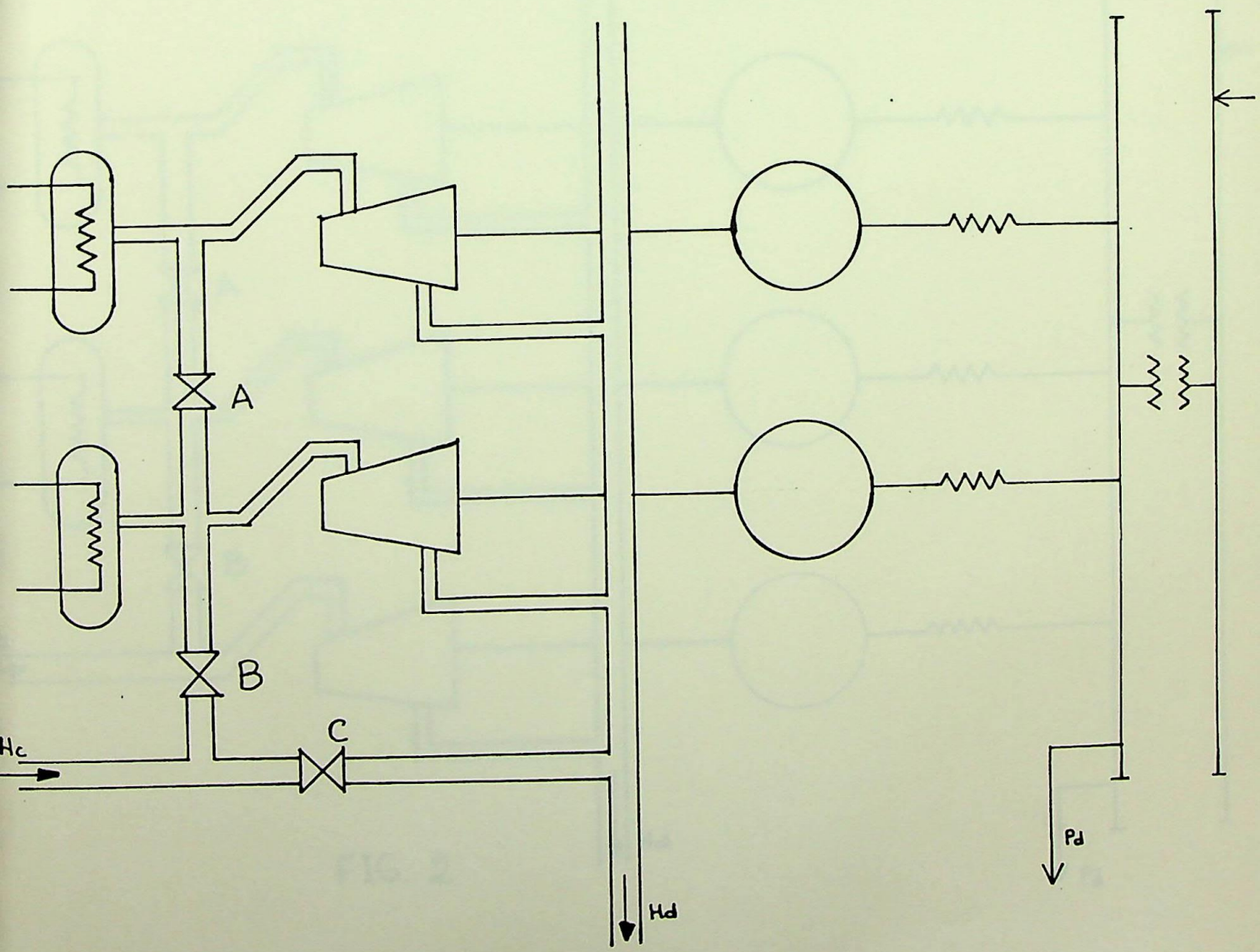


FIG. 1

Como se observa, a única diferença em relação ao modelo adotado no trabalho é que o vapor é vendido ou comprado a alta pressão.

Quando o vapor for vendido a outro sistema, as válvulas A e B são abertas de acordo com a alíquota do vapor negociado. No caso de o vapor ser comprado, existe uma válvula redutora C que reduz a pressão para sua utilização no processo industrial. No lugar da válvula redutora C pode-se colocar um gerador que faria a redução da pressão do vapor ao mesmo tempo que geraria energia, como indica a figura 2.

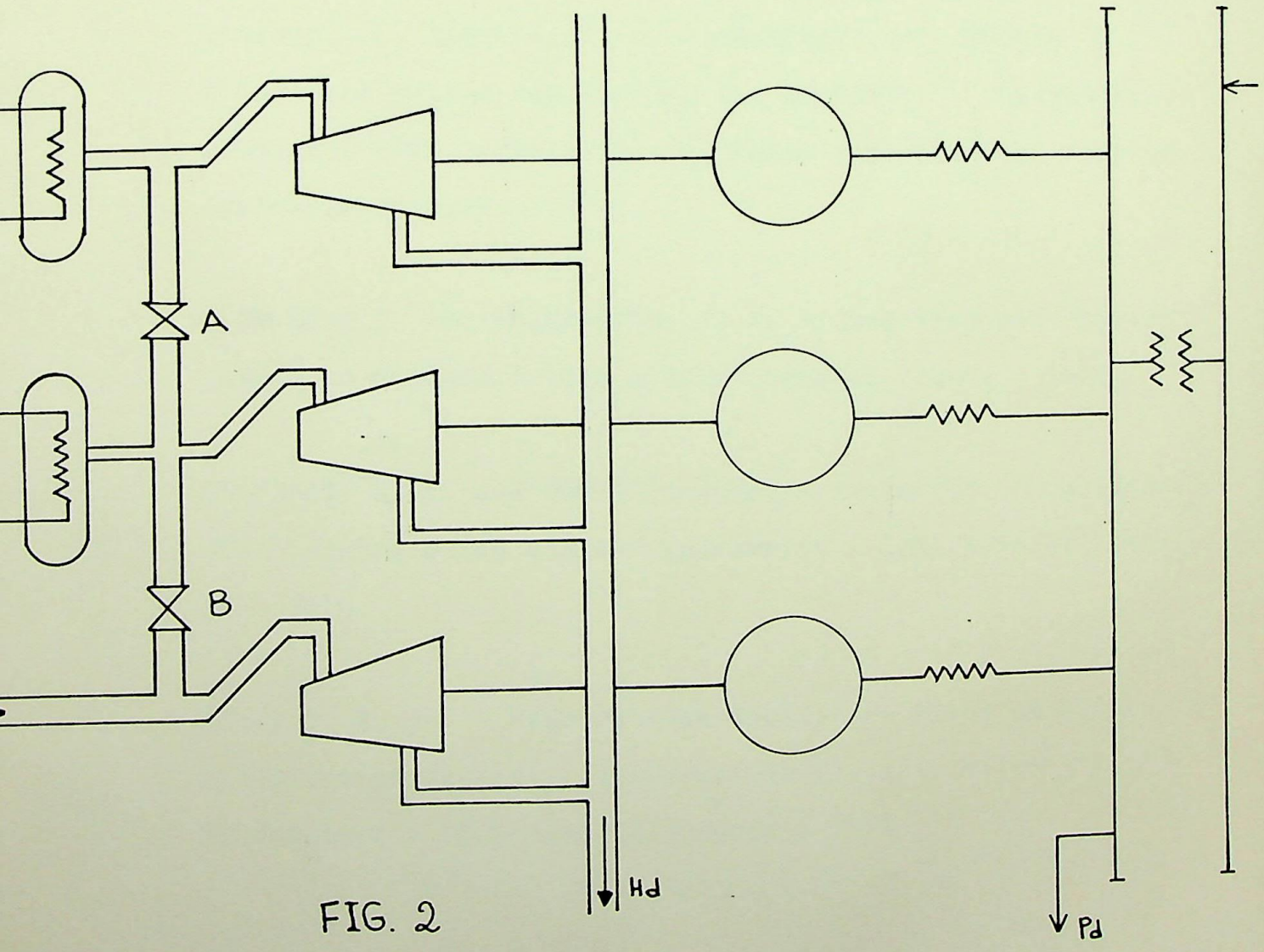


FIG. 2

Com o novo esquema da figura 2 a única alteração seria a inclusão de um gerador a mais no modelo matemático, o que se pode fazer sem nenhuma complicação.

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

1. HU, T.C. - Integer Programming and Network Flows - 1970.

2. CRAWFORD, Dale M., and HOLT, Jr., STEWART, B. - A Mathematical Optimization Technique for Locating and Sizing Distribution Substations, and Deriving Their Optimal Service Areas - IEEE Transation (1975).

3. DREYFUS, S. E. - Perspectives in Optimization:a Collection os Expository Articles - (1972).

4. MEGAHED, I., ABOU-TALEB, N., ISKANDRANI, M., MOUSSA, A. - A Modified method for solving the economic Dispatching problem - IEEE Transactions on Power Apparatus and Sistems (January/February - 1977).

5. RINGLEE R.J. and WOLLENBERG, B. F. - Over niew onf Optimization on Methods - IEEE - IEEE Tutorial Course - 1976.

6. LAUDGREN, G. L. and ANDERSON S. W. - Maximized Transmission Gird Loading Using Linear Programming - IEEE Totorial Course - 1976.

7. HOLT, S. B. Jr. - Distribution Substation Planning Usina Optimization Methods - Jacksonville Electric Authority, D. M. Crawford - IEEE Tutorial Course - 1976

8. GARVER. L. L. - Transmission Planning - An Application of Optimization Methods in Power Sistem Enginnering - General Electric Company Schenectady - IEEE Tutorial Courde - 1976.

9. HAPP, H. H. - Optimal Power Dispatch - A Comphrehensive Survey - Fellow IEEE - IEEE Transactions on Power Apparatur and Sistems - May/June 1977.

10. MEYER, W. Scott, ALBERTSON, Vernon D. - Improves Loss Formula Computation by Optimally ordered elimination Techniques - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems January/February, 1971.

11. ALVARADO, F. L. - Penalty Factory From Newton's Method - IEEE Transactions on Power Apparatus and Sistems - November/December, 1976.

12. EL HAWARY, M.E., Christensen, G. S. - Optimal Economic Operation of Eletric Power Systems.

13. POLAK, E. - Computational Methods in Optimization - Academic Press, Inc. (London) LTD, 1971.

14. NICHOLSON, T.A.J. - Optimization in Industry, Vol. I, II - T. & A. Constable LTD, Edinburgh - 1971.

15. BALAKRISHNAN, A. V., NEUSTAD, LUCIEN W. - Computing Methods in Optimization Problems - Academic Press New and London - 1964.

16. VIVIER, LUCIEN - Turbinas de Vapor y gãs - Urmo, S.A. De Ediciones, España - 1975.

17. KRIEGER, Robert E. - Aero Termo dynamics and Flow in Turbo machines Publishing Company Hutington, New York, 1974.