



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS**

UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO DE MÁQUINAS EM USINAS HIDRELÉTRICAS.

Por: Anastácio Sebastián Arce Encina.
Orientador: Prof. Dr. Secundino Soares Filho.
Co-orientador: Prof. Dr. Takahaki Ohishi.

Banca Examinadora:
Prof^a. Dra. Eliane Faria Amaral Fadigas-EDUSP.
Prof. Dr. Alcir José Monticelli-UNICAMP.
Prof. Dr. Aurélio Ribeiro Leite de Oliveira-UNICAMP(Suplente).

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Novembro 1999.

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Anastacio Sebastian Arce Encina e aprovada pela Comissão Julgada em 19 / 11 / 99

Secundino Soares F.
Orientador

CHAMADA:
TI UNICAMP
Ar 21m
Ex.
MBO BC/41122
OC. 278/00
C D
EQ. R\$ 11,00
TA 16-06-99
CPD

CM-00142329-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ar21m Arce Encina, Anastácio Sebastián
Um modelo de otimização do despacho de máquinas
em usinas hidrelétricas / Anastácio Sebastián Arce
Encina.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadores: Secundino Soares Filho, Takahaki
Ohishi.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Energia elétrica - Produção. 2. Usinas
hidrelétricas. 3. Turbinas hidráulicas. 4. Otimização
matemática. I. Soares Filho, Secundino. II. Ohishi,
Takahaki. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
IV. Título.

Resumo

O problema do despacho de máquinas numa hidrelétrica surge quando os estudos do planejamento da operação de curto prazo, a programação e mesmo a supervisão na operação em tempo real, definem a quantidade de energia que a usina deve produzir ao longo do período de planejamento. Este compromisso nasce da necessidade de manter o equilíbrio entre a carga e a geração.

O comportamento da carga normalmente varia ao longo do dia. Conforme o valor dela aumenta, o número de máquinas comprometidas no seu atendimento não será suficiente para manter o equilíbrio entre a carga e a geração, isto é, será necessário colocar mais máquinas em operação. Quando o valor da carga diminui, o número de máquinas necessário será menor. Dentro dessa variação do número de máquinas necessário para o atendimento da carga, surge a possibilidade de otimizar o critério de despacho. Na prática, muitos são os critérios possíveis de serem adotadas para definir o despacho de máquinas.

Este trabalho apresenta um modelo para definir o despacho de máquinas, minimizando perdas, partidas e paradas. Para efeito de cálculo das perdas no sistema de geração, são avaliadas a elevação do nível de canal de fuga, a variação do rendimento do conjunto turbina-gerador e o aumento do atrito do fluxo d'água nas tubulações do sistema hidráulico. São colocadas algumas considerações sobre os fatores que geram custos nas partidas e paradas.

Como a maioria das usinas hidrelétricas tem instaladas máquinas que são caracteristicamente iguais, neste trabalho é aproveitado este aspecto para formular o problema do despacho de máquinas, como um problema simples de otimização e resolvido por técnica de programação dinâmica.

A aplicação do modelo à usina de Itaipú mostram os seguintes resultados:

- As perdas associadas ao sistema de geração das usinas hidrelétricas são significativas e merecem serem consideradas no planejamento de curto prazo ou programação.
- A otimização do despacho que minimiza perdas resulta em frequentes partidas ou paradas.
- A otimização do despacho que minimiza partidas/paradas resulta em níveis de perdas significativas.
- Para determinar o despacho ótimo, do ponto de vista econômico, é fundamental determinar principalmente o quanto custa uma partida ou parada.

Os resultados apresentados apontam também à necessidade de uma boa previsão nos valores de geração programada, devido a que um desvio acompanhado pela regulação primária pode resultar na operação de um número de máquinas não indicado para minimizar as perdas.

Summary

The problem of dispatching generating units on hydroelectric plants arises when the short term operational planning and the on-line operational supervision establish the energy amount that the plant should produce during the planning period. This commitment is concerned with the necessity of keeping the equilibrium between load and generation.

The load usually varies during the day. As the load increases, the number of generating units committed to its attainment may not be enough to assure the equilibrium between load and generation and so it will be necessary to put more generating units in operation. When the load decreases, the number of generating units should be lower. Due to this variation of the number of generating units in operation during the day, the possibility of optimizing some dispatch criterion arises. In practice, many possible criterion can be adopted to define the generating units dispatch.

This work presents a model to define the dispatch of generating units that minimizes generation losses and the number of start-up/shut-down of units. In order to calculate losses in the generation system, the increase in tailrace elevation, the variation of turbine-generator efficiencies and the increase in penstock head losses are considered. The factors associated with cost of start-up and shut-down of generating units are addressed.

Since hydroelectric plants usually have generating units with equal characteristics, this aspect is exploited in this work so that the generating units dispatch can be formulated as a simple optimization problem that can be solved by dynamic programming.

The application of the model to the Itaipú hydroelectric plant shows the following results:

The generation loss in hydroelectric plants are expressive and deserve to be taken into account in the short term operation planning.

The minimization of generation losses leads to frequent start-up/shut-down of generating units.

The minimization of start-up/shut-down of generating units leads to excessive generation losses.

To obtain the optimal dispatch, from an economic point of view, it is necessary to determine how much a start-up/shut-down costs.

The results highlight the necessity of an accurate forecasting of the programmed generation because large deviations followed by the primary regulation can result in an inadequate number of generating units to minimize generation losses.

‘ Os caminhos que conduzem o
homem ao saber são tão
maravilhosos quanto o próprio
saber’.

Johanes Kepler (1571-1630).
Astrônomo Alemão

Oferecimentos

Aos meus pais, Anastácio e Juana, por tudo.

À minha querida esposa, Renata, pelo seu carinho e compreensão.

Aos meus filhos, Paulo, Guilherme e Rita pela alegria.

Aos meus irmãos, Gerardo, Carlos (in memorian), Juan, Lino, Claudio, Mario (in memorian) e Manuel, pela torcida.

Agradecimentos

Agradeço a Deus Pai Todo-Poderoso, por ter-me permitido chegar até aqui.

Agradeço ao Secundino, orientador e grande companheiro, por ter-me encorajado nesta idéia.

Agradeço ao Eng. Armindo Villasanti, que soube encontrar os meios para permitir a realização deste trabalho.

Agradeço ao Taka, pelo seu apoio e otimismo.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da OP.DT da Itaipú Binacional, que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Agradeço ao Álvaro, Joana, Marcelo, Valdelí, Cassio, Rosângela, Gerson, Makoto, Luciana, Edilson, Daniel e os integrantes da turma COSE 97, pela acolhida.

Agradeço à 'Virgencita de Ka'akupe', pela sua ajuda e proteção.

ÍNDICE

Capítulo I: O despacho de máquinas hidráulicas no planejamento da operação.

1.1 – Introdução	2
1.2 – O despacho de máquinas no planejamento da operação.....	2
1.3 - Alguns trabalhos relacionados ao despacho de máquinas	6

Capítulo II: Sistema de geração.

2.1 – Introdução	11
2.2 – Descrição dos componentes	11
2.3 – Perdas associadas ao sistema de geração	17
2.3.1 – Nível do reservatório	17
2.3.2 – Nível do canal de fuga	19
2.3.3 – Perda hidráulica	23
2.3.4 – Perda pela variação do rendimento da turbina	24
2.3.5 – Perda total no sistema de geração	26

Capítulo III: O despacho de máquinas.

3.1 – Introdução	40
3.2 – Descrição do problema	40
3.3 – Algoritmo para calcular o número mínimo e máximo de máquinas	42
3.4 – Um exemplo ilustrativo	43
3.5 – Formulação do problema	47
3.6 – A programação dinâmica	49
3.7 – Técnica de solução para o problema do despacho	53

Capítulo IV: Resultados obtidos.

4.1– Introdução	57
4.2 – Teste do programa otimizador do despacho	57
4.3 – Avaliação do efeito do nível de canal de fuga no despacho de máquinas	60
4.4 – Avaliação da influência do valor do custo das partidas/paradas e do reço da energia perdida sobre o despacho	64
4.5 – Um caso de aplicação verificado na usina de Itaipú	69

Capítulo V: Conclusões.

5.1 – Introdução	73
5.2 – Conclusões	73
5.3 – Possíveis evoluções	75

Referências bibliográficas.....	76
--	-----------

Capítulo I

O despacho de máquinas hidráulicas no planejamento da operação.

1.1 – Introdução

Neste capítulo será apresentado o problema do despacho de máquinas hidráulicas no contexto da cadeia do planejamento da operação. Serão descritos brevemente, os objetivos das diferentes etapas do planejamento da operação até se chegar à programação e operação em tempo real, onde o despacho de máquinas ganha importância devido à possibilidade de serem representadas todas as variáveis envolvidas na geração hidráulica.

Serão mencionados alguns trabalhos anteriores, que no seu conteúdo tiveram a preocupação de fazer a representação detalhada da geração hidráulica.

1.2 – O despacho de máquinas no planejamento da operação.

O objetivo do planejamento da operação de um sistema hidrotérmico de energia elétrica é atender os requisitos do mercado com confiabilidade e com um custo mínimo por consumo de combustível nas usinas termoeletricas.

O uso correto da energia hidrelétrica, disponível em quantidades limitadas na forma de água armazenada nos reservatórios, torna a operação de um sistema hidrotérmico complexa, pois estabelece um compromisso entre a decisão de operação imediata e as consequências futuras desta decisão.

A dificuldade do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos começa portanto com a necessidade de analisar a operação ao longo do horizonte do planejamento, permitindo que sejam avaliadas as consequências futuras das decisões operativas hoje adotadas.

O horizonte do planejamento da operação depende fundamentalmente das características hidrológicas do sistema e da capacidade de regulação dos reservatórios. De modo geral, o horizonte deve ser pelo menos um ano, que é o período natural do ciclo hidrológico. No sistema brasileiro, onde existem reservatórios de capacidade de regulação plurianual, o planejamento da operação tem sido feito para horizonte de alguns anos.

Outro aspecto que contribui na complexidade do planejamento hidrotérmico é o acoplamento hidráulico entre as usinas hidrelétricas situadas num mesmo rio. Este acoplamento torna as condições de operação de cada usina dependente das demais, de modo que suas operações devem ser coordenadas.

Devido à impossibilidade de considerar todos os aspectos do problema simultaneamente através de um único modelo, torna-se necessária uma decomposição em etapas: longo, médio e curto prazos.

No planejamento de longo prazo pretende-se estabelecer uma estratégia de operação que determine, a cada estágio e em condições incertas de afluências, os totais de energia hidráulica e térmica a serem gerados, de modo a minimizar o valor do custo da operação.

No planejamento da operação de médio prazo determina-se a política de operação de cada usina, de forma que o custo operacional do sistema ao longo do horizonte seja minimizado e ao mesmo tempo sejam atendidos os requisitos de demanda, as restrições operativas do sistema e as metas especificadas pelo planejamento de longo prazo. O planejamento da operação de médio prazo determina as metas semanais de operação de cada usina.

O objetivo principal do planejamento da operação de curto prazo é procurar compatibilizar a operação do sistema hidráulico e elétrico ao longo da semana com as metas energéticas estabelecidas pelo planejamento de médio prazo. Devido à sua proximidade da operação

em tempo real , o planejamento da operação de curto prazo requer uma representação matemática mais detalhada do sistema como por exemplo a representação da rede elétrica, suas limitações operativas bem como uma representação mais detalhada do sistema hidráulico, incluindo tempo de atraso no transporte d'água entre os reservatórios, limitações de tomada de carga, etc. Também, devido ao curto horizonte do planejamento, supõe-se disponível uma boa previsão de afluência e de demanda de carga, podendo então este problema ser considerado totalmente determinístico[1].

A programação diária de operação define as formas finais de uso das fontes geradoras, assegurando o atendimento às diretrizes do planejamento da operação de curto prazo e os ajustes às condições atuais do sistema. Nesta fase do planejamento da operação, são atribuídos os valores de energias que cada usina térmica ou hidrelétrica deverá produzir e a *reserva de potência operativa*¹ que deverá manter nas próximas 24 horas.

A supervisão acompanha o atendimento à carga do sistema, a capacidade de produção das unidades geradoras, capacidade do sistema de transmissão e outras magnitudes elétricas como tensão, frequência, etc. que variam a cada instante. Em ocasiões de perturbações no sistema elétrico de potência, ocasionadas pelo desligamento de equipamentos como geradores, linhas de transmissão, etc., coordena a sua recomposição. Em ocasiões de desvios nas previsões da carga ou da disponibilidade do recurso hídrico, adota os ajustes necessários para retornar o sistema às condições normais de operação. Deste modo, a supervisão assegura a qualidade e continuidade do suprimento aos consumidores.

A estatística e análise pós-operativa completam o processo de gestão, iniciado com os estudos de planejamento de geração com horizonte de vários anos. Dentre essas atividades destacam-se o levantamento de parâmetros estatísticos de equipamentos como, taxas de falhas de geradores, carregamento máximo de linhas de transmissão, os relatórios de análise

¹ Folga de geração (reserva) mínima das unidades geradoras em operação, à disposição do sistema, visando o atendimento à regulação carga-frequência, saídas forçadas de unidades geradoras, erros de previsão e variação instantânea de carga.

de perturbações ocorridas no sistema, a retroalimentação das atividades de planejamento, programação e supervisão no sentido de verificar os desvios entre os valores previstos e verificados das diversas variáveis que participam na operação, etc[2].

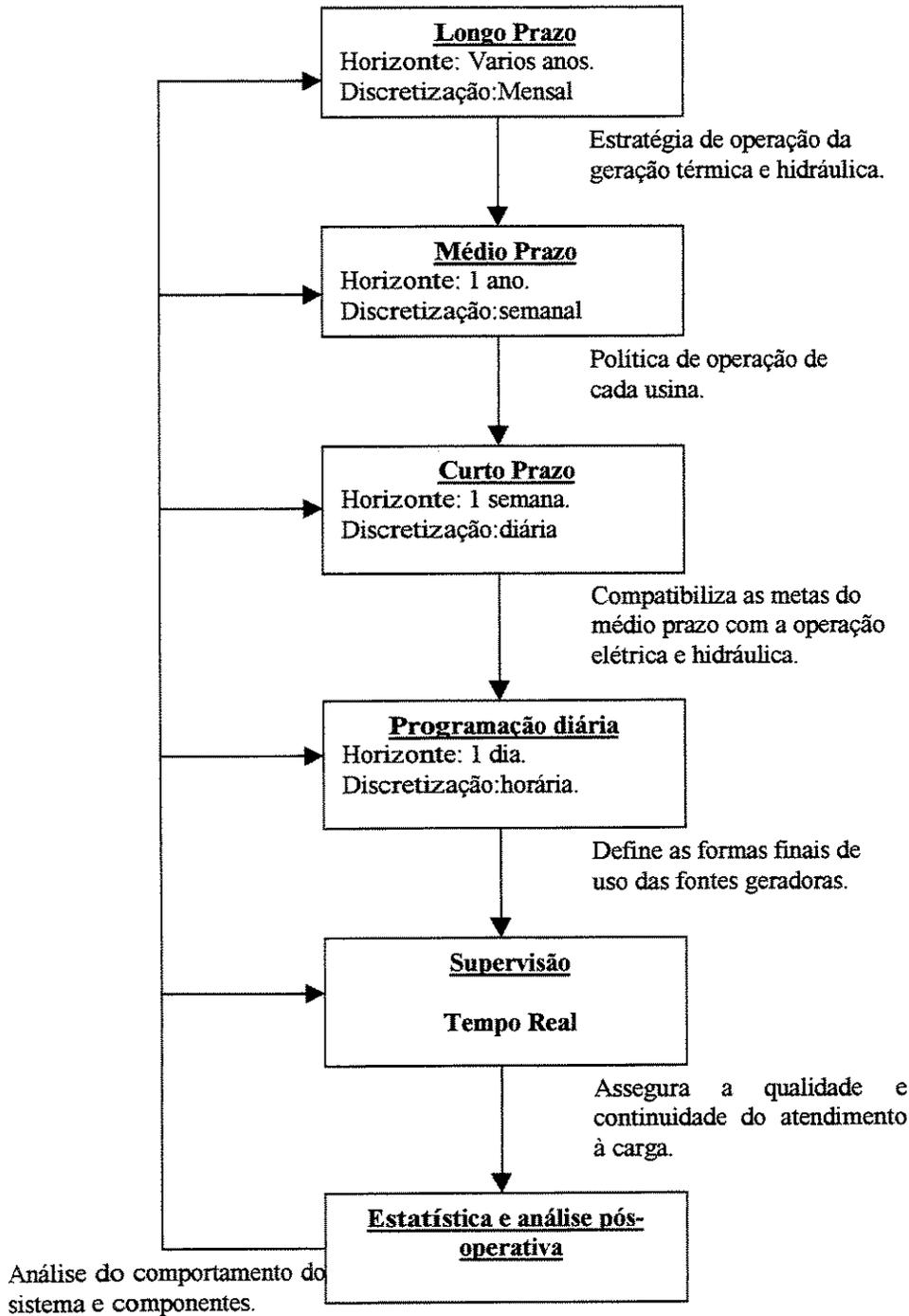


Figura 1.2 – Diagrama de blocos do planejamento da operação.

Dentro desta divisão funcional do problema do planejamento da operação de um sistema hidrotérmico de geração numa cadeia sequencial de atividades, cabe à programação e à supervisão da geração, o detalhamento e implementação das metas definidas nos estudos de planejamento de curto prazo.

Se a programação define o montante de geração que cada usina deve produzir para atender a carga prevista para cada hora, cabe a cada uma delas, conforme aos recursos que elas dispõe em termos de unidades geradoras e recurso hídrico, definir a forma do atendimento do compromisso assumido na programação e efetuar os ajustes através da supervisão, conforme às mudanças das condições operativas. Na **Figura 1.2** está representada a cadeia do planejamento da operação.

1.3 – Alguns trabalhos relacionados ao despacho de máquinas.

A modelagem da geração hidráulica em todos os seus aspectos e principalmente no que diz respeito às máquinas, para inseri-la no planejamento da operação de curto prazo ou no programa de pré-despacho ou na operação em tempo real, para definir a forma do despacho de máquinas, é relativamente recente.

Assim, podemos citar L.M.Rux [3] em 1992, que publicou um artigo referente à otimização da operação em tempo real das usinas da bacia do Colorado River. As unidades hidráulicas foram representadas através de uma função que representa a variação do *engolimento*² em função da potência gerada e atualizadas através do produto pela altura de queda de cada usina. Devido ao comportamento não convexo da função do ‘engolimento marginal’ das máquinas da bacia do Colorado River, a modelagem foi simplificada através do cálculo do valor médio da função do engolimento marginal superior e inferior a cada ponto de

² Vazão que passa pela turbina.

operação, para poder representar a tendência da variação desta função e facilitar o processo iterativo de equalização do engolimento marginal, que foi adotado como critério de otimização.

O. Nilsson e D. Sjelvgren [4], em 1995 publicaram um trabalho, no qual buscam quantificar o custo associado às partidas das unidades hidráulicas, por considerar as partidas como um aspecto da operação que envolve custo, e que portanto deve ser minimizado. Para isto, através de entrevistas aos maiores produtores de energia elétrica da Suécia, buscaram estimar os fatores que ocasionam custos nas partidas de máquinas, qual o valor destes custos e como eles afetam a programação de curto prazo. As entrevistas apontaram os seguintes aspectos causadores de custos nas partidas e paradas:

- Degradação do isolamento dos enrolamentos do gerador devido às mudanças de temperatura, verificadas durante as partidas e paradas.
- Desgastes dos equipamentos mecânicos, ocasionando aumento dos serviços de manutenção dos mesmos.
- Falha nos equipamentos de controle durante as partidas e paradas, que ocasiona custos associados ao concerto da falha e a energia que deixa de ser gerada durante a indisponibilidade da máquina.

Foram apontados também outros fatores de menor relevância como a perda de água durante a manutenção e perda de água durante as partidas e paradas. De modo geral, as entrevistas apontaram para um valor aproximado de 3 US\$ por partida e por MW de capacidade nominal da máquina.

Em 1995, T. P. Hara e outros [5], publicaram um trabalho no qual, após apresentar os principais fatores que contribuem para a degradação do isolamento dos geradores e a diminuição da sua vida útil, avaliam os custos relacionados ao regime de operação das

máquinas da usina hidrelétrica de G. B. Munhoz, da COPEL³. Esta avaliação foi realizada através da simulação de operação das máquinas em condições de alta e baixa hidraulicidade, operando como compensadores síncronos com os custos devidos ao consumo de potência ativa e operando com um limitado número de partidas e paradas no dia. Os custos associados às partidas e paradas foram obtidos através de equações que medem a degradação da vida útil do isolamento do gerador, para diferentes níveis de tensão residual e número de partidas e paradas. Segundo esse método de avaliação, a operação de 37 anos com uma partida/parada por dia resulta no envelhecimento de 10 anos na vida útil da máquina.

Novamente, O. Nilsson e D. Sjelvgren [6], em julho de 1996 apresentam um modelo para otimização do programa de geração de um sistema caracterizado por ser eminentemente hidráulico e com possibilidades de comprar e vender energia de/para um sistema vizinho. Para a solução foi adotada técnica de decomposição transformando o problema em sub-problemas para cada usina hidráulica, através da relaxação de algumas restrições. Essa abordagem permite utilizar técnica de programação dinâmica para a solução do despacho de máquinas em cada usina, para o qual foram considerados o custo de partida e o engolimento marginal das máquinas. O custo adotado para cada partida foi o mesmo valor obtido no estudo anterior, equivalente a 3 \$/MW vezes a potência nominal de cada máquina. A modelagem da função de engolimento marginal, entre o ponto de eficiência máxima e de engolimento máximo, foi aproximada por uma reta.

Chao-an Li, Eric Hsu e outros [7], publicaram um modelo de despacho econômico de um parque hidrotérmico. Para a solução foram utilizadas técnicas de decomposição, dividindo o problema em sub-problemas térmico e hidráulico. O sistema hidráulico foi dividido em bacias e otimizado por técnicas de Programação Não-Linear de Fluxo em Redes, onde as usinas hidrelétricas são consideradas através da agregação das curvas de engolimento

³ Companhia Paranaense de Energia, concessionária responsável pelo atendimento da maior parte dos consumidores de energia elétrica do estado do Paraná.

marginal das unidades disponíveis para a operação. Para definir o despacho de máquinas em cada usina foi utilizada técnica de Programação Dinâmica, observando o custo de partida e restrições referente ao tempo mínimo de operação e de parada. Para diminuir a dimensão do espaço de estados, definido pelo número de combinações possíveis de máquinas a serem despachadas, foi definida uma lista prioritária de combinações de despacho de máquinas, sendo excluídas aquelas combinações que não satisfazem restrições referentes ao tempo mínimo de operação e de parada.

No mesmo ano, S. Soares e C. T. Salmazo [8], publicam um modelo de pré-despacho que minimiza as perdas no sistema hidráulico de geração e de transmissão elétrica. Utilizaram método heurístico para definir o despacho de máquinas e técnica de decomposição para a solução do problema de pré-despacho resultante. Deram atenção especial na representação da geração hidráulica, considerando as perdas ocasionadas pela elevação do nível de canal de fuga, perdas no sistema de adução e aquelas associadas à diminuição do rendimento do conjunto turbina-gerador.

Este trabalho, que trata de um modelo de Despacho de Máquinas em Usinas Hidrelétricas, pode ser utilizado no contexto da programação bem como na supervisão da geração.

O trabalho é organizado conforme a seguinte sequência: o capítulo 2 apresenta a modelagem do sistema de geração descrevendo a metodologia adotada para avaliar as perdas. O capítulo 3 apresenta o problema do Despacho de Máquinas numa hidrelétrica, a formulação matemática e a técnica adotada para a solução. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos para o caso da usina hidrelétrica de Itaipu e finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações de futuros trabalhos nesta área.

Capítulo II

Sistema de geração

2.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as variáveis que compõe o sistema de geração numa usina hidrelétrica. Será apresentada uma metodologia para avaliar as perdas associadas a cada uma das variáveis do sistema de geração e finalmente, será aplicada esta metodologia para avaliar as perdas no sistema de geração da usina de Itaipu [11], cujas características estão resumidas na **Tabela 2.1**.

2.2 - Descrição dos componentes

Uma usina hidrelétrica é composta basicamente por uma barragem, responsável pela formação de um reservatório de água, tomadas d'água e condutos forçados que levam a água desde o reservatório até a casa de força, situada num nível mais baixo à jusante da barragem, a casa de força que aloja os grupos de turbina-gerador e equipamentos auxiliares,

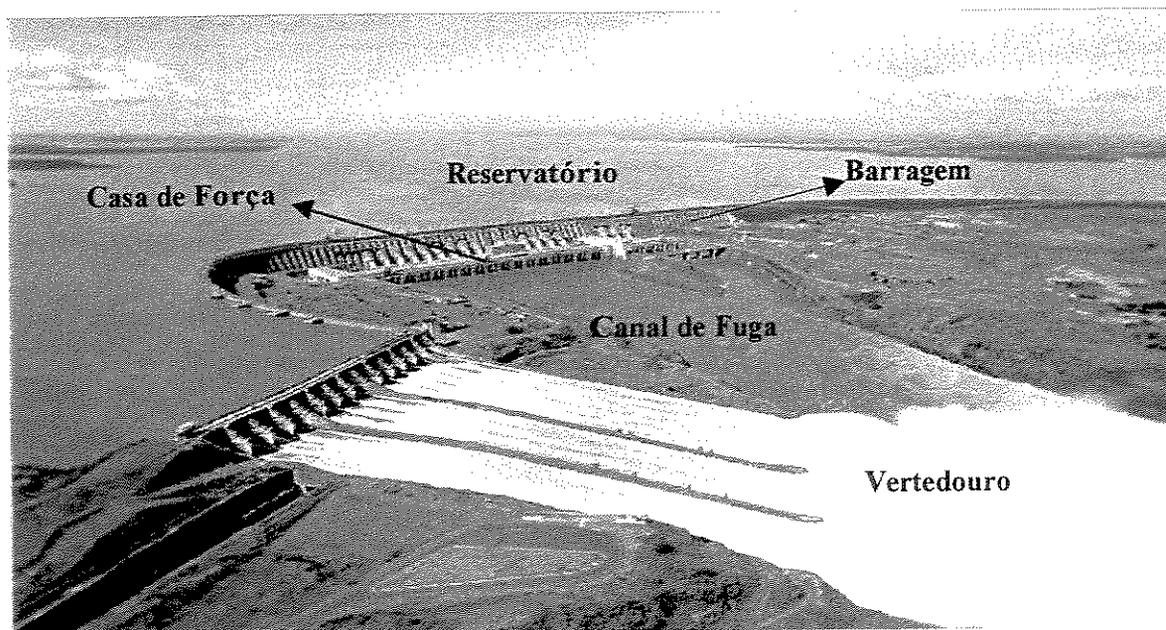


Figura 2.1 – Principais componentes de uma hidrelétrica.

o canal de fuga por onde a água é novamente reconduzida ao rio. Outro componente muito importante numa hidrelétrica é o vertedouro, por onde o volume de água que excede à capacidade do reservatório é descarregado. A **Figura 2.1** mostra as partes principais de uma hidrelétrica.

A produção da energia elétrica é o resultado de um processo de transformação. A energia potencial da água armazenada no reservatório, é transformada pela turbina em energia mecânica que através de um eixo é transmitida ao gerador. No gerador, a energia mecânica é transformada em energia elétrica, que após passar por uma subestação elevadora de tensão é injetada no sistema de transmissão para a sua entrega aos centros de consumo.

Partindo da definição de potência como sendo a energia produzida por unidade de tempo, pode-se expressar a potência produzida numa máquina hidrelétrica através da seguinte relação matemática:

$$p = g \times \rho \times 10^{-6} \times \eta_{tur} \times \eta_{ger} \times h_l \times q \quad (2.1)$$

onde:

p - potência gerada na máquina em (MW);

g - aceleração da gravidade em (m/s^2);

ρ - peso específico da água em (kg/m^3);

η_{tur} - rendimento da turbina em (%);

η_{ger} - rendimento do gerador em (%);

h_l - altura de queda líquida em (m);

q - volume d'água turbinada por unidade de tempo em (m^3/s).

A diferença entre a cota do nível do reservatório e a cota do nível do canal de fuga fornece a altura de queda bruta.

A altura de queda líquida é a diferença entre a cota do nível do reservatório e a cota do nível do canal de fuga, descontadas as perdas hidráulicas e é representada pela seguinte expressão:

$$h_l = h_r - h_{cf} - h_p \quad (\text{m}). \quad (2.2)$$

onde:

h_r , é a cota do nível do reservatório, em (m).

h_{cf} , é a cota do nível do canal de fuga, em (m).

h_p , é a perda em altura ocasionado pelo atrito d'água nas tubulações, em (m).

O nível do reservatório é uma função não linear do volume de água armazenado $h_r(V)$. As unidades normalmente adotadas são o metro (m) e o hectômetro cúbico (hm^3) para o nível do reservatório e volume, respectivamente.

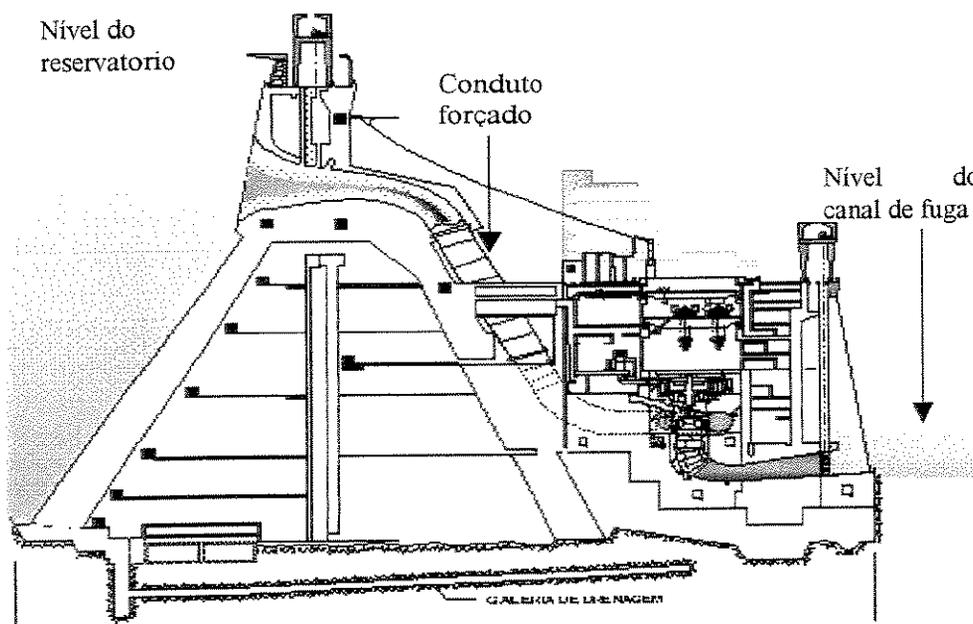


Figura 2.2 – Corte transversal de uma usina hidrelétrica.

O nível do canal de fuga é uma função não linear da vazão defluente, $h_{cf}(d)$. A defluência é composta pelo volume de água que passa através das turbinas (q) mais o volume sendo descarregado pelo vertedouro (v), num dado instante, e expresso em m^3/s . Essa relação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$d = q + v \quad (m^3/s) \quad (2.3)$$

A influência da vazão vertida no nível de canal de fuga depende das características de projeto da usina, no que diz respeito à localização do vertedouro, pois quando o vertimento se dá em um ponto distante das descargas das máquinas a influência pode ser mínima.

A perda hidráulica refere-se à redução da energia potencial pelo atrito da água ao escoar no interior do conduto forçado. Esta perda é calculada levando-se em conta dados referentes ao comprimento, diâmetro, curvas, a rugosidade das paredes internas, etc. do conduto forçado. Normalmente é representado como uma função quadrática do tipo:

$$h_p = k \times q^2 \quad (m) \quad (2.4)$$

onde:

k – constante característica do conduto forçado em (s^2/m^5) ;

q – vazão turbinada em (m^3/s) .

O rendimento da turbina hidráulica é uma função não linear dependente da vazão turbinada e da altura de queda líquida. Na **Figura 2.3** podemos ver o rendimento de uma turbina hidráulica, que pela sua forma é conhecida como Curva Colina.

Pode-se constatar na figura que, para uma dada altura de queda constante e variando a

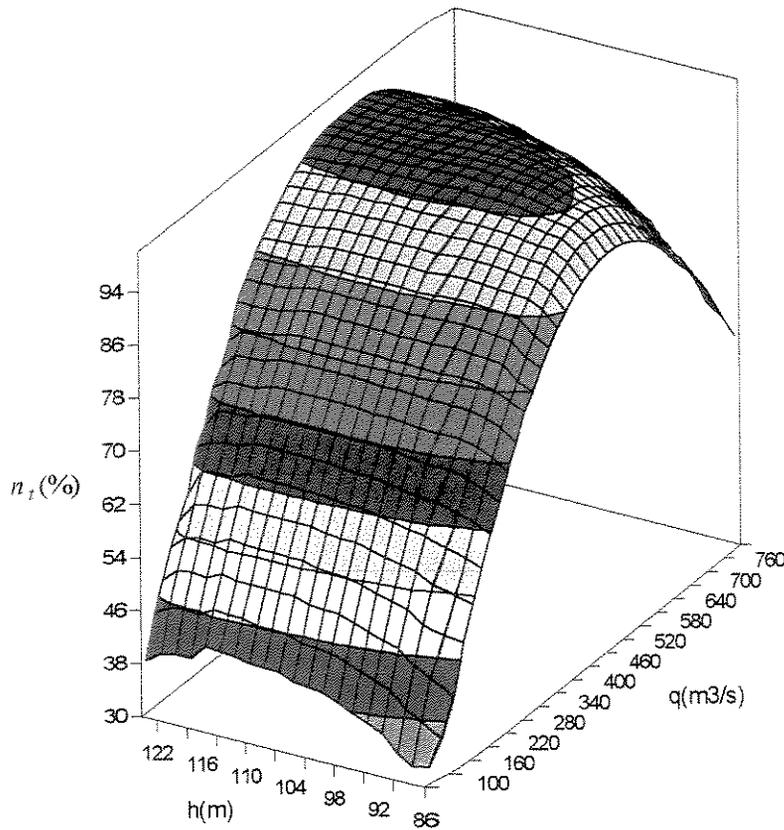


Figura 2.3 – Curva Colina de uma turbina hidráulica.

vazão turbinada do seu valor mínimo até seu valor máximo, o rendimento varia do seu valor mínimo, passa por um máximo, chegando a um valor intermediário entre o mínimo e máximo, quando a vazão turbinada atinge o seu valor máximo.

O rendimento em qualquer dispositivo de transmissão de potência pode ser representada pela seguinte expressão:

$$\text{rendimento}(\%) = \frac{p_s}{p_e} = \frac{p_e - \text{perdas}}{p_e}$$

onde:

p_s – potência de saída;

p_e – potência de entrada;

O rendimento da turbina representa as perdas verificadas nela, considerando que uma parte da potência disponível nos eixos da turbina é dissipada em perdas internas e externas na própria turbina. Valores característicos do rendimento máximo para grandes turbinas estão na faixa de $0.88 \leq \eta_t \leq 0.96$.

A transformação da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador não se verifica de maneira direta, devido a que nessa transformação também há perdas nos enrolamentos, perdas mecânicas provocadas pelo atrito nas escovas do sistema de excitação, perdas nos mancais e sistema de ventilação. Verifica-se também perdas provocadas pela histerese e correntes de Foucault, originadas pela variação da densidade de fluxo magnético no ferro do gerador. Os geradores modernos apresentam rendimentos da ordem $0.90 \leq \eta_g \leq 0.97$ [9].

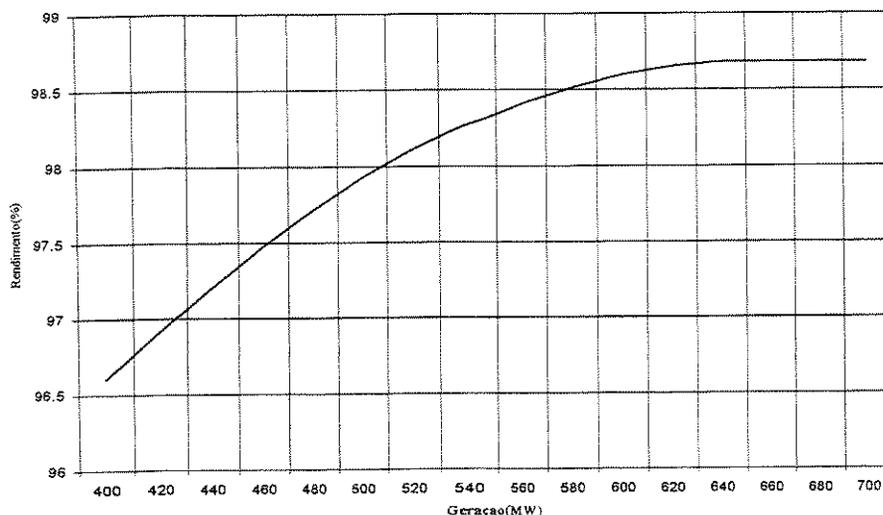


Figura 2.4 – Rendimento do gerador de Itaipú.

Na **Figura 2.4** está representado o rendimento aproximado dos geradores da usina de Itaipú.

É frequente o uso do rendimento do conjunto turbina-gerador (η_{tg}), que define-se como o produto do rendimento da turbina pelo rendimento do gerador:

$$\eta_{tg} = \eta_t \times \eta_g \quad (2.5)$$

2.3 – Perdas associadas ao sistema de geração

No item anterior pôde-se ver as principais variáveis da função que descreve o comportamento do sistema de geração. Foi possível verificar que ela é não-linear, influenciada pelo comportamento de cada uma delas. Para avaliar o efeito de cada uma das variáveis, a seguir será feita uma análise direcionada ao caso particular da usina hidrelétrica de Itaipu, cujas principais características estão resumidas na **Tabela 2.1**.

2.3.1 – Nível do reservatório

A altura de queda líquida (eq. 2.2), que integra a função de produção de uma hidrelétrica (eq. 2.1) é definida em função da cota do nível do reservatório, da cota do nível do canal de fuga e das perdas hidráulicas.

O comportamento do reservatório normalmente é representado por uma função exponencial ou polinomial do tipo:

$$h_r(V) = a_0 + a_1 \times V + a_2 \times V^2 + a_3 \times V^3 + a_4 \times V^4$$

onde

Capítulo II – Sistema de geração.

a_i – são os coeficientes do polinômio;

V – volume de água acumulado no reservatório, expresso normalmente em hm^3 ;

h_r – cota do nível do reservatório em metros.

CARACTERÍSTICAS GERAIS	
Bacia hidrográfica	
Area de drenagem da bacia (km^2)	820.000
Reservatório	
Area do reservatório (km^2)	1.350
Extensão (km)	170
Cota máxima (m)	220
Cota máxima excepcional (m)	223
Cota mínima excepcional (m)	197
Volume (hm^3)	29×10^3
Volume útil (hm^3)	19×10^3
Cota de jusante (m)	100
Cota máxima de jusante (m)	138
Vertedouro	
Número de comportas	14
Capacidade máxima de descarga (m^3/s)	62.200
Turbinas	
Tipo	Francis
Potência nominal (MW)	715
Altura de queda nominal (m)	118.4
Descarga nominal (m^3/s)	645
Velocidade (50/60 Hz)	90,9/92,3 rpm
Geradores	
Potência das unidades de 50 Hz (MVA)	823,6
Potência das unidades de 60 Hz (MVA)	737,0

Tabela 2.1 – Características principais da usina hidrelétrica de Itaipú.

As usinas com grandes reservatórios, isto é, aquela com grande capacidade de regularização caracterizada pela elevada relação entre o seu volume útil e a vazão média afluyente, são as responsáveis pela transferência de grandes blocos de água do período úmido para o período seco, através do armazenamento nos períodos úmidos e deplecionamento nos períodos secos. O comportamento destas usinas, em termos do seu volume armazenado ao longo do horizonte do estudo, é definido pelo planejamento energético. Nos estudos do planejamento da operação de curto prazo, os níveis dos grandes reservatórios podem ser considerados constante.

Existem usinas com reservatório de pouca capacidade de regularização. Estas normalmente fazem a regularização a nível semanal, acumulando água no seu reservatório nos finais de semana e feriados para utilizá-lo nos dias úteis, ou regulação diária, acumulando água nos períodos de baixa carga para utilizá-la nos períodos de ponta da carga.

As usinas que operam com a cota do nível do seu reservatório constante, seja ela pela ausência de uma mínima capacidade de regularização ou pela diminuição significativa na sua *produtividade*¹, que poderia ser ocasionada pelo deplecionamento do seu reservatório, são denominadas usinas a fio d'água.

A usina hidrelétrica de Itaipú, apesar do grande volume do seu reservatório, é considerada fio d'água devido ao grande volume da vazão afluyente ao seu reservatório, além disso, uma diminuição na sua produtividade, ocasionada pela redução na sua altura de queda pode significar perdas significativas devido à sua enorme capacidade instalada.

2.3.2 – Nível do canal de fuga

As turbinas de ação, como são as do tipo Pelton, possuem um ou mais injetores de água, que na forma de jato d'água transmitem energia cinética às conchas, que por sua vez

¹ Relação que mede a potência produzida por unidade de vazão d'água (MW/m³/s).

transforma esta energia em trabalho mecânico. O rotor gira no ar sob condições de pressão atmosféricas. Devido às condições operacionais, as usinas equipadas com este tipo de turbinas, não sofrem a influência da elevação do nível de canal de fuga.

As usinas equipadas com turbinas de reação, como são as do tipo Francis e Kaplan, ao contrário das turbinas tipo Pelton, possuem o rotor que gira dentro da corrente d'água contínua, portanto sofrem a influência da elevação do nível de canal de fuga [10].

O comportamento do nível do canal de fuga varia conforme cada aproveitamento. Assim, para as usinas localizadas à montante de outro aproveitamento, o nível do seu canal de fuga varia em função à sua descarga (eq. 2.3) e do nível do reservatório da usina à jusante pelo efeito do *remanso*². O efeito do remanso é mais significativo conforme os aproveitamentos estão próximos uns dos outros e à declividade do trecho entre eles.

Neste caso a representação do comportamento do nível de canal de fuga é feita através de família de curvas, uma para cada nível do reservatório de jusante.

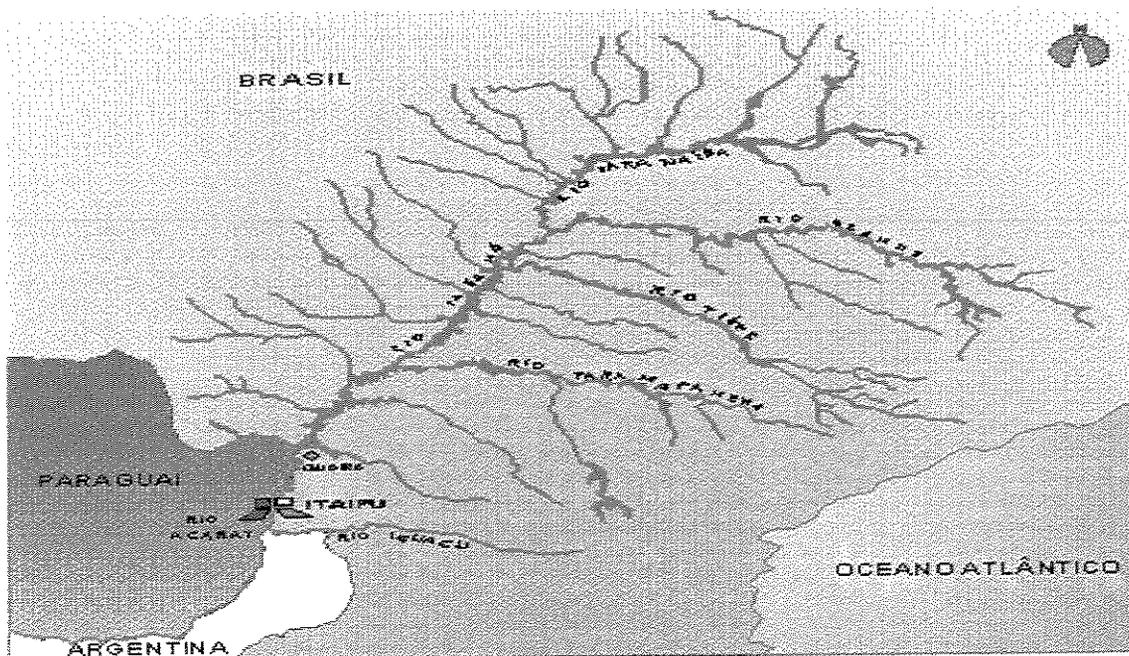


Figura 2.4 – Influência do Rio Iguaçu no canal de fuga de Itaipu

² Elevação do nível do canal de fuga devido ao retardo do escoamento d'água.

O Rio Iguaçu, que desemboca no Rio Paraná à jusante da usina de Itaipu, conforme podemos ver na **Figura 2.4**, tem influência sobre o comportamento do canal de fuga desta usina. A influência é similar ao de um reservatório, de modo que quanto maior for a vazão pelo Rio Iguaçu maior será a diminuição da velocidade do escoamento da descarga de Itaipu pelo Rio Paraná, no trecho entre o seu canal de fuga e a desembocadura do Rio Iguaçu. Este fenômeno ocasiona uma elevação do nível do canal de fuga de Itaipu, conforme podemos ver na **Figura 2.5**.

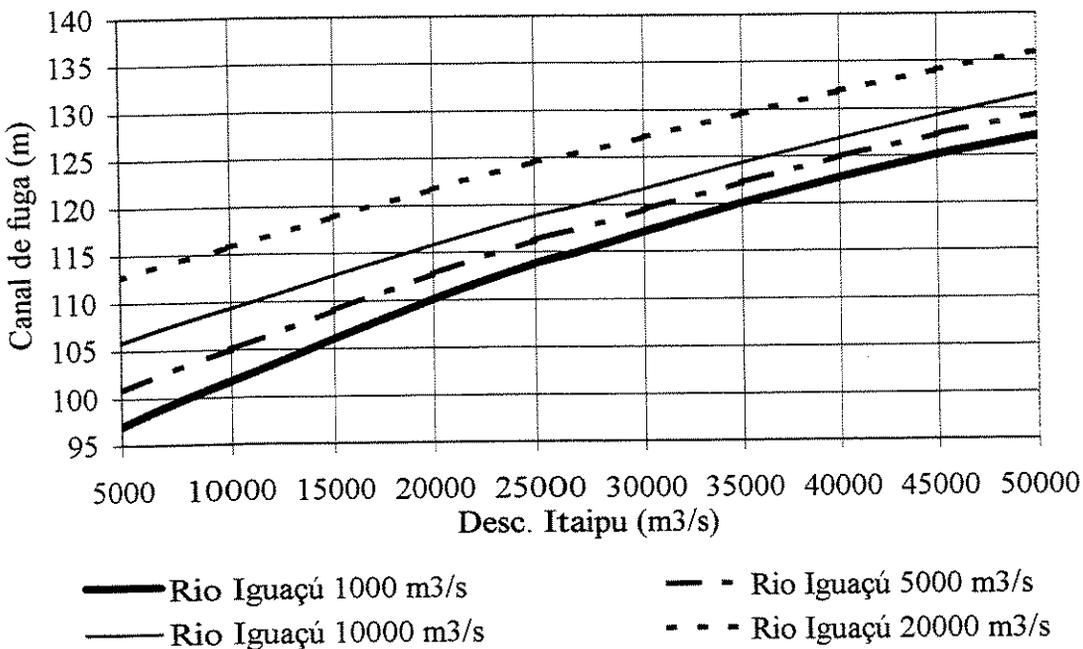


Figura 2.5 – Canal de fuga de *Itaipu*³.

As funções que descrevem as curvas da figura acima são:

$$h_{cf} = 91,95 + 1,04 \times 10^{-3} x q - 6,76 \times 10^{-9} x q^2 ;$$

para o Rio Iguaçu = 1000 m³/s e turbinada de Itaipu ≤ 12600 m³/s.

³ Valores de descarga de Itaipu acima de 12600 m³/s, inclui o volume d'água descarregado pelo vertedouro.

$$h_{cf}=96,17+9,33 \times 10^{-4} \times q - 5,49 \times 10^{-9} \times q^2 ;$$

para o Rio Iguaçu=5000 m³/s e turbinada de Itaipu ≤ 12600 m³/s.

$$h_{cf}=102,22+7,4 \times 10^{-4} \times q - 3,10 \times 10^{-9} \times q^2 ;$$

para o Rio Iguaçu=10000 m³/s e turbinada de Itaipu ≤ 12600 m³/s.

$$h_{cf}=109,25+6,8 \times 10^{-4} \times q - 2,91 \times 10^{-9} \times q^2 ;$$

para o Rio Iguaçu=20000 m³/s e turbinada de Itaipu ≤ 12600 m³/s.

Para valores intermediários das vazões do Rio Iguaçu, o canal de fuga de Itaipu é obtido por interpolação linear.

A avaliação da redução da potência gerada, decorrente da elevação do nível de canal de fuga pode ser representada através da seguinte expressão [12]:

$$P_{cfn} = (h_{cf}(q_n) - h_{cf}(q_{min})) \times g \times \rho \times \eta_{tg} \times q_n \times 10^{-6} \quad (2.6)$$

onde:

P_{cfn} – perda em MW, decorrente da elevação do nível do canal de fuga com “n” máquinas em operação.

q_{min} – vazão turbinada mínima com “n” máquinas.

A escolha de $h_{cf}(q_{min})$ como referência, poderia parecer uma referência arbitrária que resultará numa super-estimação das perdas, principalmente quando q_{min} é muito menor dos valores de vazões turbinadas mais frequentes. Neste sentido, seria mais razoável adotar como referência $h_{cf}(q_{med})$, embora este valor continuar sendo uma referência arbitrária.

Porém, através de q_{min} define-se o limite inferior de potência que um número de máquinas pode produzir, conforme será visto na seção 2.3.5.

O limite inferior de potência obtido através de q_{min} , será utilizado para definir o número máximo de máquinas, pelo que uma demanda pode ser atendida. O número mínimo e máximo de máquinas, é muito importante pois eles definem as diferentes configurações de máquinas que podem ser adotadas pela otimização, podendo chegar a uma configuração de máquinas que utilize como vazão turbinada o q_{min} , conforme será visto no capítulo 3. Essa possibilidade torna o $h_{cf}(q_{min})$ uma referência válida. As mesmas considerações são válidas para o cálculo das perdas hidráulicas, que será vista na seguinte seção.

2.3.3 – Perda hidráulica

Se a perda hidráulica ocasiona uma redução na altura de queda (eq. 2.4), ocasiona também uma redução na potência gerada, que pode ser quantificada através da seguinte expressão [12]:

$$P_{hn} = (k \times q_n^2) \times g \times \eta_{ig} \times \rho \times q_n \times 10^{-6} \quad (2.7)$$

onde:

P_{hn} – é a perda hidráulica em MW, ocasionada pela operação de “n” máquinas.

k – é a constante que exprime as características do conduto forçado. Essa constante para o sistema de geração de Itaipú é igual a 2×10^{-6} (s^2/m^5).

2.3.4 – Perda pela variação do rendimento da turbina

As perdas verificadas no gerador são transformadas em calor e dissipadas por sistemas de ventilação e/ou circuitos hidráulicos de refrigeração.

No item 2.1 foi visto que o rendimento de grandes geradores varia entre:

$$0.90 \leq \eta_G \leq 0.97.$$

As características de rendimento da turbina tipo Francis da usina de Itaipu esta representada na **Figura 2.3**, onde se pode ver que o rendimento, em %, é definido pela altura de queda líquida, dada em metros, e a vazão turbinada, em m³/s.

Na **Figura 2.6**, pode ser constatada que, para uma dada cota do reservatório se variar a vazão turbinada a partir de um valor mínimo, ponto **A**, até seu valor máximo, ponto **C**, o rendimento terá um comportamento de crescimento até um valor máximo de rendimento, ponto **B**, e partir deste ponto terá um comportamento de diminuição até o ponto **C**.

A curvatura apresentada na trajetória entre os pontos **A** e **C** é devida a interdependência da altura de queda líquida com a vazão turbinada. O aumento da vazão turbinada para aumentar a geração, ocasiona uma redução na altura de queda líquida motivada pela elevação do nível de canal de fuga e da perda hidráulica.

Evidentemente, operar no ponto **B** é o ideal, dado que neste ponto por cada unidade de vazão turbinada será produzida maior unidade de potência, que em qualquer ponto da trajetória desde o ponto **A** até o ponto **C**.

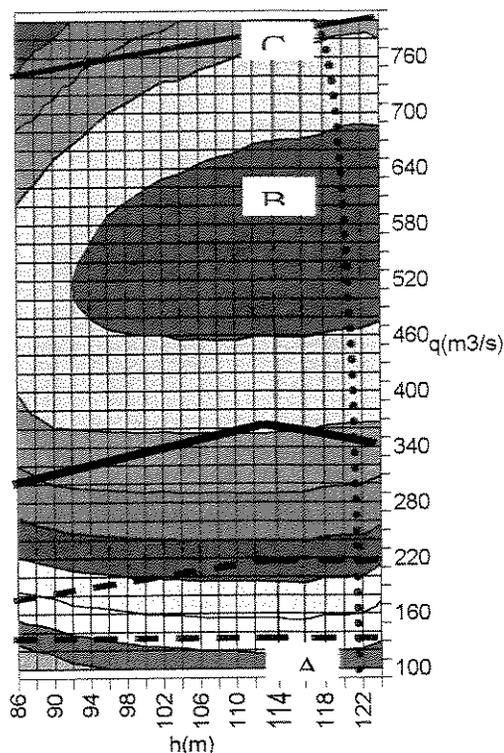


Figura 2.6 – Curva Colina da turbina de Itaipu.

Também pode ser verificada na **Figura 2.6**, sobre as curvas de nível que definem os valores do rendimento da turbina, duas regiões demarcadas por linhas tracejadas e linhas contínuas. Essas regiões definem os pontos permitidos de operação. Por exemplo, para uma altura de queda líquida de 110 metros, são permitidos valores de turbinamento que variam entre 114 a 219 m^3/s e 380 a 770 m^3/s . As faixas restritivas de turbinamento ou de operação estão associados a problemas de *cavitação*⁴ nas pás das turbinas ou de vibração.

Na usina de Itaipú, das 18 unidades geradoras, 3 possuem duas faixas de turbinamento. Isto foi possível graças a um revestimento especial aplicado às pás das turbinas para minimizar os efeitos da cavitação. O tratamento de reforço nestas turbinas foi necessário, devido a que

⁴ Fenômeno que pode ocorrer no interior de sistemas hidráulicos pelo aparecimento de recintos cheios de vapor e gases. Nos pontos onde a pressão excede ao valor de saturação do vapor, as bolhas de vapor são condensadas violentamente, permitindo que o líquido nele seja impelido. Os choques contra as paredes causa a desagregação do material, provocando a chamada erosão cavital [8].

no início da operação, a única demanda na usina vinha do sistema elétrico paraguaio, cuja carga era tão baixa que para ser atendida era necessário operar as turbinas abaixo dos valores normais de *turbinamento*⁵. O crescimento da carga de todo o sistema interligado paraguaio e brasileiro, desde então, não exige que as máquinas utilizem mais essa faixa de operação de baixa carga.

Para avaliar as perdas associadas à variação do rendimento da turbina, consideramos ao ponto **B** como valor de referência ou de perda nula. Portanto o afastamento do ponto de referência ou ponto **B**, será considerado como perda e quantificada pela seguinte expressão [12]:

$$p_m = g \times (\eta_{tB} - \eta_t) \times \rho \times q_n \times h_t \times 10^{-6} \quad (2.8)$$

onde:

p_m – é a perda, em MW, associada à variação do rendimento da turbina.

2.3.5 – Perda total no sistema de geração

Definida a metodologia para o cálculo dos diferentes componentes da perda no sistema de geração, será feita a avaliação do total de perdas para as diferentes configurações de despacho de máquinas através da seguinte sequência de procedimentos:

- 1 – Varia-se o valor da vazão turbinada a partir de um valor mínimo até alcançar um valor máximo.
- 2 – Calcula-se o valor do nível de canal de fuga, para as diferentes condições de vazão do Rio Iguaçu, através do tipo de equações definidas no item 2.3.2.

⁵ Vazão que passa pelas turbinas.

3 – Encontra-se a perda hidráulica através da seguinte equação:

$$h_p = k \times q^2$$

4 – Encontra-se a altura de queda líquida através da seguinte equação:

$$h_l = h_r - h_{cf} - h_p$$

5 – Com a queda líquida verifica-se se o valor turbinado está dentro da faixa permitida de operação da turbina, em termos de vazão turbinada, através das seguintes equações:

$$q_{min}(h_l) = -0.5 \times h_l + 463.5, \text{ para } h_l > 119 \text{ m.}$$

$$q_{min}(h_l) = 2.2 \times h_l + 142.2, \text{ para } 99 \leq h_l \leq 119 \text{ m.}$$

$$q_{min}(h_l) = 0.66 \times h_l + 294, \text{ para } h_l < 99 \text{ m.}$$

$$q_{max}(h_l) = 4.167 \times h_l + 280, \text{ para qualquer valor de } h_l.$$

onde

q_{max} é o valor de turbinamento máximo para uma dada altura de queda líquida.

q_{min} é o valor de turbinamento mínimo para uma dada altura de queda líquida.

Neste ponto pode-se verificar duas situações:

Se a vazão turbinada estiver dentro da faixa definida por q_{min} e q_{max} vá ao passo 6.

Se a vazão turbinada for maior que q_{max} ou menor que q_{min} vá ao passo 7.

6 – Com os valores de altura de queda líquida e vazão turbinada, encontra-se na Curva Colina o valor do rendimento (η_t) da turbina e calcular $p = g \times \rho \times 10^{-6} \times \eta_{tur} \times h_l \times q$

7 – Voltar ao passo 1.

8 – Através das equações (2.6), (2.7) e (2.8) e um processo iterativo para considerar o rendimento do gerador, transforma-se todas as perdas em unidade de potência elétrica (MW), que somadas resulta no total de perdas no sistema de geração:

$$P_{tn} = P_{rn} + P_{ln} + P_{cfn}$$

onde

P_{tn} é o total de perdas no sistema de geração para “n” máquinas.

9 – Calcular :

$$P_{min} = g \times \rho \times \eta_{tur} \times \eta_{ger} \times q_{min} \times h_l \times 10^{-6}$$

$$P_{max} = g \times \rho \times \eta_{tur} \times \eta_{ger} \times q_{max} \times h_l \times 10^{-6}$$

onde:

P_{min} e P_{max} são a potência mínima e máxima que ‘n’ máquinas podem produzir, para um dado ‘ h_l ’.

10 – Ajusta-se polinômio ao total de perdas (P_m) calculadas em função da potência gerada.

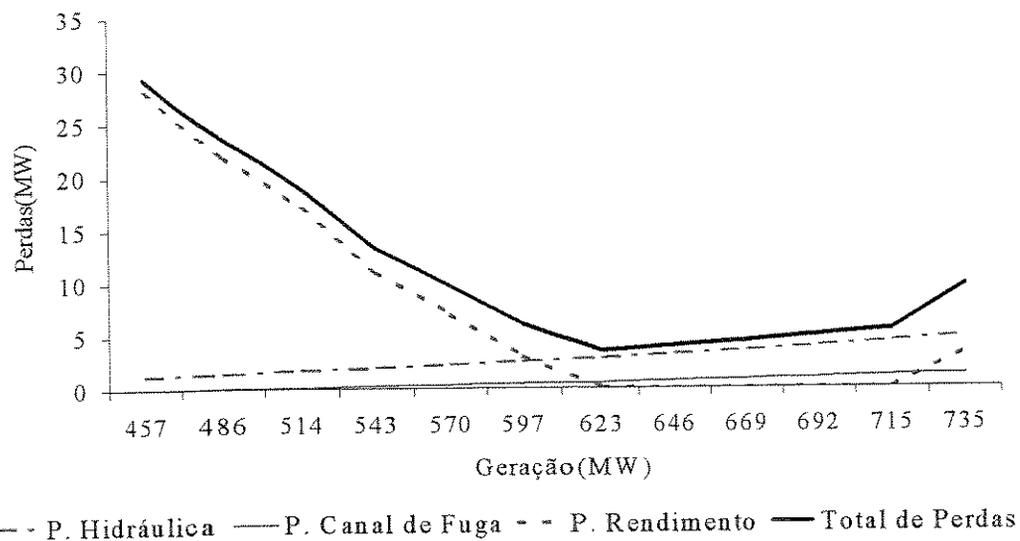
11 – Repete-se os mesmos procedimentos do passo 1 até o 10, para todos os possíveis números de máquinas (18) de Itaipu.

Capítulo II – Sistema de geração.

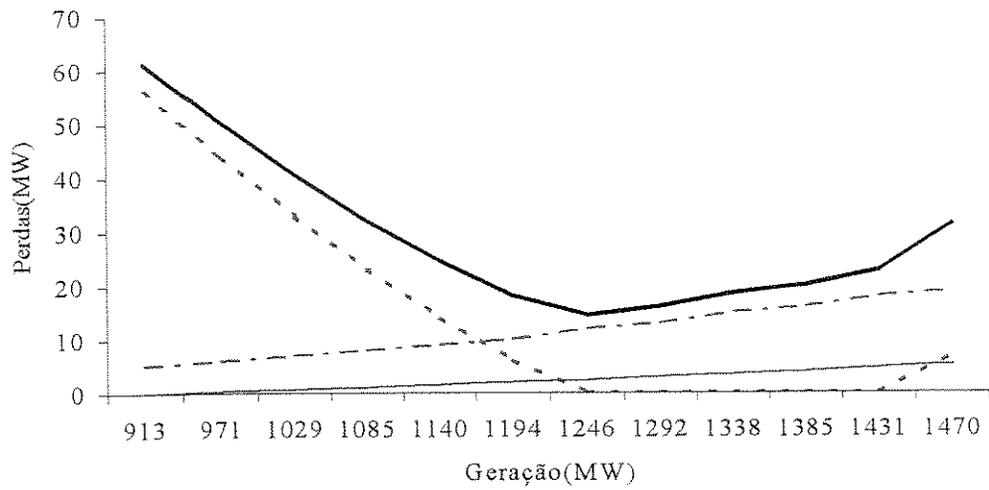
A seguir são apresentadas as curvas de perdas para a usina de Itaipu, levantadas para uma condição de vazão pelo Rio Iguaçu entre 1000 e 5000 m³/s.

Todas as curvas foram plotadas desde um valor de turbinagem mínima até o valor correspondente à capacidade máxima dos geradores.

Perdas - 1 Máquina

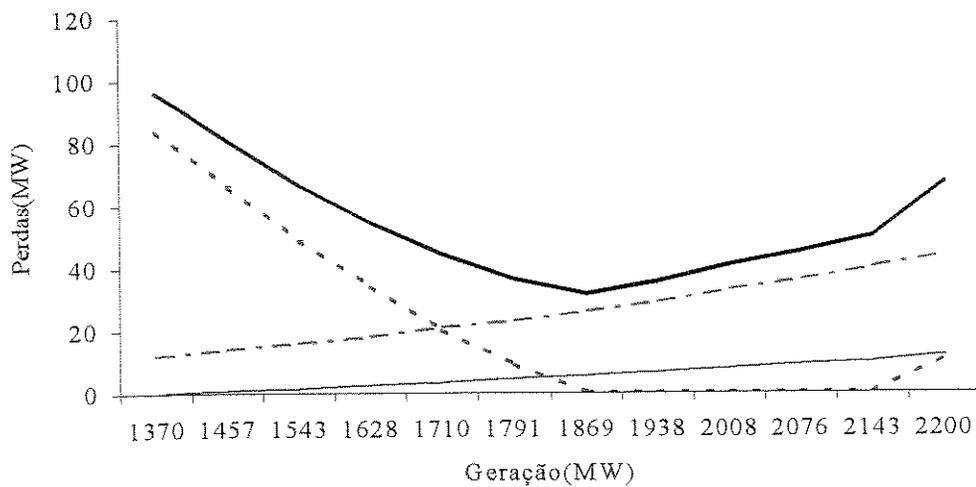


Perdas - 2 Máquinas



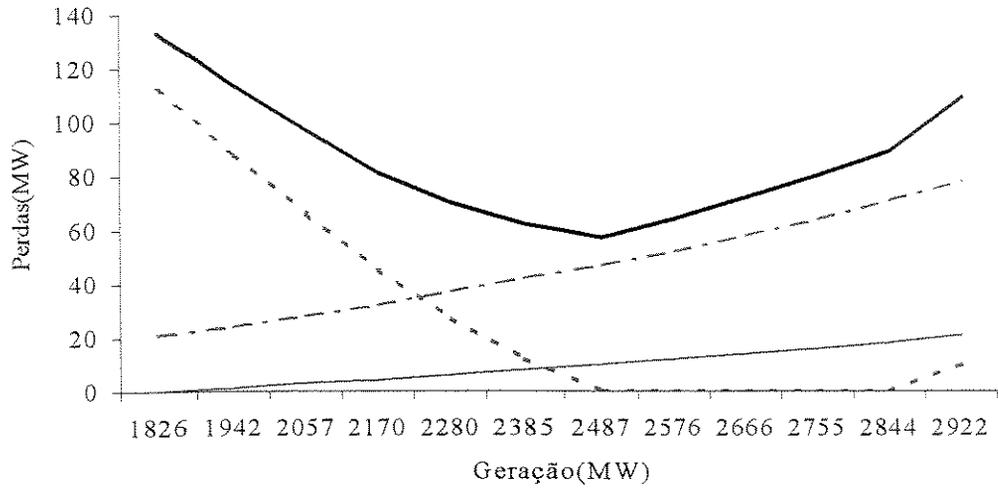
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 3 Máquinas



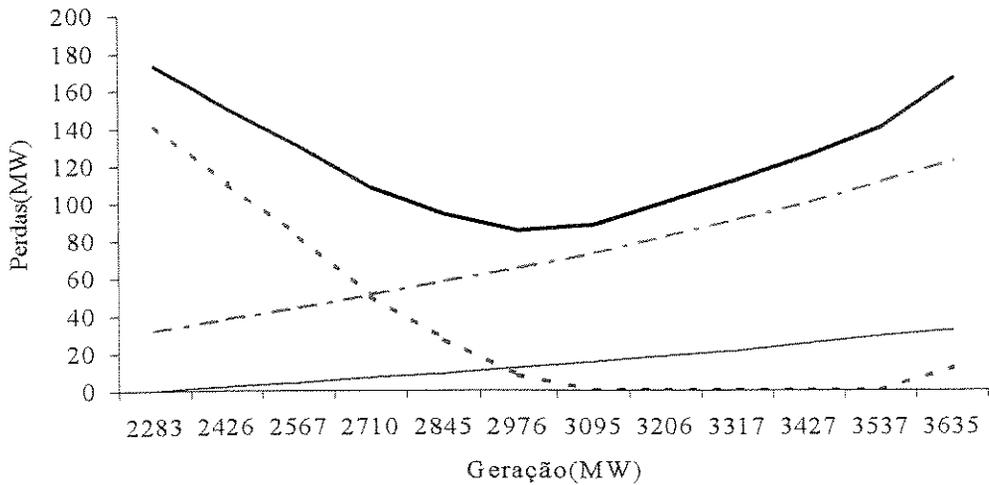
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 4 Máquinas



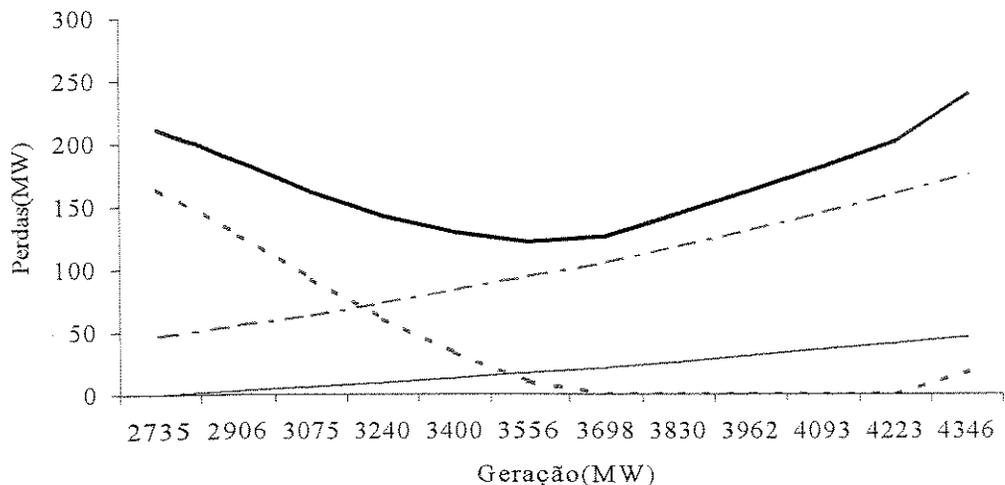
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 5 Máquinas



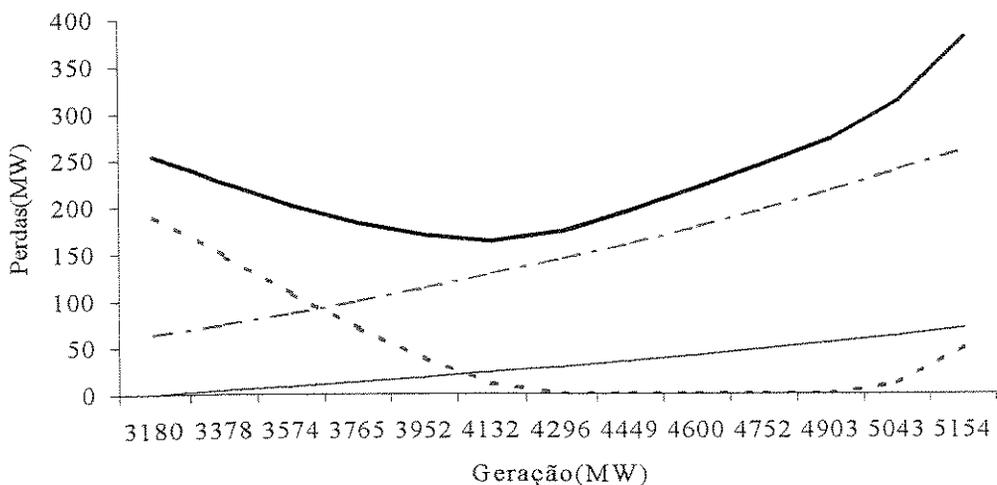
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 6 Máquinas



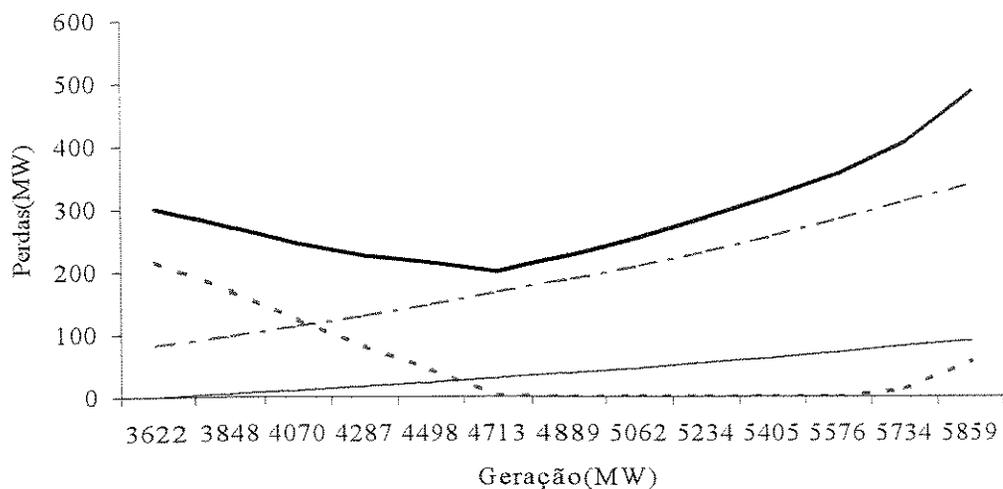
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 7 Máquinas



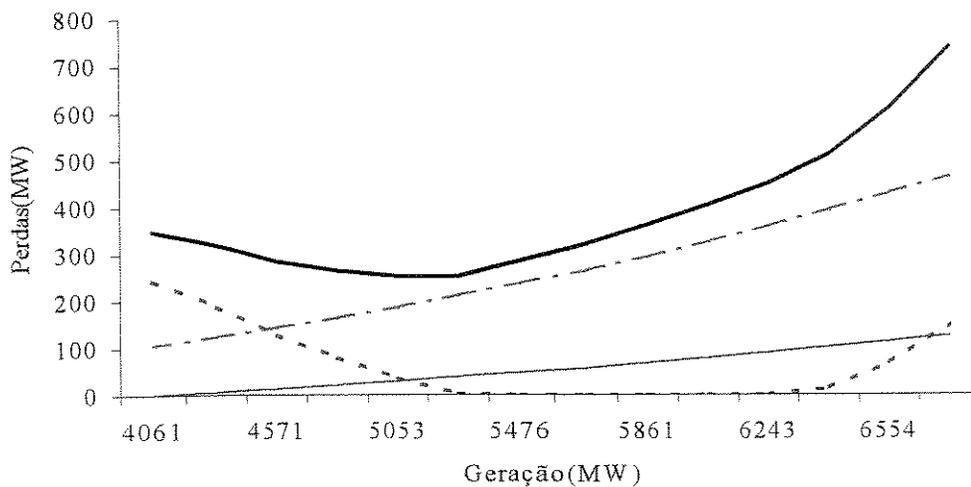
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 8 Máquinas



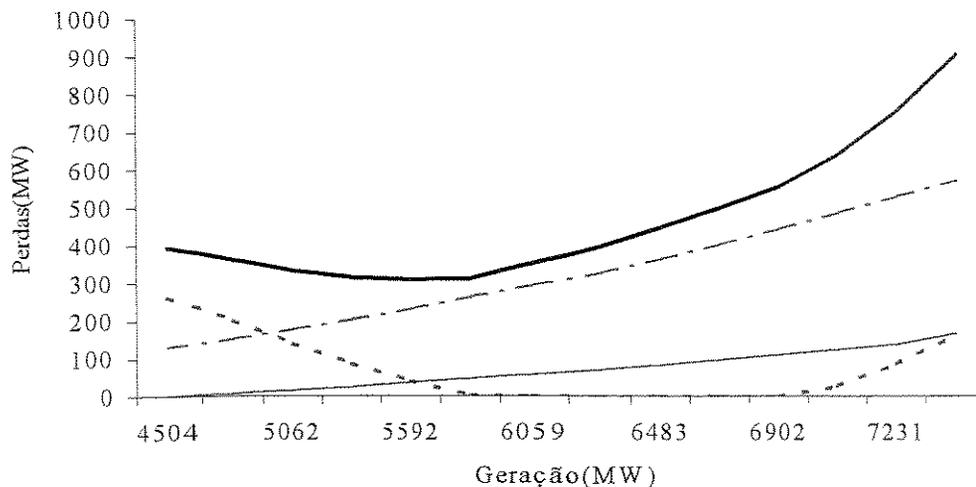
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 9 Máquinas



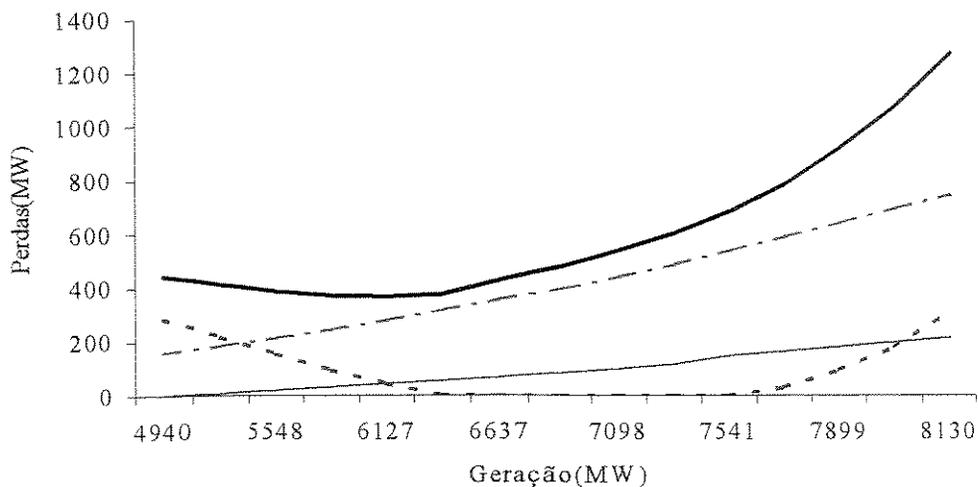
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 10 Máquinas



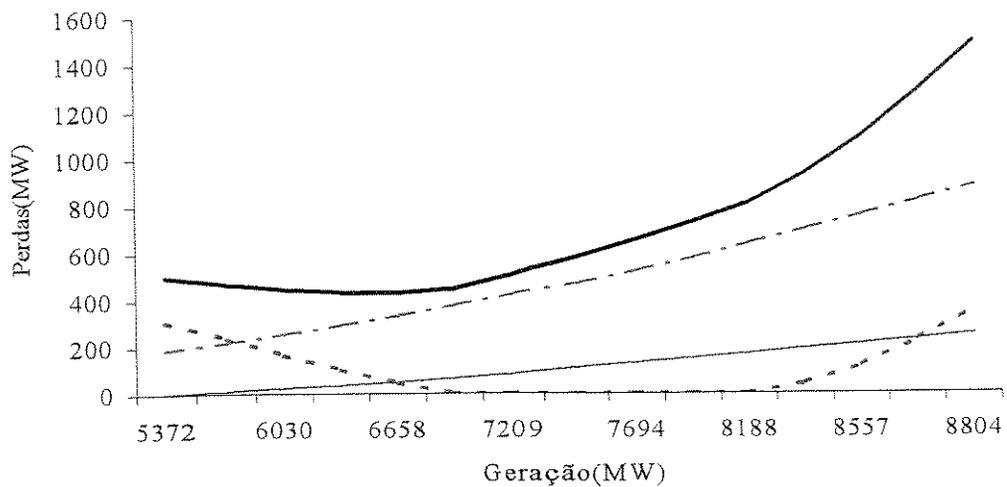
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 11 Máquinas



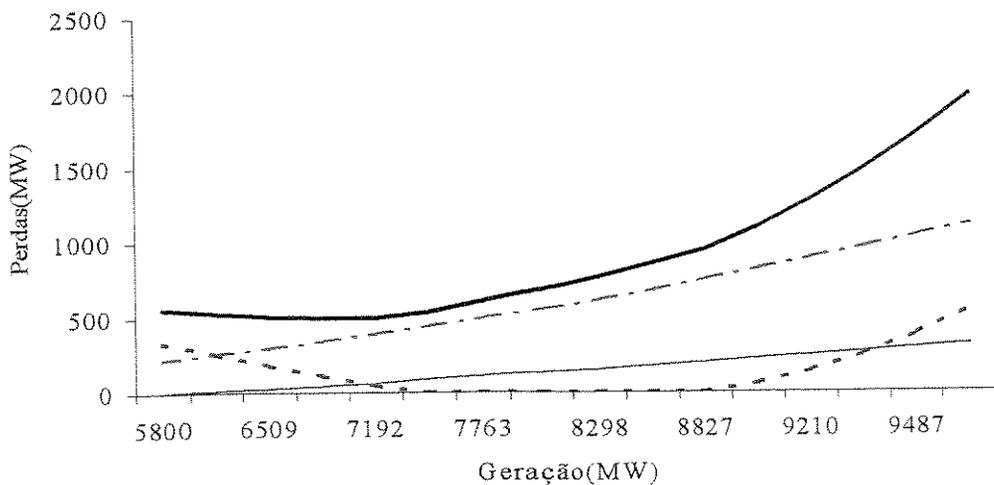
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 12 Máquinas



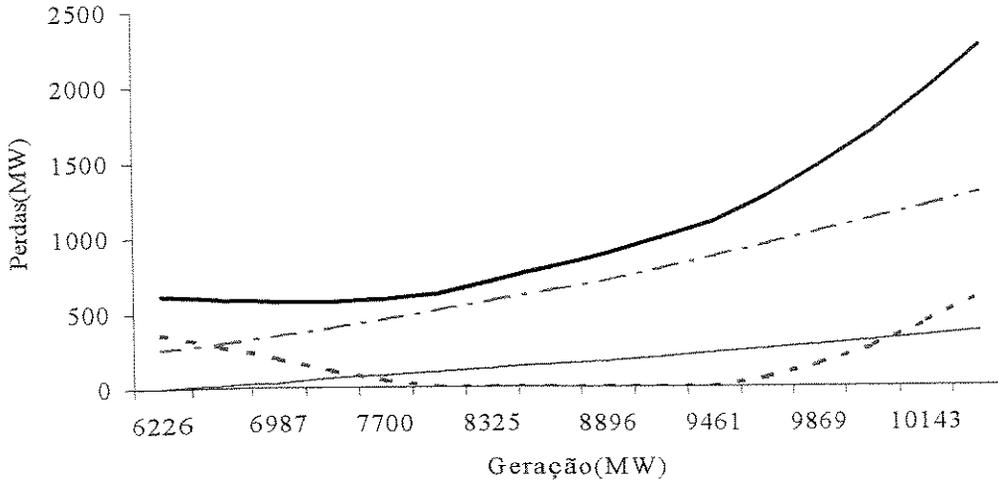
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 13 Máquinas



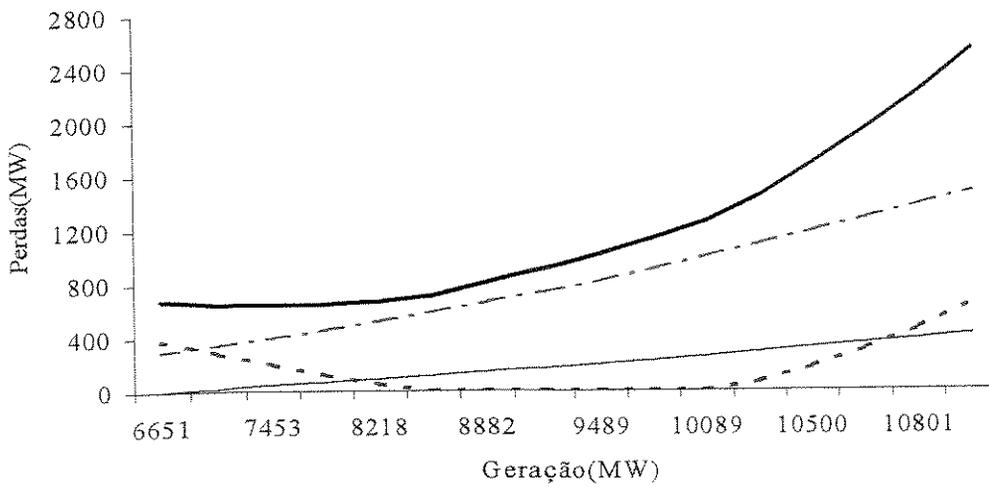
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 14 Máquinas



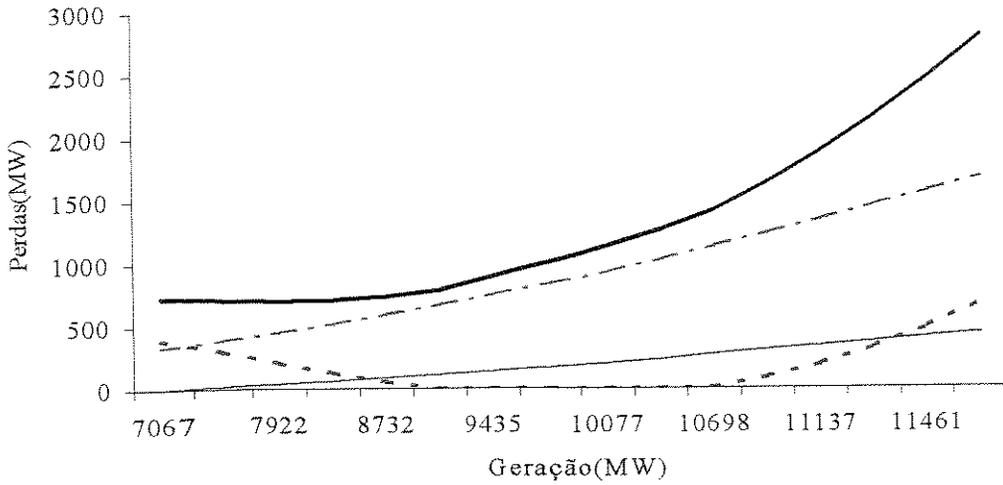
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 15 Máquinas



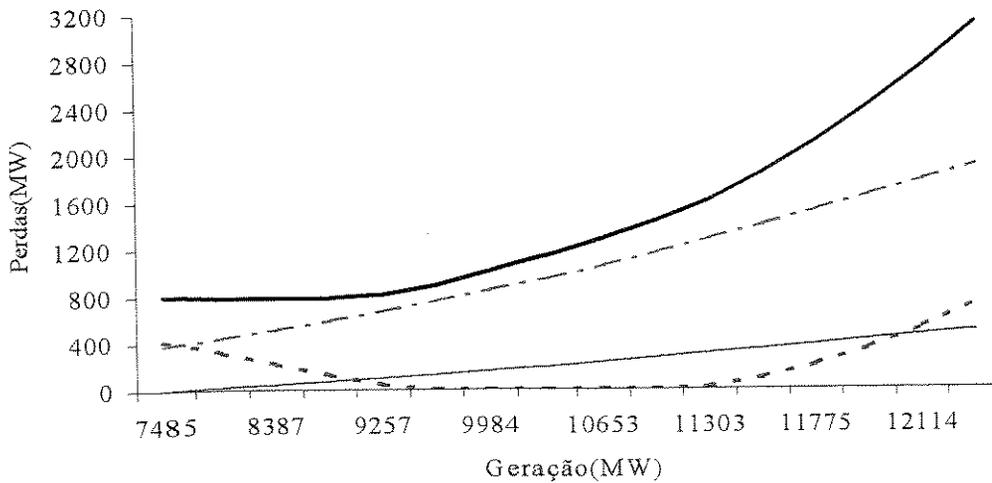
-- P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 16 Máquinas



- - P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

Perdas - 17 Máquinas



- - P. Hidráulica — P. Canal de Fuga - - P. Rendimento — Total de Perdas

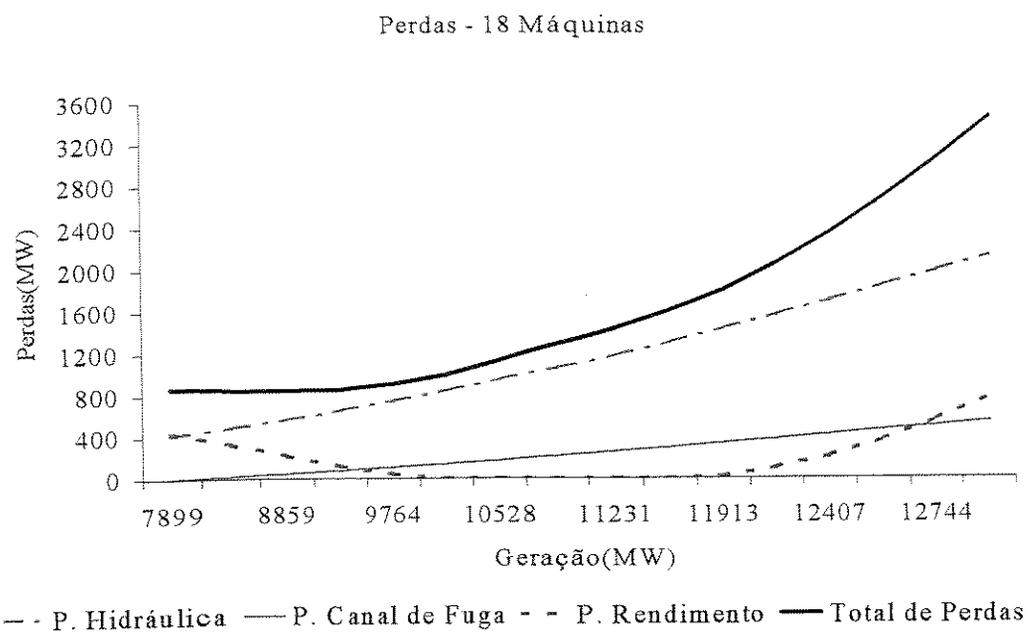


Figura 2.7 – Perdas associadas ao sistema de geração da usina de Itaipu.

Capítulo III

O despacho de máquinas

3.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentados o problema do despacho de máquinas como um problema a ser resolvido por métodos de otimização e todas as considerações adotadas para ajustá-lo a um tipo de problema de otimização. Será apresentada a formulação do problema e, de maneira resumida, a técnica de otimização adotada para resolvê-lo.

3.2 – Descrição do problema

O problema do despacho de máquinas numa hidrelétrica surge quando os estudos do planejamento de curto prazo, a programação e mesmo a operação em tempo real define a quantidade de energia que a usina deve produzir ao longo do período do planejamento ou da programação. A supervisão na operação em tempo real, em ocasiões de desvios nas previsões da geração programada, da disponibilidade do recurso hídrico ou do desligamento de unidades geradoras, redefine o despacho de máquinas para as novas condições de operação do sistema elétrico de potência. Este compromisso nasce da necessidade de manter o equilíbrio entre geração e geração programada.

Na prática, muitos são os critérios adotados para o despacho de máquinas, porém os mais comuns são aqueles que visam minimizar as perdas no sistema de geração e aquele que visa minimizar as partidas e paradas, no intuito de valorizar a vida útil das unidades geradoras.

A minimização de perdas no sistema de geração é possível porque, conforme foi visto no capítulo anterior, a geração numa hidrelétrica é a conjugação de muitas variáveis, que resulta também em perdas hidráulicas, perdas pela elevação do canal de fuga e perdas por queda do rendimento do conjunto turbina-gerador.

A idéia de minimizar as perdas através do despacho consiste em determinar o número de máquinas que podem estar comprometidas no atendimento da geração programada e principalmente aquele número que incorre no menor valor de perdas.

O comportamento da carga ou da geração programada ao longo do dia apresenta variações. Conforme ela aumenta, a capacidade das máquinas comprometidas no seu atendimento não será suficiente para manter o equilíbrio da carga e geração. Isto vai exigir um maior número de máquinas comprometidas no atendimento da geração programada, isto é, será necessário colocar mais máquinas em operação.

Uma solução ao problema das frequentes partidas seria comprometer todas as máquinas no atendimento da geração programada. Porém as unidades geradoras das usinas hidrelétricas, conforme foi visto na **Figura 2.6** do item **2.3.4**, possuem faixas de valores permitidos e faixas de valores proibidos de turbinamento. A faixa de valores permitidos de turbinamento definem também valores de potência permitidos de geração, para cada valor da altura de queda líquida. Portanto, a idéia de comprometer todas as máquinas ao atendimento da geração programada será uma solução viável se nenhuma delas entrar na faixa proibida de geração.

Durante o processo de partida ou parada, inevitavelmente as máquinas passam pelas faixas proibidas de geração ocasionando desgastes e diminuição da vida útil das mesmas.

A minimização das partidas e paradas consiste em explorar toda a faixa de valores de potência permitidos de geração das máquinas comprometidas no atendimento da geração programada, antes de retirar ou colocar mais uma em operação.

Qualquer que seja o critério que venha a ser adotado para definir o despacho de máquinas, deverá observar as faixas permitidas de operação das máquinas. Cada valor da geração programada e condições hidrológicas à jusante da usina irão definir um número mínimo e um número máximo de máquinas possíveis de serem comprometidas ao atendimento dessa

geração programada. Neste sentido, quando a geração das máquinas são fixadas no seu limite inferior da faixa permitida de operação, qualquer valor de geração programada irá exigir um número maior de máquinas comprometidas que quando a geração das máquinas são fixadas no seu limite superior da faixa permitida de operação.

3.3 – Algoritmo para calcular o número mínimo e máximo de máquinas.

No capítulo 2, item 2.3.5, no passo 8 do processo de cálculo das perdas associadas à geração dos diferentes números de máquinas foram calculados os valores de potência mínima (p_{\min}) e máxima (p_{\max}). Esses valores de potência definem as faixas permitidas de geração para os diferentes números de máquinas em operação.

O número mínimo de máquinas que pode atender um valor da geração programada é definido pelo menor número de máquinas cujo valor de p_{\max} é maior ou igual à geração programada. O número máximo de máquinas que pode atender um valor da geração programada é definido pelo maior número de máquinas cujo valor de p_{\min} é menor ou igual à geração programada.

Os passos para definir o número mínimo e máximo de máquinas que pode ser despachada para atender uma dada geração programada são:

Passo 1 – Ler o valor da geração programada horária e fazer ' \underline{n} ' (nº. mínimo) e ' \overline{n} ' (nº. máximo) igual a zero.

Passo 2 – Para cada número de máquinas, variando de 1 até o total disponível para a operação, verificar:

Se $p_{\min} \leq$ geração programada horária

$$\bar{n} = \bar{n} + 1;$$

Caso contrário

Se $p_{\max} \geq$ geração programada horária;

$$\underline{n} = \underline{n} + 1;$$

Caso contrário

Passo 3 – Fazer \underline{n} e \bar{n} igual a zero e voltar ao passo 1.

3.4 – Um exemplo ilustrativo

Para uma melhor compreensão do problema, seja uma série de geração programada com quatro valores em MW: $d_1=1400$, $d_2=2800$, $d_3=3300$, $d_4=2000$, para os quais dispõe-se de 7 máquinas, cujas faixas permitidas de geração estão definidas na **Tabela 3.1**.

Nº. Máq.	1	2	3	4	5	6	7
Pot. Máx.(MW)	735	1470	2200	2923	3635	4346	5154
Pot. Mín.(MW)	456	913	1370	1826	2282	2734	3180

Tabela 3.1 – Faixa permitida de operação.

Com os valores da geração programada horária e as faixas permitidas de geração, calculamos os números mínimo e máximo de máquinas possíveis de atender a geração programada horária e que resumimos na **Tabela 3.2**.

Determinando o número mínimo e máximo de máquinas possíveis de atender a geração programada horária, estará definida todas as configurações possíveis de serem adotadas ao longo do período da programação.

Geração programada (MW)	1400	2800	3300	2000
Nº. Máx.	3	6	7	4
Nº. Mín.	2	4	5	3

Tabela 3.2 – Número mínimo e máximo de máquinas para atendimento da geração programada.

Se o critério de despacho a ser adotado é minimizar partidas e paradas, uma inspeção na **Tabela 3.2**, especificamente nos valores máximo e mínimo de máquinas possíveis de serem despachadas, concluirá que o despacho ótimo é atender com 3, 4, 5 e 4 máquinas a geração programada da primeira, segunda, terceira e quarta hora, respectivamente. Esse programa de despacho resultará em duas partidas e uma parada.

Utilizando as curvas da **Figura 2.7**, obtém-se as perdas associadas a cada configuração de máquinas para o atendimento da geração programada horária que está representada na **Tabela 3.3**.

Nº de máquinas	Perdas (MW)			
	Geração Programada (MW)			
	1400	2800	3300	2000
2	22			
3	92			40
4		85		102
5		98	108	
6		202	134	
7			238	

Tabela 3.3 – Perdas associadas à geração programada e número de máquinas.

Se o critério for minimizar perdas, deve-se definir para cada geração programada horária o número de máquinas entre os valores máximo e mínimo da **Tabela 3.2**, que acarreta a menor perda. Neste exemplo, a perda mínima resultará com um programa de despacho com 2, 4, 5 e 3 máquinas, para a geração programada da primeira, segunda, terceira e quarta hora, respectivamente .

A **Tabela 3.4** mostra o resumo da otimização do nosso exemplo. Podemos constatar que o despacho que minimiza partida e parada não coincide com aquele que minimiza perdas. Isto significa que a minimização de perdas é obtida a custa de um maior número de partidas e paradas. Significa que quando minimizamos partidas e paradas, incorre-se em um valor maior de perdas.

Geração Programada (MW)	1400	2800	3300	2000
Min. Partida/Parada (nº de máquinas)	3	4	5	4
Min. Perdas (nº de máquinas)	2	4	5	3

Tabela 3.4 – Otimização do despacho de máquinas.

Adotar como critério de despacho a minimização de partidas/paradas é natural, quando o recurso hídrico é abundante. Porém, quando o recurso hídrico é escasso torna-se necessário adotar como critério de despacho, a minimização de perdas, sem desconsiderar as frequentes partidas e paradas que o mesmo irá ocasionar.

Para encontrar uma solução de compromisso, que minimiza partidas/paradas e perdas, é necessário determinar o custo de uma partida e parada, pois atribuir um valor às perdas é imediata. Neste sentido existem alguns estudos [4] e [5] que avaliam o custo das partidas e paradas de unidades geradoras de usinas hidrelétricas, porém estes estudos não são conclusivos.

Neste contexto, a possibilidade de analisar a partir de que valores de custo de partida/parada o critério de despacho que minimiza partida/parada começa a prevalecer sobre o critério de minimização de perdas, é muito importante para definir o critério de despacho a ser adotado. Deste modo, o problema de despacho seria um problema de minimização de custos associados às perdas e custos associados às partidas e paradas. Na **Figura 3.1** está representado o nosso exemplo em forma de grafo.

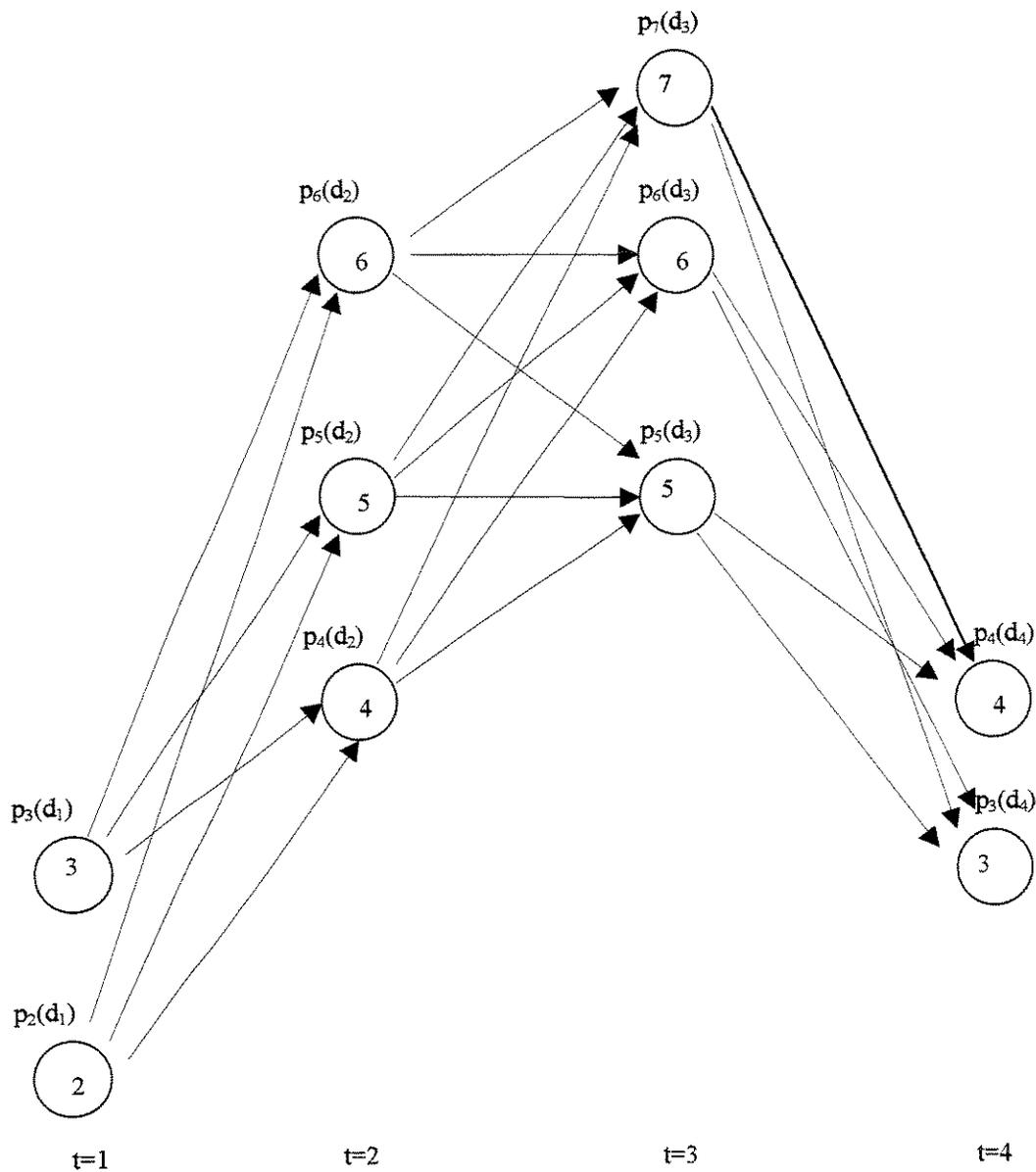


Figura 3.1 – O problema de despacho representado em grafo.

O exemplo pode ser representado na forma de um grafo, no qual cada nó representa o número de máquinas que poderia ser despachada para atender a geração programada. Os arcos representam as possíveis transições de um estado, caracterizado por um determinado número de máquinas despachadas, para outro estado ou configuração de despacho, associado ao atendimento da geração programada do horário seguinte. A cada nó está associada também a perda que o sistema de geração incorre para o atendimento da geração programada horária.

Para generalizar as características do problema, pode ser adotada a notação ' n_t ', para identificar o número de máquinas comprometidas ao atendimento da geração programada da hora ' t '.

Do mesmo modo, os valores numéricos associados a cada nó referente às perdas que o sistema de geração incorre para atender a geração programada ' d_t ', com ' n_t ' número de máquinas, podem ser representados pela notação ' $p_{n_t}(d_t)$ '.

3.5 – Formulação do problema

Se associarmos um custo às partidas ou paradas e outro às perdas, o critério que deve orientar o despacho de máquinas numa hidrelétrica, pode ser obtido através da seguinte formulação matemática:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \left\{ c_{ap} \times |n_t - n_{t-1}| + c_p \times p_{n_t}(d_t) \right\} \quad (3.1)$$

s.a

$$n_t \in N \quad (3.2)$$

$$\underline{n_t}(d_t) \leq n_t \leq \overline{n_t}(d_t) \quad (3.3)$$

onde:

- n_t é o número de máquinas despachadas na hora 't'.
- $\underline{n}_t(d_t)$ e $\overline{n}_t(d_t)$ são os números mínimo e máximo de máquinas respectivamente, capazes de atender a geração programada d_t .
- $p_{n_t}(d_t)$ é a função de perdas com ' n_t ' máquinas gerando ' d_t ' MW.
- c_{ap} é o custo de cada partida ou parada.
- d_t é a geração programada horária em MW.
- T é o horizonte da programação.
- c_p é o custo da unidade de potência perdida.
- N é o conjunto dos números naturais.

O número mínimo e máximo de máquinas, capazes de atender a geração programada horária, assegura também o cumprimento das restrições referentes às faixas permitidas de operação das máquinas.

A **Figura 3.1** que representa o problema do despacho na forma de grafo, sugere como meio para obter a solução, entre outros, técnica de fluxo em redes ou de programação dinâmica.

Se for adotada como meio para obter a solução técnica de fluxo em redes, deverá ser atribuído aos arcos que unem os nós, valores numéricos referentes às perdas e número de

partidas ou paradas, multiplicados pelos seus respectivos custos. Os arcos assim valorizados representam a ‘distância’ em termos de perdas e números de partidas e paradas entre uma determinada configuração de despacho e outra. Também, torna-se necessário introduzir um nó origem conectado a todos os nós associados às configurações de máquinas da primeira hora, um nó destino conectado a todos os nós associados às configurações de máquinas do último horário e um fluxo unitário que é introduzido no nó origem e retirado no nó destino, procurando minimizar o custo dado pelas ‘distâncias’.

Neste trabalho porém, foi adotado como meio para obter a solução técnica de programação dinâmica que apresenta-se resumidamente na seguinte seção.

3.6 – A programação dinâmica.

A programação dinâmica é um procedimento matemático projetado principalmente para melhorar a eficiência do cálculo de problemas de programação matemática, desagregando o problema original em sub-problemas de menor tamanho, conseqüentemente mais fácil de resolver. Ela é utilizada frequentemente em problemas que envolvem decisões sequenciais e inter-relacionadas no tempo.

A técnica adotada pela programação dinâmica consiste em dividir o problema em ‘estágios’, em vez de considerá-lo como um só, que requerem uma ‘política de decisão’ em cada um deles.

Um ‘estágio’ define-se como parte do problema que possui um conjunto de alternativas mutuamente excludentes, das quais será selecionada a melhor alternativa. As diferentes alternativas que constituem um estágio são os ‘estados’.

Em geral, os ‘estados’ são as diferentes condições possíveis em que o problema pode-se encontrar em cada estágio da sua solução. O número de ‘estados’ define também o número

de avaliações que deve ser realizado em cada ‘estágio’. O aumento do número de ‘estados’ em cada ‘estágio’ irá exigir também um aumento do tempo de cálculo. Este problema é conhecido como ‘a maldição da dimensionalidade’ como foi chamado pelo R. Bellman e constitui um sério obstáculo para resolver problemas de tamanho médio e grande, por programação dinâmica.

A política ótima de decisão baseia-se na relação recursiva para determinar o ‘estado’ do próximo ‘estágio’. Através do conhecimento do estado atual do sistema, que expressa toda a informação sobre o seu comportamento anterior, define-se a que ‘estado’ do próximo ‘estágio’ transitar. Desta maneira, assegura-se que a otimização seja para o problema completo.

O seguinte exemplo ilustrativo descreve as características da programação dinâmica [13]. Trata-se do problema de um garimpeiro do Missouri que decide ir para o oeste para unir-se à febre do ouro na Califórnia em meados do século XIX. Tem que fazer a viagem em diligência através de territórios sem lei, correndo riscos de ser atacado por índios e bandidos. O ponto de partida e de chegada são conhecidos, porém existem muitas opções em quanto a que estados, ou territórios que mais tarde transformaram-se em estados, deve escolher como pontos intermediários. A **Figura 3.2** mostra as possíveis rotas, onde cada estado está representado por uma letra em círculo.

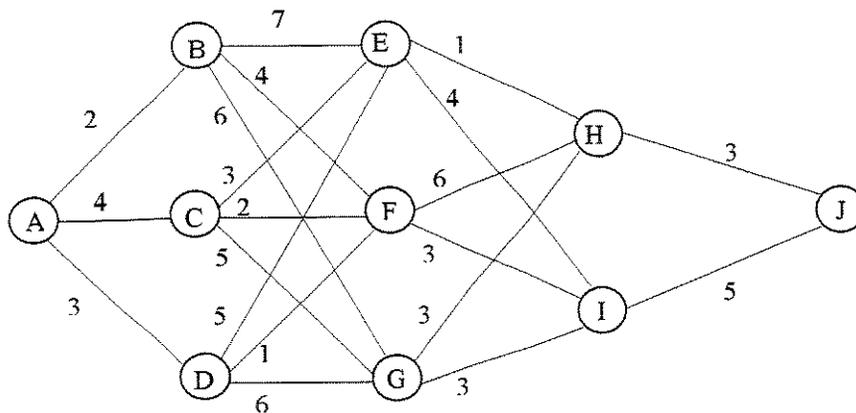


Figura 3.2 – Sistema de caminhos e a distância entre os estados.

Pode-se verificar na figura que serão necessários quatro etapas ou jornadas de diligência, para viajar desde o seu ponto de partida no estado A (Missouri) ao seu destino J (California).

Naquele tempo eram oferecidas apólices de seguro de vida aos passageiros. O custo da apólice para qualquer jornada da diligência estava baseado nos riscos à segurança associados à rota. Então, a rota mais segura é também aquela de menor custo. O número que aparece entre os diferentes estados é o custo da apólice de seguro.

Preocupado com a sua segurança o garimpeiro buscará a rota mais barata entre as 18 alternativas existentes, que poderia encontrar por busca exaustiva de tentativa e erro. Porém a programação dinâmica proporciona uma solução com muito menos esforço.

Na **Figura 3.2** podemos verificar que há um caminho só para chegar até o estado B ao custo de 2 \$. Da mesma forma, há um caminho só para chegar até os estados C e D, ao custo de 4 e 3 \$, respectivamente. Para chegar ao estado E, existem três caminhos, por B, C ou D. O custo da rota pelo estado B é igual ao custo para chegar até o estado B (2 \$), mais o custo do caminho de B até E (7 \$), somando um total de 9 \$. Podemos verificar que o custo para chegar a E pelos estados C e D são iguais a 7 e 8 \$, respectivamente. Portanto o caminho mais seguro, isto é, mais econômico para chegar até o estado E, é através do estado C.

Seguindo o mesmo procedimento podemos verificar que o caminho mais barato para chegar até o estado F é através do estado D, a um custo de 4 \$ e que para chegar a destino, o estado J, o caminho mais barato é através dos estados A, C, E, H e J.

Na **Figura 3.3** está representado o grafo dos caminhos mais seguros.

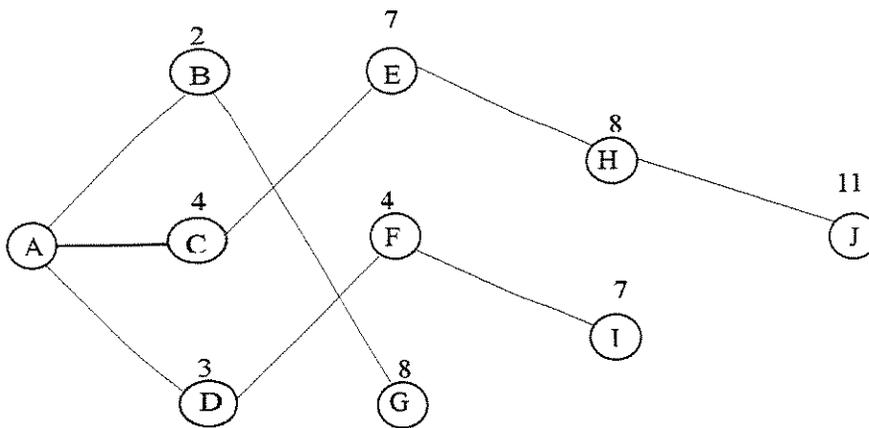


Figura 3.4 – Grafo dos caminhos mais seguros.

Para formalizar o procedimento de busca do caminho mais seguro, apresentado anteriormente, vamos agrupar os diferentes estados possíveis de serem atingidos nos diferentes estágios ou jornadas de diligência na variável ‘ x_t ’, onde o sub-índice ‘ t ’ indica o estágio ao qual o estado está associado. Então, os diferentes estados estarão agrupados em: $x_1=\{A\}$, $x_2=\{B, C, D\}$, $x_3=\{E, F, G\}$, $x_4=\{H, I\}$, $x_5=\{J\}$.

O processo para determinar o caminho ótimo pode ser representado pela seguinte expressão matemática:

$$f_1(x_1)=0 \tag{3.4}$$

$$f_{t+1}(x_{t+1}) = \min_{x_t} \{f(x_t) + c(x_{t+1}, x_t)\}, t = 1, 2, \dots, 5 \tag{3.5}$$

onde:

$f_{t+1}(x_{t+1})$ é a função de custo mínimo acumulado de x_t até x_{t+1} no estágio ‘ $t+1$ ’.

$c(x_{t+1}, x_t)$ é o custo elementar associada à decisão de evoluir do estado ' x_t ' no estágio ' t ' para o estado ' x_{t+1} ' no estágio ' $t+1$ '.

A forma para obter o caminho ótimo, através da equação recursiva 3.4 e 3.5, partindo da origem na direção do destino, chama-se 'resolução forward'. Quando o processo inicia-se do estado final na direção da origem chama-se 'resolução backward'.

3.7 – Técnica de solução do problema do despacho.

Fazendo analogia entre o problema do despacho de máquinas e o problema da diligência apresentado na seção anterior, identificamos como estágio a hora ' t ' e como variável de estado o número de máquinas despachadas ' n_t '. A perda ' $p_{n_t}(d_t)$ ' associada ao sistema de geração para atender a geração programada ' d_t ' com ' n_t ' máquinas mais o custo de partidas/paradas associado à mudança do número de máquinas em operação constituem o custo elementar relativo à transição de um estado a outro.

O problema do despacho, ao contrário do problema da diligência, possui mais de uma origem devido à geração programada da primeira hora poder ser atendida por mais uma configuração de máquinas. Também poderá ter mais de um destino, devido à geração programada do último horário poder ser atendida por mais de uma configuração de máquinas.

A dimensão do espaço de estados em cada estágio está definida pelo número mínimo ' \underline{n}_t ' e número máximo ' \overline{n}_t ' de máquinas que poderá ser despachada para atender a geração programada horária ' d_t ' [13], [14], [15].

A otimização pode ser obtida através das seguintes equações de recursão:

$$f_1(n_1) = \{c_{ap} \times |n_1 - n_0| + (c_p \times p_{n_1}(d_1))\}, \underline{n_1}(d_1) \leq n_1 \leq \overline{n_1}(d_1) \quad (3.6)$$

$$f_{t+1}(n_{t+1}) = \min_{n_t} \{c_{ap} \times |n_t - n_{t-1}| + c_p \times p_{n_t}(d_t)\} + f_t(n_t) \quad (3.7)$$

$$t = 1, \dots, T. \quad \underline{n_t}(d_t) \leq n_t \leq \overline{n_t}(d_t).$$

onde:

n_0 é o número de máquinas em operação na hora '0', isto é, antes do início do período da programação.

$f_t(n_t)$ é o custo mínimo acumulado nos estágios 1, 2, ..., t, para o dado estado n_t .

A implementação do programa otimizador do despacho de máquinas foi através do Matlab 4.2, rodando em PC Pentium 120 MHz. São dados de entrada para o programa otimizador do despacho:

- o custo de cada partida e parada.
- o custo da energia perdida.
- o número de máquinas disponíveis para a operação.
- a vazão média diária do Rio Iguaçu, na confluência com o Rio Paraná.
- o horizonte, em número de horas, do planejamento ou programação.
- a geração programada horária em MW.

São fornecidos pelo programa otimizador do despacho como dados de saída:

- o número mínimo e máximo de máquina capaz de atender a geração programada.
- o despacho otimizado de máquinas, com o total de perdas e o número de partidas e paradas.

Capítulo IV

Resultados obtidos

4.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentados os testes realizados com o modelo e os resultados obtidos em alguns casos estudados. Foram analisados os casos nos quais espera-se resultados que possam evidenciar a influência de algumas variáveis no despacho de máquinas.

Também será apresentado o resultado obtido com a utilização exaustiva do modelo otimizador, varrendo diferentes valores de custo das partidas/paradas ou preço da energia, para avaliar o efeito destes no despacho de máquinas.

4.2 – Teste do otimizador do despacho

Antes de iniciar estudos mais específicos, serão realizados testes para verificar o funcionamento do programa.

Hora	Demanda(MW)
1	10271
2	10047
3	9128
4	8224
5	7916
6	7682
7	7427
8	6755
9	6758
10	6916
11	7146
12	7141

Hora	Demanda(MW)
13	7440
14	7292
15	7322
16	7447
17	8046
18	9348
19	10625
20	10740
21	10717
22	10637
23	10622
24	10510

Tabela 4.1 – Dados para o estudo de teste.

Neste sentido será considerada uma série de geração programada de 24 horas, verificada na usina de Itaipu. Os dados são apresentados na Tabela 4.1 [17]. A série de geração programada verifica-se em circunstâncias de vazão na foz do Rio Iguaçu com $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Para o atendimento da geração programada estão disponíveis 18 unidades geradoras.

Para minimizar as perdas, na função objetivo (eq. 3.1) devemos desconsiderar o custo associado às partidas e paradas fazendo ‘ c_{ap} ’ igual a zero. Por outro lado, para minimizar as partidas e paradas devemos desconsiderar o custo associado às perdas fazendo ‘ c_p ’ igual a zero. Os resultados obtidos estão representados na Figura 4.1.

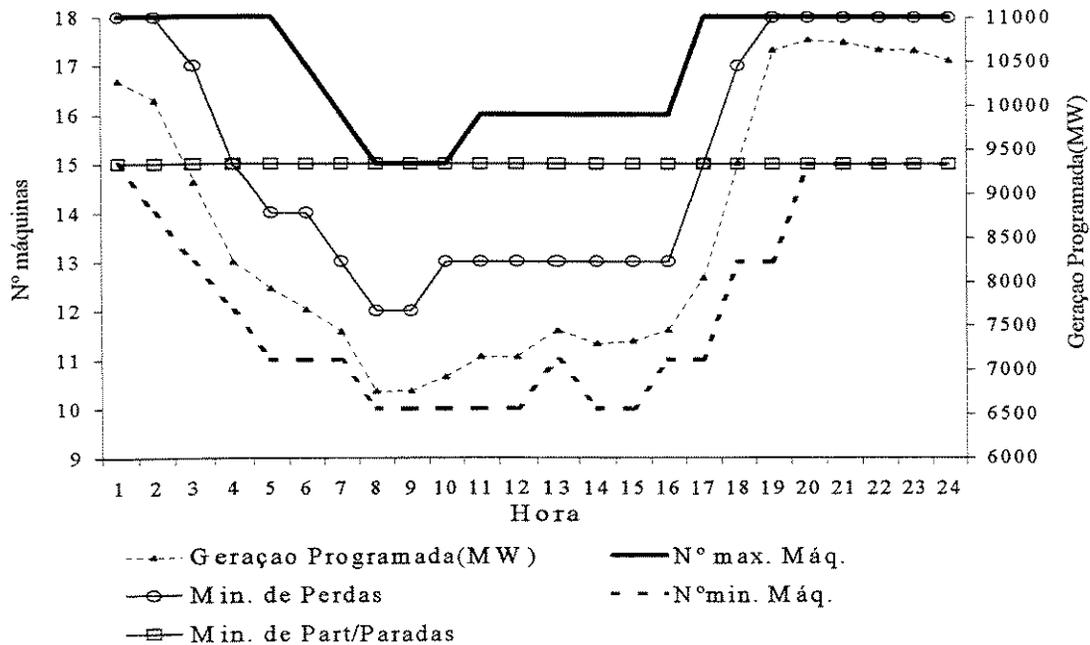


Figura 4.1 – Resultado da otimização de perdas ou partidas/paradas.

Pode ser constatado que o objetivo de minimização de perdas é conflitante com o objetivo da minimização de partidas/paradas. A variação do número de máquinas despachadas que resulta da minimização de perdas, acompanha a variação da geração programada, enquanto

que a minimização de partidas/paradas resulta no despacho de um único número de máquinas ao longo das 24 horas. O despacho sob os dois criterios de otimização resultam em números que permanecem entre os valores máximo e mínimo de número de máquinas possíveis de serem despachadas para o atendimento de cada geração programada horária.

Para a mesma série de geração programada, se forem atribuídos valores aos custos de partidas/paradas e às perdas, a otimização resultará num programa de despacho intermediário entre os dois critérios anteriores em termos de perdas e número de partidas/paradas, conforme podemos ver na **Figura 4.2**.

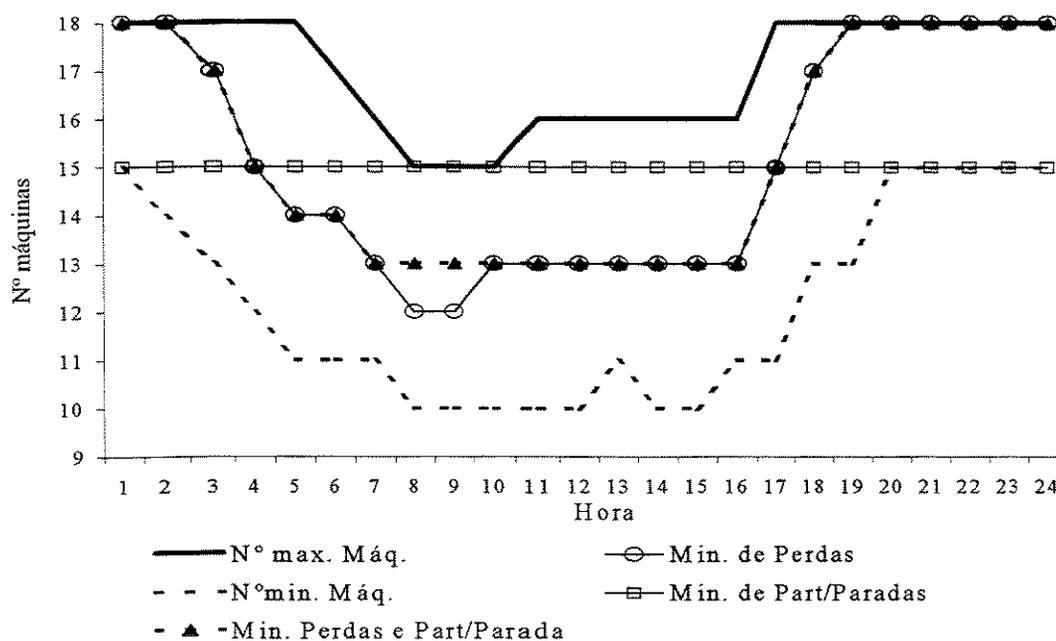


Figura 4.2 – Resultado da minimização de partidas/paradas, perdas e ambos os objetivos para $c_{ap}=2000$ US\$ e $c_p=25$ US\$.

Na **Tabela 4.2** estão resumidos os resultados da otimização do despacho, em termos de perdas e número de partidas/paradas para os diferentes valores de custos de perdas e de partidas/paradas.

Capítulo IV – Resultados obtidos

Custo partida ou parada (US\$)	Custo da energia perdida(US\$/MWh)	Número de partidas ou paradas	Total de perdas (MWh)
0	25	12	16490
2000	0	0	25190
2000	25	10	16540

Tabela 4.2 – Resumo da otimização sob os três critérios.

O valor atribuído como custo às partidas ou paradas é uma extrapolação dos custos associados às partidas e paradas encontradas em [4], devido a que a usina de Itaipú não possui um estudo concluído avaliando o custo das partidas ou paradas das suas unidades geradoras. O valor para a energia perdida, utilizado para o estudo da otimização é o preço médio de fornecimento de Itaipú.

A **Tabela 4.2** registra que quando atribuído um valor às perdas e as partidas ou paradas verifica-se um resultado intermediário em termos de perdas e números de partidas e paradas. Assim, verifica-se a diminuição nas perdas de 25190 a 16540 MWh, quando o custo da energia passa de zero para 25 US\$/MWh. O número de partidas e paradas passa de 12 a 10, quando o custo de cada partida ou parada passa de zero para 2000 US\$/partida ou parada.

4.3 – Avaliação do efeito do nível de canal de fuga no despacho de máquinas.

Na seção 2.3.2 , através da **Figura 2.5**, pôde ser verificada a influência do Rio Iguaçu no nível do canal de fuga da usina de Itaipú. Para avaliar o efeito sobre o despacho de máquinas vamos considerar a mesma série de geração programada da seção 4.2, porém o Rio Iguaçu em mais duas condições diferentes de afluência, com 6000 e 16000 m³/s e o mesmo número de máquinas disponíveis para operação.

Capítulo IV – Resultados obtidos

Na **Figura 4.3** estão representados os números mínimo e máximo de máquinas possíveis de serem despachadas, para o caso em que o Rio Iguazú está com 1500, 6000 e 16000 m³/s . Comparando os casos, verifica-se de um modo geral, que há um aumento no número mínimo e máximo de máquinas possíveis de serem despachadas para atender a geração programada, quando aumenta o valor das vazões pelo Rio Iguazú.

Este resultado é esperado devido a que para o mesmo volume de turbinagem obtém-se um menor valor de potência máxima, quando há diminuição na altura de queda ocasionada pelo aumento na vazão do Rio Iguazú. Com a diminuição da potência máxima por máquina será necessário um maior número de máquinas para atender a geração programada horária. O mesmo acontece com o número mínimo de máquinas possíveis de serem despachadas.

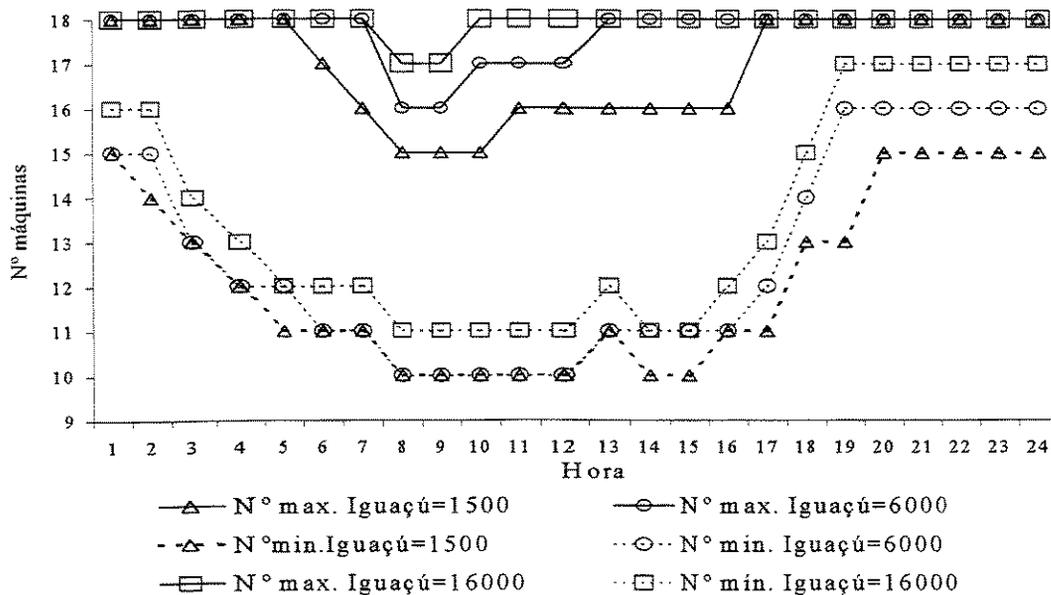


Figura 4.3 – Números mínimo e máximo de máquinas.

Os resultados da minimização de partidas e paradas nas três condições de afluência do Rio Iguazú, estão representados na **Figura 4.4**. O traçado diferente das curvas, de número mínimo e máximo de máquinas capaz de atender cada geração programada horária para os

Capítulo IV – Resultados obtidos

diferentes valores de afluência no Rio Iguaçu, explica o número diferente de máquinas despachadas, 15, 16 e 17, quando a vazão pelo Rio Iguaçu é 1500, 6000 e 16000 m³/s, respectivamente, para atender toda a geração programada de 24 horas.

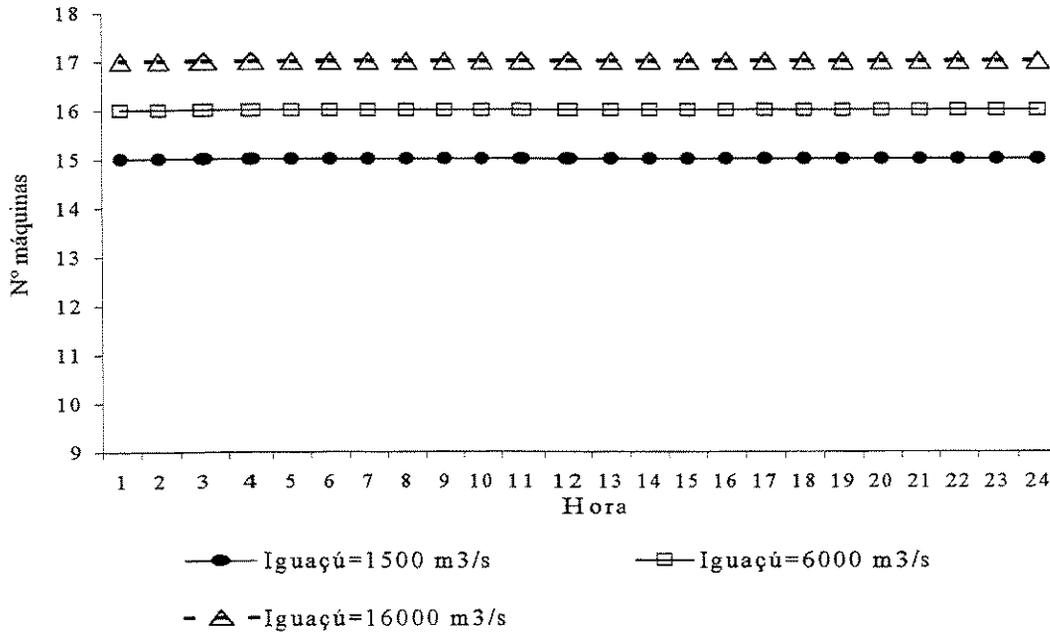


Figura 4.4 – Resultado da minimização de partidas e paradas para diferentes condições de afluência do Rio Iguaçu.

Na minimização de perdas, conforme está representado na **Figura 4.5**, o despacho de máquinas resultou com 12, 10 e 8 partidas e paradas, para os casos em que a vazão pelo Rio Iguaçu são 1500, 6000 e 16000 m³/s, respectivamente.

O total de perdas para os três objetivos de otimização é maior, quando a vazão pelo Rio Iguaçu é maior, conforme pode ser verificada na **Tabela 4.3**, que resume os resultados obtidos na otimização do despacho sob as três condições de vazões afluentes no Rio Iguaçu.

Os custos de cada partida ou parada e a energia perdida são os mesmos utilizados na seção 4.2.

4.4 – Avaliação da influência do valor do custo das partidas/paradas e do preço da energia perdida sobre o despacho.

Pela formulação da função objetivo do problema de otimização do despacho, espera-se que a variação dos valores de custos de energia ou partidas/paradas resultem em programas de despacho diferentes. Assim, se o custo das partidas/paradas aumentarem, resultará num

Hora	Demanda(MW)
1	8500
2	7800
3	7800
4	7800
5	7800
6	7800
7	8400
8	8600
9	8600
10	8600
11	8600
12	8600

Hora	Demanda(MW)
13	8600
14	8600
15	9350
16	9600
17	9600
18	9600
19	10200
20	10200
21	10200
22	10200
23	9200
24	7610

Tabela 4.4 – Dados para o estudo do efeito da variação dos custos de perdas, partidas e paradas.

Capítulo IV – Resultados obtidos

despacho com menor número de partida e paradas, até um valor em que o despacho resultante será igual a aquele que minimiza somente partidas/paradas. Da mesma forma, se o custo atribuído à energia for aumentando, será atingido um valor em que o resultado do despacho será igual a aquele que minimiza somente as perdas.

Para verificar o dito anteriormente, serão realizadas simulações da otimização do despacho, utilizando a série de geração programada especificada na Tabela 4.4 [18]. Os resultados da minimização de perdas, partidas e paradas, estão representados na Figura 4.6 e Tabela 4.5.

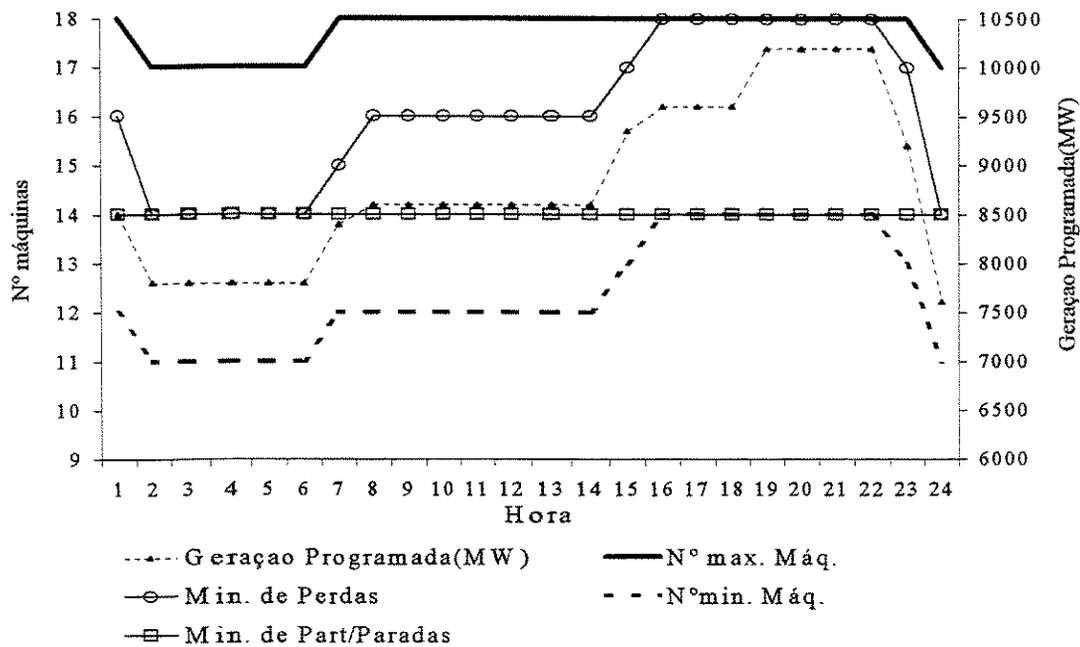


Figura 4.6 – Resultados da minimização de perdas, partidas e paradas.

Capítulo IV – Resultados obtidos

Custo partida ou parada (US\$)	Custo da energia perdida(US\$/MWh)	Número de partidas ou paradas	Total de perdas (MWh)
0	25	10	16080
2000	0	0	23780

Tabela 4.5 – Resumo da minimização de perdas e partidas/paradas.

Para o preço da energia igual a 25 US\$ e o custo das partidas/paradas começando em zero, será aumentado este custo com uma discretização de 100 US\$, até atingir o número de partidas/paradas igual ao que resulta da minimização das partidas e paradas.

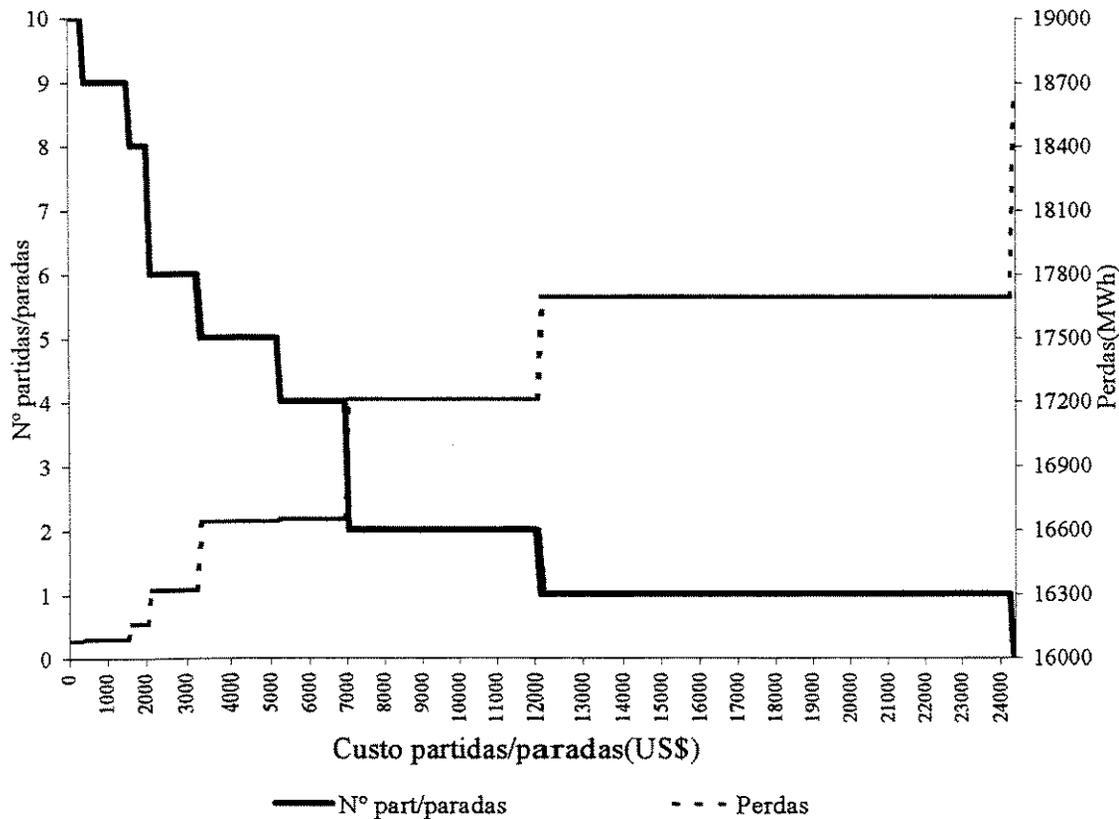


Figura 4.7 – Despacho com o custo de partida/parada variando.

A varredura da otimização resultou em que até um valor de 300 US\$ para o custo das partidas ou paradas, verifica-se um total de 10 partidas/paradas e perdas igual a 16080 MWh, isto é, prevalece o objetivo de minimização de perdas. Para o valor do custo na faixa de 400 a 1500 US\$, o despacho otimizado resulta com 9 partidas/paradas e perdas igual a 16090 MWh. Seguindo com o aumento do custo, chega-se ao ponto em que o objetivo de minimizar partidas/paradas prevalece totalmente sobre o objetivo de minimizar perdas, a partir de 24300 US\$ por partida ou parada, resultando em zero partidas e paradas e 18660 MWh em perdas, conforme pode ser constatada na **Figura 4.7**. A perda de 18660 MWh não corresponde ao resultado do despacho que minimiza partidas/paradas mostrado na **Tabela 4.5**. Essa diferença deve-se ao fato de que a perda apresentada na **Tabela 4.5** corresponde à minimização de partidas/paradas com despacho de 14 máquinas ao longo das 24 horas de geração programada, enquanto que 18660 MWh é a perda associada à minimização de partidas/paradas com 16 máquinas ao longo das 24 horas de geração programada. Esse resultado mostra a existência de múltiplas soluções para essa curva de geração programada, na minimização de partidas/paradas.

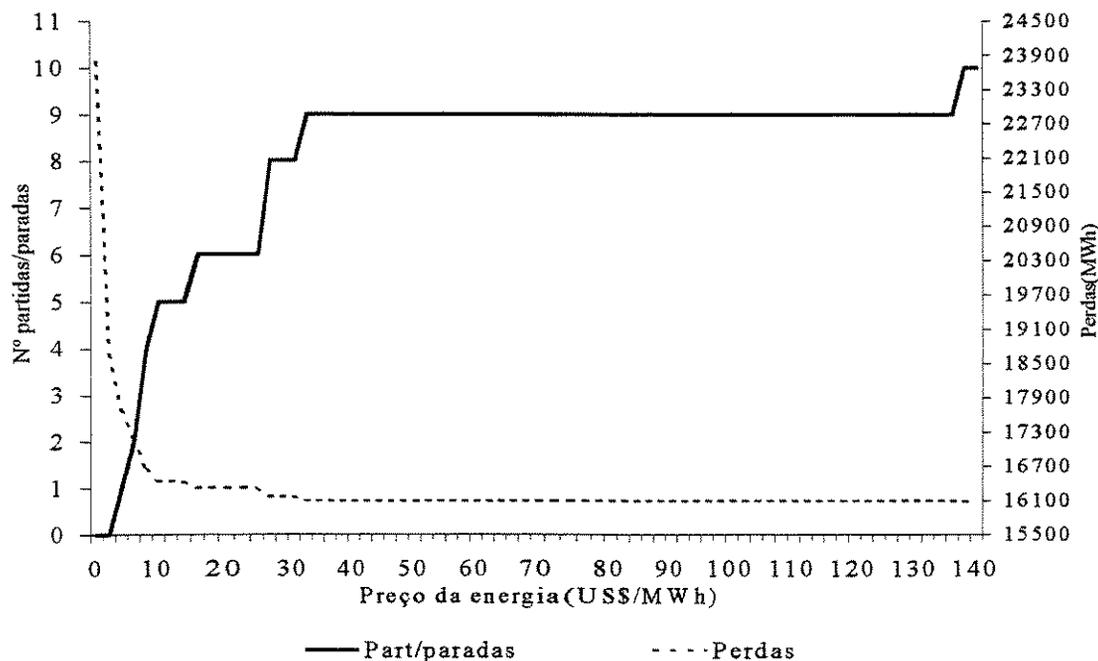


Figura 4.8 – Despacho com o preço da energia variando e custo de partida/parada igual a 2000 US\$.

Capítulo IV – Resultados obtidos

Da mesma forma, pode ser avaliado o efeito da variação do preço da energia sobre o despacho e as perdas. Fixado o custo de uma partida ou parada em 2000 US\$, o nível de perdas igual a 23780 MWh e preço de energia zero, que são os valores resultantes da minimização de partidas e paradas, aumenta-se o preço da energia. A otimização do despacho chegará a um nível de perdas correspondente à minimização de perdas.

Com o preço da energia variando de zero até 2 US\$/MWh a otimização do despacho resulta com zero partidas/paradas e perdas igual a 18660 MWh. A partir deste valor de energia o número de partidas/paradas começa a aumentar. O objetivo de minimizar as perdas prevalece totalmente sobre o objetivo de minimizar partidas/paradas somente a partir de um valor de energia igual a 138 US\$/MWh, resultando com 10 partidas/paradas e total de perdas igual a 16080 MWh, conforme pode ser verificado na **Figura 4.8**.

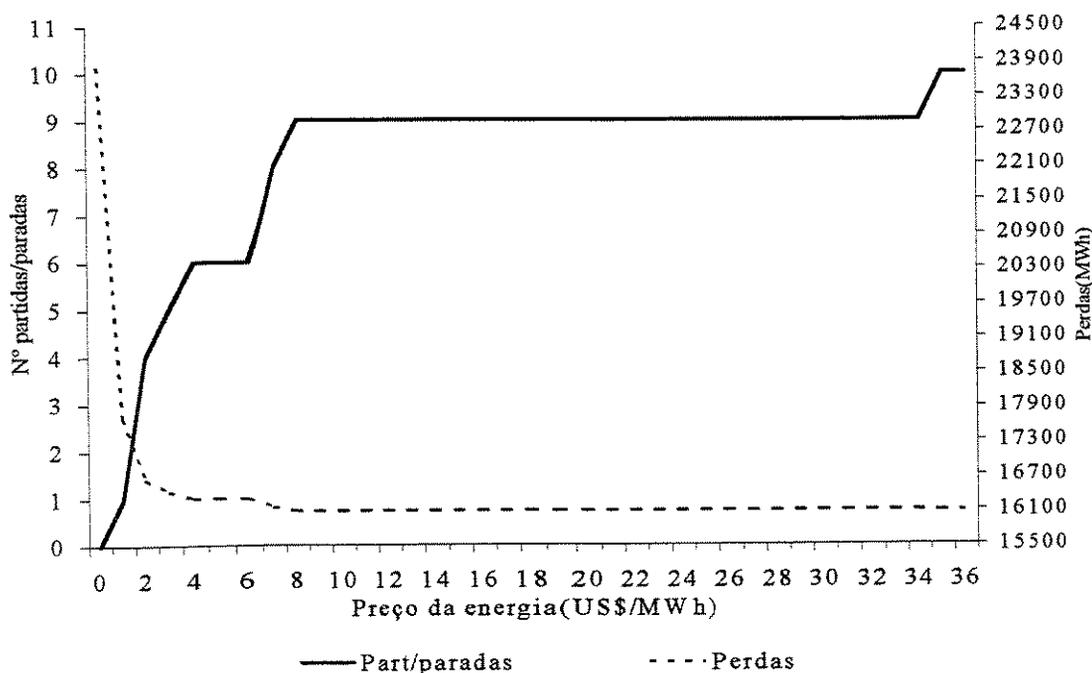


Figura 4.9 – Despacho com o preço da energia variando e o custo de partidas/paradas igual a 500 US\$.

Na **Figura 4.9** estão representadas as curvas de perdas e número de máquinas despachadas, que resultaram da otimização para diferentes preços de perdas e custo de partidas/paradas

igual a 500 US\$. Neste caso, o total de 10 partidas ou paradas, verifica-se para um valor de energia a partir de 35 US\$/MWh. O mesmo número de partidas/paradas foi atingido só a partir de 138 US\$/MWh, quando o custo de partidas/paradas é de 2000 US\$.

Os resultados apresentados nesta seção, mostram que para diferentes níveis de geração há diferentes níveis de perdas, neste sentido quanto maior é o nível de geração maiores são as perdas, conforme foram já mostradas nas curvas de perdas versus geração, no capítulo 2. Não é possível obter um resultado conclusivo, determinando qual dos custos prevalece para a definição do despacho de máquinas. Porém, uma usina que recebe um programa de geração, poderá adotar o critério de despacho que minimiza perdas somente após avaliar o benefício associado à economia de energia e os custos associados às partidas ou paradas. Portanto, será necessário principalmente conhecer o custo das partidas ou paradas das suas máquinas para uma decisão segura sobre qual despacho seguir.

4.5 – Um caso de aplicação verificado na usina de Itaipú.

A comercialização do serviço de eletricidade desta empresa baseia-se na venda da potência e não de energia. Assim, a Ande (Administración Nacional de Electricidad) do Paraguai e Furnas e Eletrosul do Brasil, contratam a compra de um valor de potência a ser fornecida pela binacional. A energia associada à potência contratada é definida por Itaipú, e depende da disponibilidade das suas máquinas para operação e das condições hidrológicas à montante e jusante da usina [16]. Portanto, do ponto de vista contratual, a minimização de perdas não traz benefícios imediatos para Itaipú. Porém, em circunstância em que a hidrologia em todo o sistema interligado é baixa, é importante adotar o despacho que minimize as perdas, para contribuir ao atendimento da demanda do sistema por energia. Nesta seção será apresentado um caso, que similarmente aos do item 4.2 e 4.4, foi verificado em condições de baixa hidráulicidade em Itaipú, ocasião em que foi adotado um despacho de máquinas para minimizar as perdas. Na **Figura 4.10** estão representados a curva de geração programada, a curva de geração realizada, a curva do despacho de

Capítulo IV – Resultados obtidos

máquinas que foi realizado e a curva de despacho de máquinas que Itaipú teria adotado, em condições normais [17]. A geração programada consiste numa série de valores horário de energia que a usina de Itaipú deverá produzir para atender a demanda das empresas compradoras. A geração realizada, consiste numa série de valores horários de energia que a usina efetivamente produziu. É freqüente verificarse diferença entre los valores da geração programada e a geração realizada, ocasionada à vezes por erros na previsão da carga, desligamento de equipamento do sistema elétrico, etc.

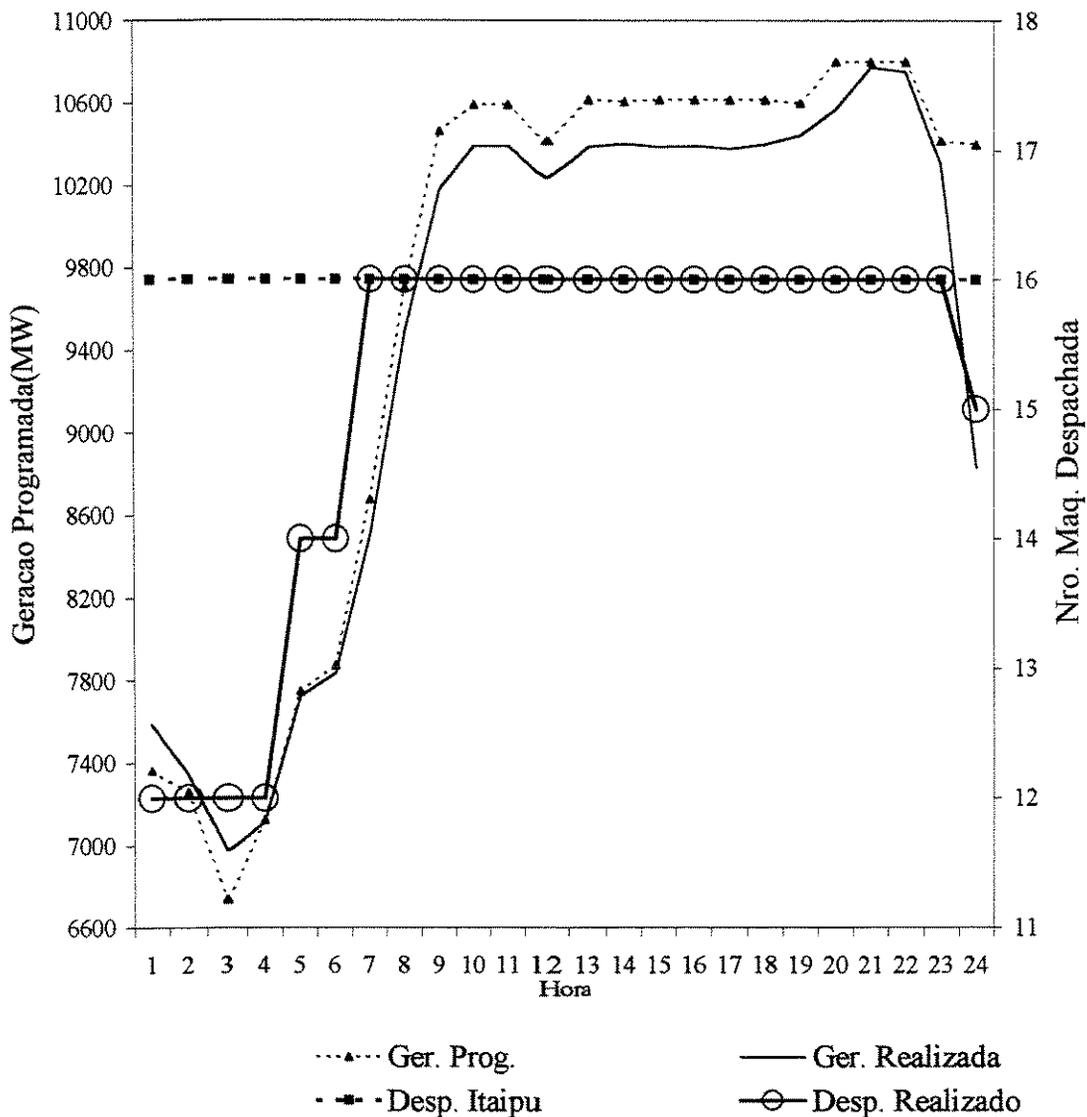


Figura 4.10 – Um caso verificado na usina de Itaipú.

Na **Tabela 4.6** estão resumidos os resultados deste caso.

A diferença entre a geração programada e realizada fica em torno de 200 MW na maior parte do dia, fechando esta diferença com um valor acima de 1500 MW.

	Perdas (MWh)	
	Despacho que mín. Perdas	Despacho que min. Part/paradas
Geração programada	24468	30806
Geração realizada	26257	27642
Número de part/paradas	5	0

Tabela 4.6 – Resumo dos resultados.

Tomando como referência a geração programada, o despacho que minimiza partidas e paradas, que Itaipú poderia ter adotado e o despacho que foi realizado para minimizar perdas, teria resultado numa diferença de 6338 MWh ou 264 MWmed diário. Porém, como foi apontado anteriormente, houve uma diferença entre a geração programada e a demanda realizada, resultando num total de perdas de 26257 MWh com o despacho de máquinas que minimiza perdas. A mesma geração realizada, com um despacho de máquinas que minimiza partidas e paradas teria resultado num total de perdas de 27642 MWh, comparado com os 26257 MWh da minimização de perdas, resulta em 1385 MWh ou 58 MWmed diário de diferença.

Estes resultados mostram a influência da variação da geração programada sobre os resultados e a necessidade de se fazer uma boa programação e de otimizar o pre-despacho do sistema elétrico interligado paraguaio-brasileiro, selecionando convenientemente que (quais) máquina(s) deve(m) fazer o acompanhamento da carga.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas com os casos estudados bem como aquelas obtidas após sua implementação prática na usina hidrelétrica de Itaipu. Serão também apresentadas sugestões de futuros trabalhos, no sentido de abranger outros aspectos relacionados a este assunto.

5.2 – Conclusões

Este trabalho abordou o problema do despacho de máquinas em usinas hidrelétricas, levando em consideração as diferentes variáveis que compõem a função de produção.

Numa primeira parte descreveu o comportamento destas variáveis e a metodologia para quantificar as perdas associadas a elas, tais como perdas ocasionadas pela elevação do nível de canal de fuga, perdas hidráulicas e perdas pela queda de rendimento do conjunto turbina gerador.

Após modeladas as perdas, numa segunda parte, foi formulado o problema do despacho como um problema de otimização. Os objetivos das formulações foram especificados para atender às necessidades que emergem na operação das usinas hidrelétricas, no que diz respeito ao despacho de máquinas para o atendimento da geração programada.

Foi utilizada técnica de programação dinâmica como ferramenta de otimização, onde a variável tempo (hora) foi adotada como variável de estágio, sendo as variáveis de estados o número de máquinas despachadas. As dimensões do espaço de estados foram determinadas através de um algoritmo que utiliza as faixas permitidas de operação das máquinas para definir o número mínimo e máximo de máquinas capazes de atender a geração programada horária.

Capítulo V – Conclusões

Além da programação dinâmica, o problema foi resolvido por técnica de fluxo em redes, utilizando o solver Cplex . A dificuldade encontrada para adotar essa técnica como ferramenta de otimização, foi a necessidade de um interface que permita gerar toda a formulação ao padrão adequado ao solver.

Foi implementada uma função objetivo para a otimização do despacho, minimizando perdas e partidas e paradas, para um dado valor de custo de partida ou parada e de energia.

Os estudos realizados, tomando como exemplo a usina hidrelétrica de Itaipú, apontam as seguintes conclusões [19]:

- As perdas associadas ao sistema de geração das usinas hidrelétricas são significativas e merecem serem consideradas no planejamento de curto prazo ou programação.
- A otimização do despacho que minimiza perdas resulta em frequentes partidas ou paradas.
- A otimização do despacho que minimiza partidas/paradas resulta em níveis de perdas significativas.
- Para determinar o despacho ótimo, do ponto de vista econômico, é fundamental determinar principalmente o quanto custa uma partida ou parada.
- O resultados apresentados apontam à necessidade de uma boa previsão nos valores da geração programada, devido a que um desvio acompanhado pela regulação primária, pode resultar na operação de um número de máquinas não indicado para minimizar perdas.
- As condições hidrológicas à jusante da usina de Itaipú são muito importantes pela sua influência no comportamento da altura do canal de fuga da usina.

Por último, o programa de despacho de máquinas foi implementado totalmente em Matlab 4.2, principalmente pela sua versatilidade. Qualquer programa de despacho de máquinas que venha a ser implementada para a sua utilização num Centro de Operação, deverá ser implementado numa linguagem computacional confiável e que permita sua interação com outros sistemas computacionais que operam em tempo real.

5.3 – Possíveis evoluções

A grande maioria das usinas hidrelétricas tem instaladas máquinas que caracteristicamente são iguais. Neste trabalho foi apresentado um modelo para otimizar o despacho de máquinas destas usinas. Existem porém, usinas que possuem máquinas de características diferentes. Para este tipo de problema, a premissa da distribuição equitativa da carga nas máquinas em operação, não será válida. Uma evolução do modelo seria considerar essa possibilidade.

Existem circunstâncias, que pelas condições do sistema elétrico, torna-se conveniente uma ou más máquinas esteja sincronizada ao sistema sem carga de potência ativa, apenas fornecendo suporte reativo. A evolução do modelo neste caso, seria considerar as perdas e os custos associadas a esta modalidade de operação.

O mesmo assunto pode ser considerado a nível de multi-usinas, onde uma análise de troca de geração programada entre usinas pode apontar importante benefício coletivo, em termos de minimização de perdas e partidas/paradas [20].

Referências Bibliográficas

- [1] - Soares, S., Ohishi, T., “Operação Econômica de Sistemas Hidrotérmicos” – CEAPO, Módulo 7, Unicamp, 1989.
- [2] - L.A.M. Fortunato e outros, “Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica”, Niterói: Universidade Federal Fluminense, EDFE, 1990.
- [3] - Rux, L. M., “An incremental economic dispatch method for cascaded hydroelectric power plants”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, pp. 1266-1273, August 1993.
- [4] - O. Nilsson, D. Sjelvgren, “Hydro unit start-up costs and their impact on the short term scheduling strategies of Swedish power producers”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, pp. 38-43, February 1997.
- [5] - T. P. Hara e outros, “Avaliação do tempo de vida restante das unidades geradoras da usina de GBM e aspectos técnicos e econômicos”, VI Encontro Regional Latino-americano da CIGRÉ, 28 de maio a 1 de junho de 1995, CE 39, Foz do Iguaçu-Paraná-Brasil.
- [6] - O. Nilsson, D. Sjelvgren, “Variable splitting applied to modeling of start-up costs in short term hydro generation scheduling”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, pp. 770-775, May 1997.
- [7] - Chao-an Li e outros, “Hydro unit commitment in hydro-thermal optimization”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, pp. 764-769, May 1997.

Capítulo V – Conclusões

- [8] - S. Soares, Salmazo, C., “Minimum loss predispatch model for hydroelectric power systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, nº 3, pp. 1220-1228, August 1997.
- [9] - Sousa, Zulcy de, “Centrais Hidro e Termelétricas”, São Paulo: Edgar Blücher, 1983.
- [10] - Schreiber, Gerhard Paul, “Usinas hidrelétricas”, São Paulo: Edgar Blücher, 1980.
- [11] - Itaipu Binacional, “The Itaipu hydroelectric project, 12600 MW, design and construction features”, december 1981.
- [12] – Clóvis Tadeu Salmazo, “Modelo de Otimização Eletro-energético de Curto Prazo (Pré-despacho) Aplicado ao Sistema Copel”, Tese de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica – Unicamp, março de 1997.
- [13] - Hillier, F.S.; Lieberman, G.F., ‘Introducción a la investigación operativa’, 3ª edición, Mc Graw-Hill, México, 1991.
- [14] - Taha, Hamdy A., ‘Investigación de operaciones’, 5ª edición, Ediciones Alfaomega, México, 1992.
- [15] - Denardo, Eric V., ‘Dynamic Programming’, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, U.S.A., 1982.
- [16] - El Tratado de Itaipú, Itaipú Binacional.
- [17] - Programa Diário de la Operación, OP.DT/OPS.DT/OPSP.DT, Itaipú Binacional, 08/12/98.

Capítulo V – Conclusões

[18] - Programa Diario de la Operación, OP.DT/OPS.DT/OPSP.DT, Itaipú Binacional, 06/12/98

[19] - Arce, A., Soares, S., Ohishi, T., “Optimización del despacho de máquinas en usinas hidroeléctricas”, VIII Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRÉ, 30 de mayo a 3 de junio de 1999, CE 39-10, Ciudad del Este-Paraguay.

[20] S. Soares, Arce, A., Ohshi, T., “Optimal scheduling of generating units in hydroelectric plants”, artigo sendo submetido ao IEEE.