

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Modelo de despacho ótimo com tratamento individual
de unidades geradoras em usinas hidrelétricas**

Autor: Glauber Renato Colnago
Orientador: Paulo de Barros Correia

09/2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

Modelo de despacho ótimo com tratamento individual de unidades geradoras em usinas hidrelétricas

Autor: Glauber Renato Colnago
Orientador: Paulo de Barros Correia

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2007
S.P. – Brasil

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

C713m	Colnago, Glauber Renato Modelo de despacho ótimo com tratamento individual de unidades geradoras em usinas hidrelétricas / Glauber Renato Colnago. --Campinas, SP: [s.n.], 2007. Orientador: Paulo de Barros Correia Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1. Energia hidrelétrica. 2. Otimização matemática. 3. Usinas hidrelétricas. 4. Turbinas hidráulicas. I. Correia, Paulo de Barros. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.
-------	---

Título em Inglês: Optimal dispatch model with individual treatment of generating units in hydroelectric plants

Palavras-chave em Inglês: Optimal dispatch, Hydroelectric generating, Mathematical optimization

Área de concentração:

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Takaaki Ohishi e Sérgio Valdir Bajay

Data da defesa: 02/02/2007

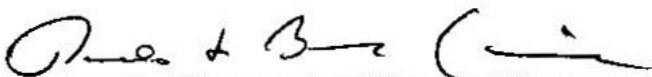
Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

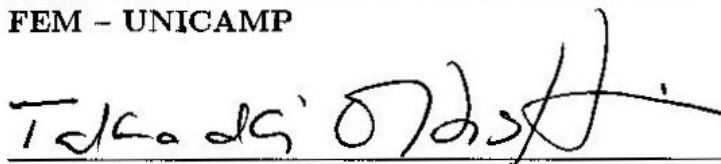
Modelo de despacho ótimo com tratamento individual
de unidades geradoras em usinas hidrelétricas

Autor: Glauber Renato Colnago

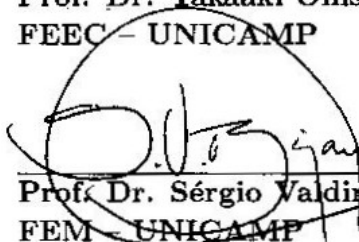
Orientador: Dr. Paulo de Barros Correia



Prof. Dr. Paulo de Barros Correia, Presidente
FEM - UNICAMP



Prof. Dr. Takaaki Ohishi
FEEC - UNICAMP



Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay
FEM - UNICAMP

Campinas, 02 de fevereiro de 2007

Aos meus pais
Mário e Adelaide
e às minhas irmãs
Elisângela e Gláucia

Agradecimentos

Aos meus pais Mário Colnago e Adelaide Sotocorno Colnago e às minhas irmãs Elisangela Aparecida Colnago e Glaucia Andreia Colnago pelo apoio; ao professor Paulo de Barros Correia pela sábia orientação; às pessoas que me deram força e alegria no período do mestrado, em especial, Camila, Juan, Liz, Pacho, Duvier, Sebastián, Germán; ao colegas de trabalho da sala IE 301 que sempre estavam dispostos a me ajudar: Carla, Rodrigo, Letícia, Daniela, Fernando; aos professores Takaaki e Bajay pelas críticas oportunas no exame de qualificação; ao João Paulo Estrócio pela grande ajuda com os esclarecimentos que vieram a enriquecer este trabalho; ao pessoal do Departamento de Energia (colegas, funcionários e professores); ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Resumo

Colnago, G. R. (2007). *Modelo de despacho ótimo com tratamento individual de unidades geradoras em usinas hidrelétricas*. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - Brasil.

Os modelos de despacho ótimo atuais em usinas hidrelétricas (UHEs) são realizados tendo em conta as eficiências das unidades geradoras (UGs) obtidos com a extrapolação dos dados de um modelo em escala reduzida das turbinas. Uma extrapolação dos dados do modelo para o protótipo realizada com grande precisão poderia ser feita se houvesse semelhança dinâmica, geométrica e cinemática entre eles. Como isto é impossível, os fabricantes de turbinas possuem relações empíricas para corrigir as eficiências medidas no modelo para refletirem melhor o desempenho do protótipo. Apesar desta correção, o desempenho real das turbinas pode ser afetado por características construtivas ou operacionais das UHEs, não levadas em conta pelos fabricantes, e pode variar com o tempo de uso de uma forma diferente para cada UG de uma UHE. Logo, as eficiências das turbinas reais não são iguais às eficiências extrapoladas do modelo em escala reduzida e, sob esta ótica, um modelo de despacho realizado com as curvas de eficiência derivadas do modelo reduzido provavelmente não otimiza a eficiência de uma UHE. Pode-se obter dados de eficiência mais precisos (atualizados) das UGs instaladas com o auxílio de métodos de medição de vazão da água nos condutos forçados das UGs. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de despacho ótimo em UGs de UHEs que trata individualmente as UGs, pois as mesmas possuem, provavelmente, curvas diferentes quando se trata dos dados atualizados. A formulação matemática do modelo de despacho ótimo proposto é não linear inteiro misto e não convexo e foi utilizado o programa *Lingo 8.0* para sua resolução, com buscas global e local. Os melhores resultados foram obtidos com a busca global. Foi realizado o despacho com os dois tipos de dados, os derivados do modelo reduzido e os atualizados de uma UHE real. Na simulação com dados atualizados chegou-se a ganhos entre 0,34% até 0,99% na operação da UHE, em comparação com a simulação com os dados derivados do modelo reduzido. Estas quantias significam, em valores monetários, entre R\$ 700 mil e R\$ 2 milhões anuais (para R\$ 50/MWh). Os custos para a obtenção dos dados atualizados no caso em estudo foi quase nulo, no entanto, mesmo que utilizados métodos mais precisos para medição de vazão, que possuem um custo associado, este trabalho indica uma relação baixo custo e alto benefício para a utilização dos dados atualizados obtendo-se o retorno em poucos meses do capital investido.

Palavras-chave: *energia hidrelétrica, otimização matemática, usinas hidrelétricas, turbinas hidráulicas*

Abstract

Colnago, G. R. (2007). *Optimal dispatch model with individual treatment of generating units in hydroelectric plants* Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - Brasil.

Currently used models for optimal dispatch in hydro plants (HP) are based on generation units (GU) efficiency extrapolated from the reduced scale turbine data. An extrapolation from the reduced model data to obtaining real prototype data with excellent precision could occur only if dynamical, geometrical and kinematical similarity between prototype and reduced model would exist. As this is impossible, turbine manufacturers use empirical relations to correct model efficiency in order to reflect in a better way the prototype efficiency. Despite this correction, the turbines' real performance can be affected by HPs' constructive and operational characteristics, not taken into account by manufacturers; therefore, the real turbine efficiency in a specific GU is not similar to the one obtained from the reduced model by means of extrapolation. Considering this, optimal dispatch using extrapolated reduced model's efficiency data will probably not optimize the HP's efficiency. More exact efficiency data from the installed GU's can be obtained by means of water discharge measurements in penstocks. There was developed a dispatch model in GUs of HPs that treat GUs individually because, probably, their efficiency curves are different. The proposed dispatch model is a mixed integer nonlinear mathematical formulation. The software used to solve the problem was Lingo 8.0, with global and local searches. Better results were obtained when using global search. This work presents a simulation of optimal dispatch using both kind of data: the extrapolated from the reduced model, and the more detailed data. The simulation that uses the more detailed data from a real HP permitted a gain between 0.34 and 0.99% compared to the one that uses reduced scale model data. These amounts, converted to monetary values, represent between R\$700 thousand and R\$2 million per year (for a tariff of 50 R\$/MWh). The costs for obtaining the more detailed data used in this work are almost null. This work shows the introduction of more precise measurement techniques in GUs implies investments that can rapidly returned.

Key Words: *hydroelectric power generating, mathematical optimization, hydroelectric plants, optimal dispatch*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	1
1.2	Trabalhos relacionados ao despacho ótimo	4
1.3	Objetivos	6
1.4	Estrutura do trabalho	9
2	Apresentação do problema de despacho ótimo	11
2.1	Elementos de usinas hidrelétricas	11
2.2	Despacho ótimo de unidades geradoras	13
2.3	Reserva girante	14
2.4	Zonas proibidas de operação	15
2.5	Eficiência dos conjuntos turbina-gerador	16
2.6	Eficiência de projeto	17
2.7	Eficiências atualizadas das unidades geradoras	20
2.8	Influência das curvas de eficiência nas condições de otimalidade	22
3	Formulação matemática do problema	30
3.1	Variáveis e constantes	30
3.2	Função objetivo	31
3.3	Restrições	33
3.4	Formulação matemática	37
3.5	Técnicas de solução	38
3.5.1	Método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG)	38
3.5.2	Método de <i>Branch and Bound</i> (B&B)	40
3.5.3	Busca global	43
4	Tratamento dos dados de eficiência	45
4.1	Introdução	45
4.2	Método dos Mínimos Quadrados	46
4.3	Condições para pontos específicos	46
4.4	Medidas de análise de ajuste	48
4.5	Tratamento dos dados de uma hidrelétrica real	49
4.5.1	Dados de eficiência	49

4.5.2	Transposição de dados para alturas de queda diferentes	50
4.5.3	Ajustes polinomiais dos dados	52
5	Resultados	62
5.1	Introdução	62
5.2	Buscas local e global	63
5.3	Resultados obtidos com os ajustes	67
5.3.1	Ajuste 1	73
5.3.2	Ajuste 2	76
5.4	Ganhos em um dia de operação	78
5.5	Número de unidades geradoras ativas	81
6	Conclusões e sugestões de continuidade	83
6.1	Conclusões	83
6.2	Sugestões de continuidade	84
	Referências Bibliográficas	86
A	Tabelas do despacho	89

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de fluxo da modelagem	8
2.1	Vista lateral de uma UHE	12
2.2	Curva colina das UGs da UHE Xingó	17
2.3	Curvas de perdas de UGs de uma UHE real	24
2.4	Gerações com perdas marginais iguais	24
2.5	Gerações com perdas marginais iguais	25
2.6	Curva de perdas convexa	28
2.7	Total de perdas da UHE Xingó com altura de queda de 119m	29
3.1	Região factível para as variáveis de uma UG	35
3.2	Representação gráfica das restrições – região factível coincide com a restrição de demanda dentro do retângulo	36
3.3	Representação gráfica das restrições – infactibilidade	36
3.4	Árvore de Enumeração Binária	42
4.1	Dados de eficiência da UG 4 para $H = 20,4\text{ m}$ e transpostos para $H = 24,8\text{ m}$	51
4.2	Curvas de eficiência da UG 1	55
4.3	Curvas de eficiência da UG 1 – aproximação à região de maiores eficiências	55
4.4	Curvas de eficiência da UG 2	56
4.5	Curvas de eficiência da UG 2 – aproximação à região de maiores eficiências	56
4.6	Curvas de eficiência da UG 3	57
4.7	Curvas de eficiência da UG 3 – aproximação à região de maiores eficiências	57
4.8	Curvas de eficiência da UG 4	58
4.9	Curvas de eficiência da UG 4 – aproximação à região de maiores eficiências	58
4.10	Curvas de eficiência da UG 5	59
4.11	Curvas de eficiência da UG 5 – aproximação à região de maiores eficiências	59
4.12	Curvas de eficiência da UG 6	60
4.13	Curvas de eficiência da UG 6 – aproximação à região de maiores eficiências	60
4.14	Eficiência de projeto	61
5.1	Comparação dos resultados das buscas local e global	64
5.2	Resultados das buscas local e global – Ajuste 1	65
5.3	Resultados das buscas local e global – Ajuste 2	66
5.4	Diferença das eficiências obtidas com buscas global e local	67

5.5	Eficiências $\underline{NP}$ e $\underline{NP}^*$ – Ajuste 1	70
5.6	Eficiências $\underline{NP}$ e $\underline{NP}^*$ – Ajuste 2	70
5.7	Comparação dos resultados com buscas local e global	71
5.8	Eficiências NA obtidas com os ajustes 1 e 2	72
5.9	Diferença entre NA dos ajustes 1 e 2	72
5.10	Eficiências NA , $\underline{NP}^*$ e $\overline{NP}$ – Ajuste 1	74
5.11	Diferença entre NA e $\underline{NP}^*$, NA e $\overline{NP}$ – Ajuste 1	74
5.12	Eficiências NA , $\underline{NP}^*$ e $\overline{NP}$ – Ajuste 2	76
5.13	Diferença entre NA e $\underline{NP}^*$, NA e $\overline{NP}$ – Ajuste 2	77
5.14	Eficiências aparente e atualizadas em um dia de operação – Ajuste 1	79
5.15	Eficiências aparente e atualizadas em um dia de operação – Ajuste 2	79
5.16	Número de UGs ativas em função da geração	82

Lista de Tabelas

4.1	Dados atualizados de eficiência	50
4.2	Dados de eficiência de projeto ($H = 24,8 m$)	50
4.3	Dados de eficiência da UG 4 transpostos para $H = 24,8 m$	51
4.4	Valores de máxima eficiência e suas respectivas potência (dados e curva do Ajuste 1)	53
4.5	Medidas de erro e ajuste dos dados atualizados das UGs	54
5.1	Histórico de demanda criado para um dia de operação da UHE	78
5.2	Energias brutas e eficiências em 1 dia de operação – Ajuste 1	80
5.3	Ganhos com NA em comparação com as NP 's em 1 dia de operação – Ajuste 1	80
5.4	Energias brutas e eficiências em 1 dia de operação – Ajuste 2	80
5.5	Ganhos com NA em comparação com as NP 's em 1 dia de operação – Ajuste 2	80
A.1	Eficiências aparente (NP_{ap}) e configurações de UGs (XP) [1/2]	90
A.1	Eficiências aparentes (NP_{ap}) e configurações de UGs (XP) [2/2]	91
A.2	Eficiências NA (busca global) e configurações de UGs (XA) – Ajuste 1 [1/2]	92
A.2	Eficiências NA (busca global) e configurações das UGs (XA) – Ajuste 1 [2/2]	93
A.3	Eficiências NAL (busca local) e configurações de UGs (XAL) – Ajuste 1 [1/2]	94
A.3	Eficiências NAL (busca local) e configurações das UGs (XAL) – Ajuste 1 [2/2]	95
A.4	Eficiências $\overline{NP}$ e configurações – Ajuste 1 [1/2]	96
A.4	Eficiências $\overline{NP}$ e configurações – Ajuste 1 [2/2]	97
A.5	Eficiências $\underline{NP}$ e configurações – Ajuste 1 [1/2]	98
A.5	Eficiências $\underline{NP}$ e configurações – Ajuste 1 [2/2]	99
A.6	Eficiências $\underline{NP}^*$ e configurações – Ajuste 1 [1/2]	100
A.6	Eficiências $\underline{NP}^*$ e configurações – Ajuste 1 [2/2]	101
A.7	Eficiências aparente e atualizadas – Ajuste 1 [1/2]	102
A.7	Eficiências aparente e atualizadas – Ajuste 1 [2/2]	103
A.8	Eficiências NA (busca global) e configurações de UGs (XA) – Ajuste 2 [1/2]	104
A.8	Eficiências NA (busca global) e configurações das UGs (XA) – Ajuste 2 [2/2]	105
A.9	Eficiências NAL (busca local) e configurações de UGs (XAL) – Ajuste 2 [1/2]	106
A.9	Eficiências NAL (busca local) e configurações das UGs (XAL) – Ajuste 2 [2/2]	107
A.10	Eficiências $\overline{NP}$ e configurações – Ajuste 2 [1/2]	108
A.10	Eficiências $\overline{NP}$ e configurações – Ajuste 2 [2/2]	109
A.11	Eficiências $\underline{NP}$ e configurações – Ajuste 2 [1/2]	110
A.11	Eficiências $\underline{NP}$ e configurações – Ajuste 2 [2/2]	111

A.12 Eficiências $\underline{NP^*}$ e configurações – Ajuste 2 $[1/2]$	112
A.12 Eficiências $\underline{NP^*}$ e configurações – Ajuste 2 $[2/2]$	113
A.13 Eficiências aparente e atualizadas – Ajuste 2 $[1/2]$	114
A.13 Eficiências aparente e atualizadas – Ajuste 2 $[2/2]$	115

Capítulo 1

Introdução

1.1 Justificativa

As bacias hidrográficas e seus rios por todo o Brasil tornam o País uma fonte de recursos hídricos abundantes. Este potencial é aproveitado na geração de eletricidade através das aproximadamente 140 usinas hidrelétricas (UHEs) instaladas por todas as Regiões brasileiras e que, segundo dados da ANEEL (2005) para setembro de 2003, contribuem com quase 80% – 66 GW – de toda a capacidade instalada de geração de eletricidade do País.

Entre as UHEs espalhadas pelo País, com maior concentração na bacia do rio Paraná (pouco menos de 60% da capacidade hidrelétrica instalada no País), existem UHEs responsáveis por grandes gerações como por exemplo a UHE Itaipú Binacional, que conta com uma capacidade instalada de 12.600 *MW* (6.300 *MW* do Brasil e a outra metade do Paraguai), as Tucuruí I e II com capacidade de 8.125 *MW*, a UHE de Ilha Solteira com 3.444 *MW*, a UHE de Xingó com 3.162 *MW* e mais de 20 outras UHEs com capacidades maiores que 1.000 *MW* cada uma.

Mesmo com tal abundância de recursos hídricos, durante o chamado Apagão, em 2001, quando, por conta de má administração do Sistema Elétrico Brasileiro juntamente com um

período de seca os níveis dos reservatórios das UHEs baixaram, forçando a população a diminuir o consumo de energia elétrica. Este incidente mostra a importância do planejamento da expansão e da operação, de modo a obter um ótimo aproveitamento dos recursos energéticos.

A cadeia de planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro consiste, basicamente, em planejamento a longo e a médio prazos, bem como a programação de curto prazo e a operação em tempo real. O horizonte do planejamento de longo prazo é de vários anos com discretização mensal. Neste planejamento, determinam-se as gerações de energia hidrelétrica e termelétrica de modo a minimizar o custo esperado da operação, considerando-se as incertezas das afluências futuras.

No planejamento de médio prazo, determina-se a política de geração de cada usina admitindo-se as características do sistema de transmissão, os limites de geração de cada usina e as metas determinadas pelo planejamento de longo prazo. Esta alocação da geração entre as usinas em um período anual, com uma discretização semanal, visa minimizar os custos operacionais do sistema ao longo de todo o período considerado.

Na programação de curto prazo e operação em tempo real são introduzidas características mecânicas das unidades geradoras (UGs) dentro de uma UHE e a representação matemática das restrições operativas é mais detalhada. Na programação de curto prazo, o horizonte de operação é semanal com discretização diária. Uma outra categoria de programação é a diária, que possui discretização horária.

Já no despacho ótimo, determina-se uma configuração de UGs vigente para um período de tempo que pode ser de 30 minutos ou 1 hora e, após este período, a configuração é modificada de acordo com as novas condições da UHE. As configurações ótimas de UGs são obtidas através de técnicas de otimização, obedecendo às restrições e características operativas das UGs e visam maximizar a produtividade da geração de energia elétrica.

Dentre as características das UGs tem-se a eficiência, que é apontada por Soares e Salmazo (1997) como o principal fator no desempenho da geração de eletricidade em uma hidrelétrica. Extrapolam-se tais dados de eficiência de um modelo em escala reduzida das turbinas reais com o qual realizam-se medidas de eficiência. Estes dados extrapolados são adotados para todas as UGs que, teoricamente, comportam-se de maneira idêntica. Se houvesse semelhança geométrica, cinemática e dinâmica entre o modelo e o protótipo, os valores de eficiência medidos para o modelo também se unificariam no protótipo. Como, na realidade, não se consegue reproduzir estas três condições de semelhanças entre modelo e protótipo, todo fabricante possui relações empíricas que permitem estimar, com uma razoável precisão, valores de eficiência para o protótipo, a partir de medições feitas com o modelo.

Apesar desta correção feita pelos fabricantes, o desempenho real das turbinas pode ser afetado por características construtivas ou operacionais das UHEs, não levadas em conta pelos fabricantes, e pode variar com o tempo de uso de uma forma diferente para cada UG de uma UHE.

Pode-se supor, então, que uma UHE operando segundo a otimização realizada com as eficiências derivadas de um modelo em escala reduzida não está otimizando sua geração, visto que dados mais precisos (atualizados), medidos diretamente nas UGs, podem ser calculados.

As gerações das UHEs do Sistema Interligado Nacional são otimizadas considerando os dados de eficiência extrapolados do modelo em escala reduzida, indicando, assim, que a operação das UHEs do País provavelmente são deficientes.

Uma operação deficiente de uma UHE pode ocasionar perdas econômicas e de recursos significativas. À quisa de exemplo, considera-se uma UHE que opera com uma demanda média de 1.000 *MW* operando segundo a otimização realizada com os dados obtidos com o modelo reduzido. Suponha-se que um ganho de eficiência de 0,5% poderia ser obtido se

fossem utilizados dados atualizados ao invés dos retirados do modelo em escala reduzida. Este ganho de eficiência se refere a mais de 5 *MW* não aproveitados. Considerando o preço do *MWh* na média de R\$ 50,00, a UHE estaria deixando de ganhar mais de R\$ 2.190.000 anuais (considerando 8.760 horas de operação no ano) – uma quantia bastante considerável de dinheiro.

A utilização de dados mais precisos de eficiência é uma abordagem inovadora no despacho ótimo de UGs e as consequências da utilização de um despacho assim pode trazer economias que são de interesse das empresas geradoras de energia hidrelétrica. Ademais, a utilização mais eficiente dos recursos hídricos para geração de eletricidade é importante no intuito de diminuir a necessidade de construção de mais usinas para o atendimento da demanda crescente.

1.2 Trabalhos relacionados ao despacho ótimo

Nos últimos anos o problema de despacho de UGs em UHEs tem sido vastamente estudado, mas, apesar do grande número de trabalhos sobre o tema, são escassos, senão inexistentes, os trabalhos que abordam despacho com eficiências medidas diretamente nas UHEs – “dados atualizados”. Tal é a escassez que, na bibliografia consultada para esta dissertação, não foram encontrados trabalhos sobre o tema.

O fato de utilizar dados atualizados tornam o problema mais difícil, ou trabalhoso computacionalmente, de ser resolvido, visto que cada UG deve ser tratada de forma individualizada. Isto reflete em um problema de escolha de UGs, ao invés de refletir na determinação da quantidade de UGs (o que geralmente ocorre quando utilizam-se dados de eficiência extrapolados do modelo em escala reduzida) que devem ser despachadas.

Diversos métodos e técnicas são utilizados na resolução do problema de despacho, tais

quais programação dinâmica, programação não linear e buscas heurísticas, além da programação linear inteira mista e da programação não linear inteira mista.

Encina (2006) utiliza para o despacho programação dinâmica e relaxação lagrangeana. Foram utilizadas 16 UHEs (100 UGs) e o problema foi dividido em dois subproblemas denominados despacho das unidades e despacho de geração. O primeiro trata de um problema de escolha da configuração de UGs, mais precisamente o número de UGs que estarão gerando em cada UHE, considerando-se que as UGs são consideradas idênticas dentro de uma mesma UHE. Neste subproblema utiliza-se programação dinâmica, visando a minimização dos custos referentes ao número de partidas e paradas das UGs¹ e dos custos das perdas hidráulicas. Para o despacho da geração já está pré-estabelecido o despacho das unidades, ou seja, o número de UGs ativas em cada UHE. Utiliza-se, então, a relaxação lagrangeana para otimizar a geração entre as UGs definidas. A aplicação dos dois despachos se dá iterativamente, até que se obtenha a solução ótima do problema. As curvas que representam as perdas das UGs são convexas, garantindo que o ótimo encontrado seja global, conforme explicado no Capítulo 2.

Faria *et al.* (1993) fizeram uso da programação linear inteira mista para a otimização da operação de UHEs. O método de solução é o *Branch and Bound*, com busca em profundidade. Neste modelo foi utilizada uma função custo de despacho, que é linear por partes, considerando-se características hidromecânicas e rendimentos das UGs. Os resultados foram obtidos para as UHEs de São Simão e Foz do Areia.

Finardi e Silva (2005) desenvolveram um problema de natureza inteira e não linear para despacho. Foram consideradas diversas faixas de operação para cada UG. As variáveis inteiras (binárias) do modelo indicam em qual das faixas de operação uma UG irá trabalhar.

¹Nilsson e Sjelvgren (1997) realizaram um estudo, no qual tentaram quantificar o custo associado ao número de partidas e paradas das UGs hidráulicas considerando um fator que envolvesse custos. Os estudos indicaram os custos para cada partida e parada em 3 US\$/MW vezes a capacidade nominal da UG.

Uma técnica baseada no método de *Branch and Bound* foi utilizada para encontrar as combinações de variáveis inteiras que garantiriam soluções factíveis. Para cada uma destas combinações resolveu-se o problema não linear resultante, através do método do gradiente projetado, para que fosse escolhida a melhor destas combinações. Uma particularidade próxima o modelo de despacho desta dissertação com o proposto por Finardi e Silva (2005), que é o fato de que as UGs são tratadas individualmente, o que torna o modelo apto para otimizar a geração, considerando as UGs como sendo não idênticas dentro de uma mesma UHE.

No trabalho realizado por Santos (2001), o modelo de despacho foi também dividido em dois subproblemas, a saber, despacho da geração e despacho das unidades, visando minimizar os custos das partidas e paradas das UGs e os custos das perdas hidráulicas. Assim como Encina (2006), o despacho da geração foi resolvido via relaxação lagrangeana. Já o despacho das unidades foi realizado, utilizando-se algoritmos genéticos. Esta técnica é utilizada para a fixação das variáveis inteiras. Para cada configuração factível de variáveis inteiras resolveu-se o despacho de geração. O processo foi repetido até que fosse atingido o critério de parada, que neste caso era o número de iterações – não sendo garantida a obtenção de um ótimo global. O autor conclui, neste trabalho, que a minimização das perdas hidráulicas é mais importante que a minimização das perdas por partidas e paradas.

1.3 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é comparar as eficiências totais de uma UHE, obtidas realizando o despacho com eficiências obtidas a partir de um modelo reduzido – que foram chamados dados de projeto – e com dados atualizados. Estes últimos são calculados através de medições de vazões d’água no conduto forçado, canal que leva a água do reservatório para ser turbinada. As eficiências totais, para serem comparadas, são analisadas sob a ótica dos dados atualizados e, então, realizam-se estimativas de ganhos econômicos quando utiliza-se

o despacho mais eficiente ao invés do menos eficiente.

Os objetivos específicos são o desenvolvimento de um modelo de despacho que leva em conta as características individuais de cada UG, bem como o tratamento dos dados de eficiência, através de ajustes polinomiais.

O problema de programação matemática abordado nesta dissertação é de natureza não linear inteira mista e, para sua resolução, utiliza-se um programa comercial, o *Lingo* 8.0. Para o tratamento dos dados, utiliza-se, basicamente, o método dos mínimos quadrados (MMQ) e imposições de condições para alguns pontos, como interpolação e derivada nula.

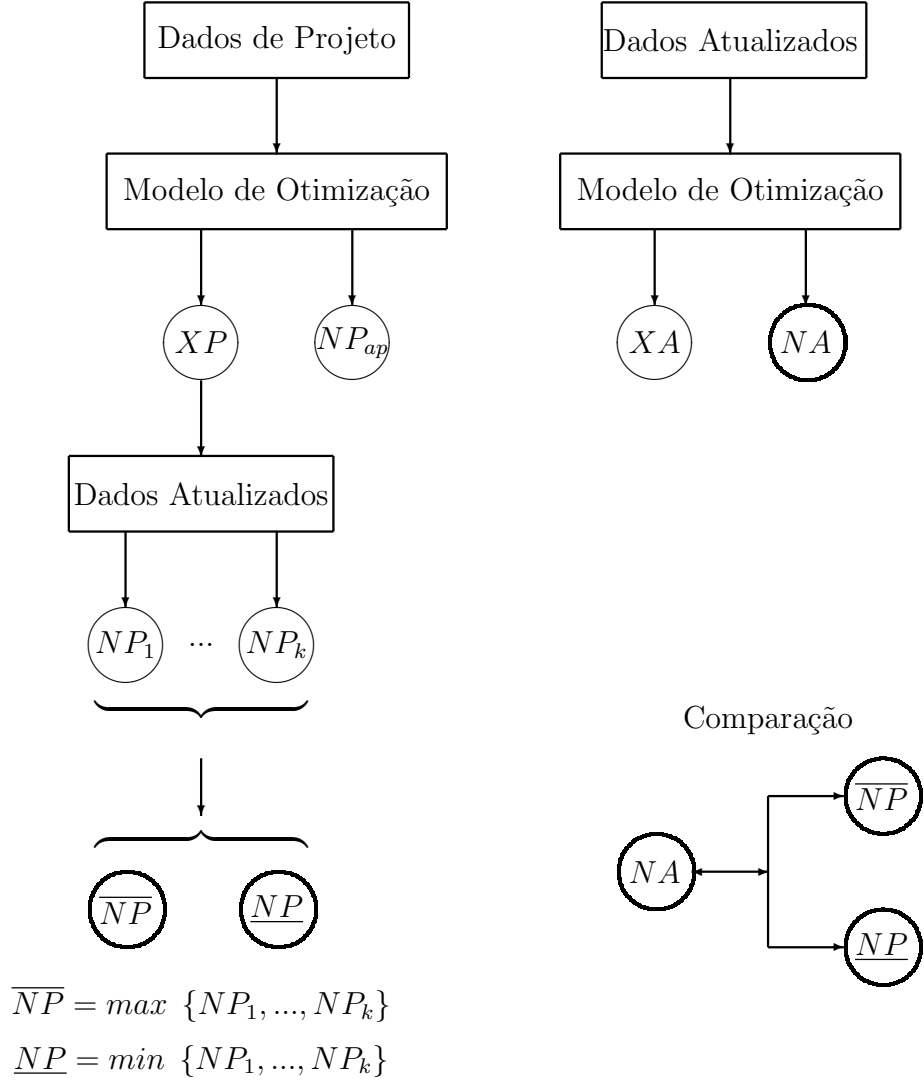


Figura 1.1: Diagrama de fluxo da modelagem

O diagrama de fluxo da modelagem que foi estabelecido para se atingir o objeto do trabalho pode ser visualizado na Figura 1.1, no qual o modelo de otimização exemplificado é o modelo de despacho. São utilizados os dados de projeto das UGs e, com eles, a resposta do modelo de otimização é uma configuração de UGs XP e o valor de eficiência global da UHE NP_{ap} . É importante ressaltar que a eficiência NP_{ap} é embasada nos dados de projeto e este valor não será utilizado na comparação. XP indica apenas o número de UGs ativas e

a geração, independentemente de quais forem as UGs.

A configuração XP é, então, introduzida nos dados atualizados para verificação da eficiência global da UHE relacionada. Para cada combinação de UGs ativas na configuração XP a eficiência global é diferente. Por exemplo, se XP determina a geração de 3 UGs, ao tomar-se uma combinação que considera as UGs 1, 2 e 3 ativas, haverá um valor NP_j de eficiência global da UHE associado; e, tomando-se uma combinação das UGs 1,3 e 4, será outro o valor de eficiência global. Na figura 1.1, os valores $NP_1, NP_2, \dots, NP_k$ indicam as eficiências globais da UHE referentes a todas as combinações de UGs que podem ser obtidas com a configuração XP . Isto é melhor explicado com um exemplo numérico no Capítulo 5. Dentre todas as eficiências obtidas, tomam-se os valores máximo ($\overline{NP}$) e mínimo ($\underline{NP}$).

Paralelamente, realiza-se o despacho com os dados atualizados, obtendo-se uma configuração de UGs XA e uma eficiência global NA da UHE. O valor NA é comparado com $\underline{NP}$ e $\overline{NP}$. É razoável esperar que $NA \geq \overline{NP}$ (e $NA \geq \underline{NP}$ pois $\overline{NP} \geq \underline{NP}$) quando as soluções encontradas são consistentes.

1.4 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 descreve os principais elementos das UHEs, além das restrições e características operativas das UGs. Também apresenta-se como são (ou podem ser) obtidos os dados de eficiência das UGs. Além disto, discutem-se as condições de otimalidade e como a natureza das curvas de eficiência podem influenciar o atendimento de tais condições.

O Capítulo 3 apresenta a formulação matemática do problema de despacho: função objetivo, restrições e variáveis envolvidas. Descrevem-se, brevemente, as técnicas utilizadas pelo programa *Lingo 8.0* para a resolução do problema.

No Capítulo 4 apresenta-se o tratamento (ajustes polinomiais) dos dados de eficiência e a teoria utilizada para tal.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e análises, e finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões de continuidade.

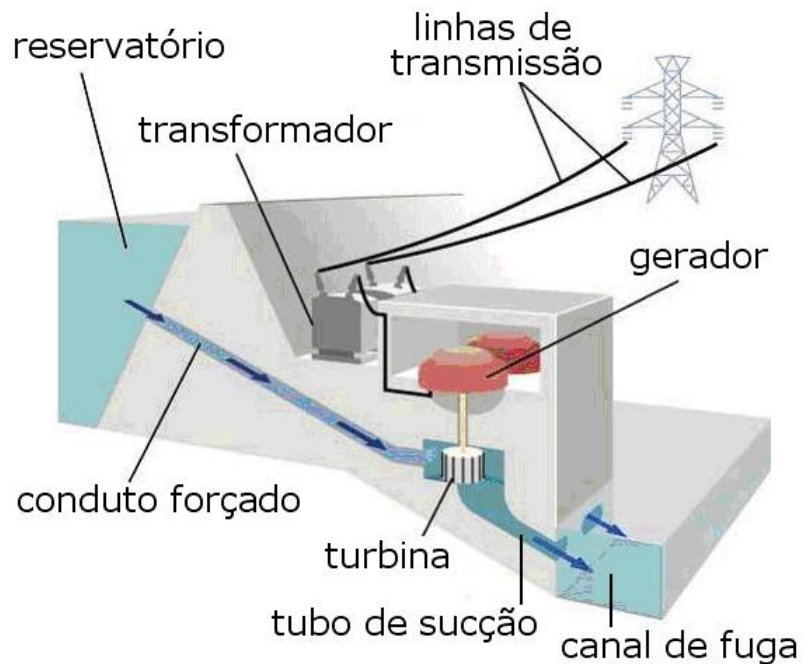
Capítulo 2

Apresentação do problema de despacho ótimo

2.1 Elementos de usinas hidrelétricas

Os principais elementos de uma UHE são a barragem (responsável pelo represamento do rio), os condutos forçados, a casa de força, o canal de fuga e o vertedouro. Os condutos forçados têm a função de levar a água represada para a casa de força. Esta, volta novamente ao rio através do canal de fuga. O vertedouro descarrega água do reservatório diretamente no canal de fuga, caso haja excesso de água do reservatório ou a UHE à jusante necessite de uma afluência maior do rio. Dependendo da arquitetura da UHE, o vertedouro deve descarregar a água distante dela, de forma que a água despejada não influencie o nível do canal de fuga.

A casa de força possui turbinas, geradores e outros equipamentos auxiliares. O termo UG se refere a cada par turbina-gerador. A produção de energia elétrica ocorre através da energia potencial da água represada da seguinte forma: a água é levada pelo conduto forçado até a casa de força, passando por uma turbina. A turbina está conectada a um gerador, que produz a energia elétrica através do movimento do eixo da turbina. A Figura 2.1 mostra, além dos elementos descritos, um transformador, que é responsável pela elevação da tensão



Fonte: Sala de Física (2006)

Figura 2.1: Vista lateral de uma UHE

elétrica e as linhas de transmissão, que conectam a geração da usina com o resto do sistema elétrico a que esta pertence.

Nesta transformação de energia potencial da água em energia elétrica, um fator importante é a chamada altura de queda bruta da UHE, que é a diferença entre o nível do reservatório e o nível do canal de fuga da UHE. Tal altura depende da vazão d'água turbinada, da afluência do rio e do volume d'água armazenado.

A energia potencial da água na UHE é proporcional à altura de queda bruta. No escoar da água no conduto forçado, ocorrem as perdas hidráulicas, que têm reflexos diretos na diminuição desta energia potencial. Estas perdas podem ser diminuídas da altura de queda bruta, obtendo-se, assim, a altura de queda líquida. Aqui, altura de queda líquida é chamada apenas de altura de queda.

2.2 Despacho ótimo de unidades geradoras

O despacho ótimo de UGs aloca a geração de eletricidade de uma usina (ou conjunto de usinas) entre UGs, escolhendo a quantidade delas a estarem ativas e o nível de geração de cada uma. Uma configuração de UGs é utilizada por um período curto de tempo, geralmente entre 30 minutos até 1 hora, no caso do despacho indicado neste trabalho, e, ao final deste período, a configuração é modificada de forma a atender as novas condições do sistema.

A alocação da geração busca otimizar custos ou geração. Em usinas termelétricas, o critério de desempenho a ser otimizado é o custo do combustível. Em UHEs, no entanto, a relação entre o despacho da usina e o custo de geração não é tão direta quanto no problema de despacho térmico. Neste caso, um critério mais conveniente é a otimização da produtividade das UHEs, o que equivale à maximização da conversão da energia potencial da água acumulada nos reservatórios em energia elétrica (Santos *et al.*, 2002).

Nas UHEs as novas condições atualizadas no final do período de operação são, basicamente, a altura de queda da usina, a demanda elétrica e a reserva girante. A demanda de uma usina é pré-determinada pelos planejamentos de longo e médio prazos. A geração não deve exceder a demanda, porque isto causaria problemas de aumento da frequência elétrica e, além disto, a energia elétrica não pode ser armazenada. A reserva girante, que é explicada com mais detalhes a seguir, visa garantir a segurança e confiabilidade do sistema.

É importante que um modelo de despacho leve em conta características operativas das UGs, como as zonas proibidas de operação e as eficiências. Uma UG operando na zona proibida de operação pode sofrer danos, diminuição da sua vida útil e seu desempenho pode ser afetado. As eficiências dos conjuntos turbina-gerador são os principais fatores no desempenho da geração de eletricidade em uma UHE (Soares e Salmazo, 1997).

2.3 Reserva girante

As UGs das UHEs, bem como as linhas de transmissão e os transformadores do sistema estão sujeitos a falhas que podem comprometer o atendimento da demanda se não existirem medidas de segurança. Uma reserva de geração deve garantir a confiabilidade do sistema caso ocorram falhas ou mesmo erros na previsão de demanda (Nilsson *et al.*, 1998).

Assim como a demanda, a reserva de geração, chamada reserva operativa, deve ser prevista e distribuída entre as UGs das UHEs. O cálculo da reserva operativa mais comumente utilizado é o que considera, basicamente, a capacidade da maior máquina do sistema ou esta quantidade acrescida de uma margem (Borges, 2005). Nesta técnica podem surgir super dimensionamentos, que são, em geral, anti econômicos, ou subdimensionamentos, que não garantem a confiabilidade necessária ao sistema.

Segundo o ONS (2003), a reserva de potência operativa é dividida em reservas primária (R1), secundária (R2) e terciária (R3) e é calculada por empresa geradora para que esta, por sua vez, aloque a reserva entre suas UHEs e UGs da melhor forma. A reserva R1 destina-se à regulação de frequência do sistema interligado, enquanto que a R2 tem a função de recuperar a frequência do sistema – alterada pelas variações momentâneas ou de curta duração da carga – permitindo uma atuação correta, com o objetivo de manter os intercâmbios e a frequência dentro de valores programados. Por último, a R3 tem a função de cobrir saídas ou limitações não programadas de UGs, causadas por defeitos nos equipamentos que as compõem.

Dentre os três tipos de reserva, a R2 e a R3 devem ser mantidas na forma de reserva girante, ou seja, na folga de geração das UGs sincronizadas. A reserva girante está pronta para ser acessada em poucos minutos, caso surjam problemas que exijam urgência de solução.

2.4 Zonas proibidas de operação

Na saída das pás das turbinas das UHEs pode ocorrer um fenômeno chamado cavitação, em algumas faixas de operação. A cavitação é uma sequência de fenômenos que compreende a criação de bolhas de vapor com suas implosões posteriores. As bolhas se formam por conta das altas velocidades do fluxo d'água e da baixa pressão na saída do rotor da turbina. As bolhas são, então, submetidas a um aumento abrupto de pressão mais adiante no escoamento, o que as faz implodir, liberando forças poderosas nas turbinas.

Dentre as consequências da cavitação estão, segundo Calainho *et al.* (1999), a erosão de contornos sólidos (como as pás das turbinas e paredes dos tubos de sucção), vibrações, ruídos excessivos e grande diminuição da eficiência das turbinas. Esta última pode comprometer diretamente a eficiência global de geração da UHE no despacho.

Com as pás da turbina erodidas, pode ocorrer a corrosão das mesmas. Uma turbina com problemas sérios de erosão (e, possivelmente, corrosão), é parada para manutenção, o que, além dos gastos econômicos na reparação, implica na não disponibilidade da UG por um período de tempo, além de diminuição na vida útil da turbina.

Por todos estes fatores, as faixas de operação em que ocorre a cavitação devem ser evitadas. As zonas proibidas causam a repartição da zona de operação em diversas faixas disjuntas. Por exemplo, uma UG com capacidade nominal de 300 *MW* pode operar no intervalo de 0 a 50 *MW* e a partir de 100 *MW*, para que seja evitada a zona proibida de 50 a 100 *MW*. Este é um exemplo de uma UG com 2 faixas possíveis de operação, mas existem aquelas que possuem mais faixas disjuntas. O que muitas vezes se faz nos modelos de despacho é uma simplificação, eliminando-se a faixa de menor potência, na qual tem-se justamente as menores eficiências. Estas zonas variam, também, de acordo com a altura de queda da usina.

2.5 Eficiência dos conjuntos turbina-gerador

Nenhum dispositivo elétrico ou mecânico é ideal, isto é, todos estão sujeitos a imperfeições no seu funcionamento, como o atrito entre elementos, aquecimento, condições naturais não ideais de temperatura e pressão, e outros fatores. Um conjunto turbina-gerador, por consequência, também está sujeito a estes tipos de fatores; sendo assim, o aproveitamento da energia potencial da água dos reservatórios em energia elétrica não é total, variando de acordo com as condições em que se encontra a máquina.

A eficiência de um dispositivo de transformação de energias pode ser expressa por

$$\eta = \frac{E_s}{E_e}, \quad (2.1)$$

onde E_s é a energia de saída e E_e é a energia de entrada. No par turbina-gerador a medida de entrada depende diretamente da altura de queda da usina e da vazão turbinada. Na saída a medida pode ser precisamente calculada ao medir-se a potência gerada, multiplicando-a por uma medida de tempo

$$E_s = Gt, \quad (2.2)$$

onde G é a potência elétrica constante no período t .

Como dito anteriormente, as eficiências do conjunto turbina-gerador são fatores importantes no desempenho de geração de eletricidade pelas UGs de uma UHE. Assim, o conhecimento do seu comportamento pode possibilitar um melhor despacho de geração e consequentes ganhos energéticos (Salmazo, 1997).

A curva de eficiência de uma UG é chamada de curva colina por seu formato, que se assemelha a uma colina. A eficiência é função da altura de queda e da vazão turbinada ou da altura de queda e da potência gerada, como é o caso da curva colina da Figura 2.2, referente às UGs da UHE de Xingó.

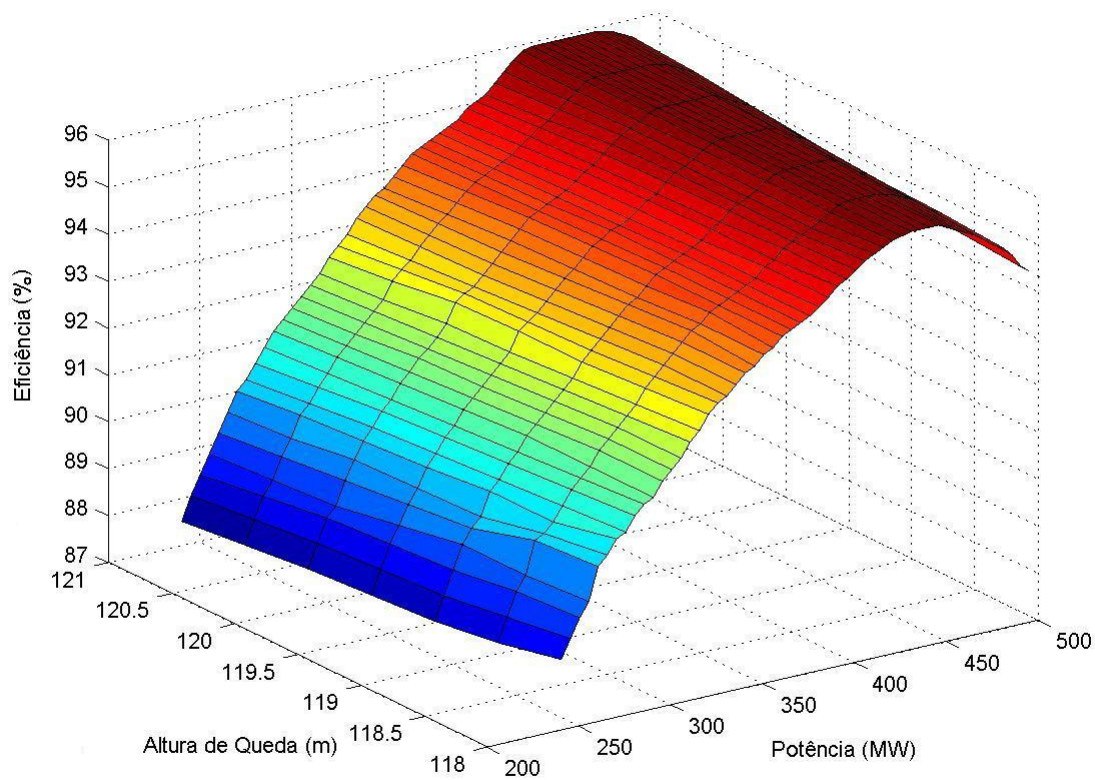


Figura 2.2: Curva colina das UGs da UHE Xingó

2.6 Eficiência de projeto

O tamanho das turbinas hidráulicas varia dependendo das condições da UHE, podendo chegar a ter o diâmetro de vários metros e pesando toneladas. Para estas turbinas é imprescindível a realização de testes antes de sua construção. Os testes determinam seu formato (ângulo de pás, diâmetro,...), com o intuito de obter os rendimentos esperados e os valores de potência acordados entre o comprador e fabricante.

Uma técnica que tem sido utilizada há muito tempo é a de modelo em escala reduzida da turbina com tanques, bombas de pressão, condutos e outros elementos, tentando simular

as condições da UHE. A vantagem da utilização de modelo em escala reduzida é a economia financeira e de tempo.

Entre outros testes, são realizados ensaios de cavitação e de rendimentos no modelo em escala reduzida. Os dados do protótipo podem ser obtidos a partir de testes realizados com um modelo em escala reduzida, com embasamento na Teoria da Similaridade. Esta teoria diz que, se dois sistemas hidrodinâmicos são semelhantes, ou seja, se existem as semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica entre eles, os resultados ou informações de um sistema podem ser transferidos para o outro.

O modelo e o protótipo são geometricamente semelhantes se a razão entre qualquer comprimento em um dos dois e o correspondente no outro é constante. As rugosidades das superfícies também devem ser geometricamente semelhantes para que haja a semelhança perfeita. Tal razão constante é chamada de fator de escala e pode ser denominada como segue:

$$C = \frac{D'}{D}, \quad (2.3)$$

onde D' é qualquer comprimento relativo ao protótipo e D é o comprimento correspondente no modelo.

A semelhança cinemática só é possível quando existe a semelhança geométrica. Dois fluxos são semelhantes cinematicamente quando as velocidades em pontos correspondentes estão na mesma direção e se relacionam à velocidade segundo o fator de escala, e se possuem os padrões formados pelas linhas de corrente semelhantes geometricamente.

Semelhança dinâmica é obtida quando os valores absolutos das forças, em pontos equivalentes dos dois sistemas, estão numa razão fixa e igual ao fator de escala.

As fórmulas a seguir são de transposição de informações de um sistema para outro seme-

lhante.

$$\frac{P_n}{P_t} = C^2 \left(\frac{H'}{H} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.4)$$

e

$$\frac{Q'}{Q} = C^2 \left(\frac{H'}{H} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.5)$$

onde H' , P_n , e Q' são respectivamente a altura de queda, potência, e vazão turbinada no protótipo; e H , P_t , e Q são as mesmas grandezas mencionadas anteriormente, mas referentes ao modelo. Em NB-228 (1974), apresenta-se uma fórmula para o cálculo da eficiência η_t quando fixado um trio P_t , Q e H . A fórmula é a seguinte:

$$\eta_t = \frac{P_t}{K\gamma QH}, \quad (2.6)$$

onde $K = \frac{1000}{102}$ e γ é uma constante que depende da altitude, latitude e peso específico da água.

É muito difícil de se obter a similaridade perfeita. Considera-se, por exemplo, um modelo 20 vezes menor do que o protótipo. Desta forma, as irregularidades superficiais efetivas do modelo devem ser, obrigatoriamente, 20 vezes menores que as do protótipo. O efeito de escala exerce forte influência no que se refere à semelhança cinemática e dinâmica. Alterando-se a rugosidade superficial em valores não proporcionais à razão de semelhança geométrica, implicam-se modificações não proporcionais ao sistema comparativo (modelo e protótipo). Algumas fórmulas empíricas de correção de eficiência entre os sistemas são utilizadas, cujas principais podem ser encontradas em Macintyre (1983)¹. No entanto, por falta da obtenção perfeita da semelhança entre dois sistemas, seus rendimentos são significativamente diferentes (Duarte e Bittencourt, 2003)².

Após a escolha da configuração da turbina com os testes no modelo reduzido, a mesma é construída e instalada na UHE. Realiza-se, então, o ensaio de recepção de turbina, cujos

¹Aos dados de eficiência das turbinas extrapolados do modelo em escala reduzida chamou-se, neste trabalho, de eficiência de projeto.

²Para mais detalhes sobre a Teoria da Similaridade ver Fox e McDonald (1998).

procedimentos e normalizações estão em NB-228 (1974), quando as eficiências são calculadas para uma ou mais turbinas instaladas para verificação com a faixa de garantia dada pelo fabricante.

Um método que pode vir a substituir os ensaios com modelos em escala reduzida, é o de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), que simula o escoamento de fluidos baseando-se em três princípios fundamentais da Física que regem todos os fluidos, que são a conservação de massa, a conservação da quantidade de movimento (Segunda Lei de Newton) e a conservação de energia (Primeira Lei da Termodinâmica). Este método computacional utiliza procedimentos de análise numérica como Diferenças Finitas, Elementos Finitos ou Volumes Finitos.

A utilização de simulações de CFD requer computadores potentes e programas computacionais que, em geral, são caros, mas não chegam aos valores necessários para os testes com modelos em escala reduzida (construção, mão de obra). Além disto, o período de tempo para as simulações de CFD são, com segurança, muito menores do que as etapas de construção e ensaios com modelos em escala reduzida.

2.7 Eficiências atualizadas das unidades geradoras

A equação 2.6 fornece a eficiência, constante, de uma turbina com as condições H , Q , P_t e γ , valores constantes. Os valores H , P_t e γ podem ser medidos com boa precisão. Desta forma, a precisão do rendimento η_t depende fortemente do método de medição de vazão.

Andrade *et al.* (2002) fizeram um estudo da relação custo benefício da utilização dos principais métodos de medição de vazão que podem ser utilizados em condutos forçados de UHEs. Os mais viáveis, segundo este trabalho são os métodos ultra sônico, Winter Kennedy e de Pitot.

O método Winter Kennedy é antigo e é bastante utilizado para os ensaios de recepção de turbinas. Este método necessita de um modelo reduzido, uma vez que o fator que relaciona a vazão com a diferença de pressão, medida entre dois pontos, deve ser determinado no modelo reduzido e depois aplicado na instalação. O método possui a vantagem de utilizar equipamentos de baixo custo, além de aplicar-se a condutos com qualquer diâmetro. Uma desvantagem é a necessidade de um modelo em escala reduzida.

Os equipamentos necessários para a realização dos ensaios com o método de Pitot são de baixo custo. Este método consiste em determinar a velocidade da água por intermédio dos tubos de Pitot, em um número suficiente de pontos da seção de medida, e calcular a vazão por integração.

Os medidores de vazão ultra-sônicos podem ser divididos em dois tipos principais, a saber, medidores a efeito Doppler e medidores de tempo de trânsito. Segue aqui uma breve descrição do primeiro método. O(s) transdutor(e)s emite(m) ultra-som em uma frequência conhecida (acima de 25 *khz*) e as partículas contidas na água refletem parte das ondas emitidas. As ondas são captadas pelo(s) transdutor(e)s em frequência diferente da transmitida, por causa do efeito Doppler, e, então, a velocidade de locomoção das partículas pode ser medida e, por consequência, pode-se medir o perfil do fluxo d'água. O preço do equipamento para medição de vazão em rio está próximo de *US\$* 15.000,00, valor fornecido por um fabricante (Sontek, 2006). O alcance dos aparelhos podem ir de 30 cm até 180 m. Os custos dos equipamentos ultra-sônicos são mais elevados do que dos outros métodos descritos, mas, por outro lado, a precisão dos métodos ultra-sônicos é maior que os últimos (Andrade *et al.*, 2002).

Com relação à obtenção das curvas colinas das UGs através de medições realizadas diretamente na UHE, deve-se levar em conta as diferenças entre as UHEs. Existem UHEs a fio d'água e com reservatório. As UHEs a fio d'água utilizam toda a água que chega

ao reservatório, mantendo uma reserva mínima para garantir a operacionalidade. A altura de queda destas UHEs variam consideravelmente ao longo de um dia. As UHEs com regulação anual ou plurianual (UHEs com reservatório) apresentam menor variação na altura de queda, podendo permanecer todo um dia com aproximadamente a mesma altura de queda.

Para as UHEs a fio d'água, existe a necessidade de obtenção de uma curva colina de eficiência em função da vazão (ou potência) e da altura de queda para a realização do despacho. Para este tipo de UHE, podem ser reservados períodos para que sejam realizadas as medições de eficiência, variando a altura de queda e vazão.

Já para as UHEs com grandes reservatórios não se pode fazer o mesmo, porque a variação de alguns metros da queda pode significar grandes volumes de água. Neste tipo de UHE, a curva colina pode ser construída ao longo de vários meses ou anos.

2.8 Influência das curvas de eficiência nas condições de otimalidade

Nesta seção, as condições necessárias e suficientes para um ótimo local são utilizadas para verificar quando uma configuração de UGs as satisfaz. Para efeito de simplificação, são consideradas as funções de perda, ao invés das eficiências. $L_i(P_i)$ foi indicada como a função de perda para a UG i em função da potência gerada P_i , que é calculada por

$$L_i(P_i) = \frac{P_i}{\eta_i(P_i)} - P_i, \quad (2.7)$$

onde $\eta_i(P_i)$ é a curva de eficiência da UG i . As variáveis da formulação são apresentadas todas no próximo capítulo.

Realiza-se inicialmente, o estudo com as condições necessárias de primeira ordem, que garantem que uma solução x^* é um ponto de mínimo local de uma função f de classe C^1 , se

$\nabla f(x^*)d \geq 0$ para toda direção d factível. Se x^* está no interior da região factível, todas as direções são factíveis e então deve valer $\nabla f(x^*) = 0$.

Seja n o número de UGs disponíveis. Supõe-se que foram determinadas as UGs que estarão ativas e que, sem perda de generalidade, estas são as m primeiras. A soma da geração destas m UGs deve ser igual à demanda elétrica D da UHE

$$\sum_{i=1}^m P_i = D. \quad (2.8)$$

Coloca-se P_m em função de $P_1, P_2, \dots, P_{m-1}$ da seguinte forma

$$P_m = D - \sum_{i=1}^{m-1} P_i. \quad (2.9)$$

Assim, a função de perdas totais é

$$L_t(P_1, P_2, \dots, P_{m-1}) = \sum_{i=1}^{m-1} L_i(P_i) + L_m\left(D - \overbrace{\sum_{i=1}^{m-1} P_i}^{P_m}\right). \quad (2.10)$$

A condição necessária de primeira ordem para os pontos interiores é $\nabla L_t = 0$. Logo,

$$\nabla L_t = \left(\frac{dL_1}{dP_1} - \frac{dL_m}{dP_m}, \frac{dL_2}{dP_2} - \frac{dL_m}{dP_m}, \dots, \frac{dL_{m-1}}{dP_{m-1}} - \frac{dL_m}{dP_m} \right) = (0, 0, \dots, 0) \quad (2.11)$$

implica em

$$\frac{dL_1}{dP_1} = \frac{dL_2}{dP_2} = \dots = \frac{dL_{m-1}}{dP_{m-1}} = \frac{dL_m}{dP_m}, \quad (2.12)$$

isto é, as perdas marginais das UGs devem ser iguais para soluções ótimas no interior no espaço solução, ou melhor, se uma solução possui perdas marginais iguais, esta é uma candidata a mínimo local e, se não as possui (excluindo-se os pontos extremos), não pode ser um mínimo local. A Figura 2.3 ilustra curvas de perdas de 4 UGs³ e uma configuração de geração determinada pelo despacho para uma demanda de 400 MW (vide Tabela A.2). A Figura 2.4 mostra uma aproximação aos pontos de geração indicados na Figura 2.3. Vê-se que as perdas marginais de tais pontos são iguais.

³Curvas de perdas correspondentes aos dados atualizados de UGs da UHE em estudo no presente trabalho.

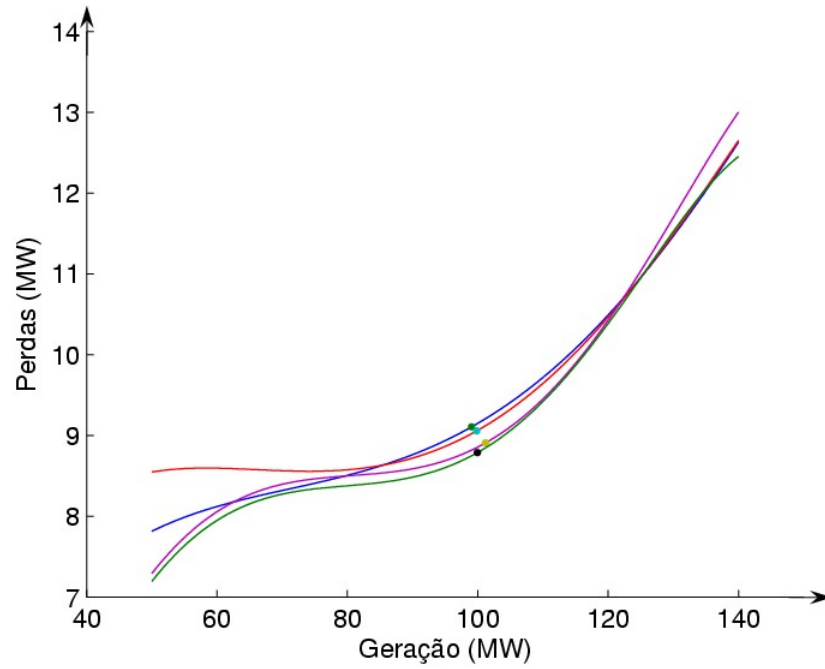


Figura 2.3: Curvas de perdas de UGs de uma UHE real

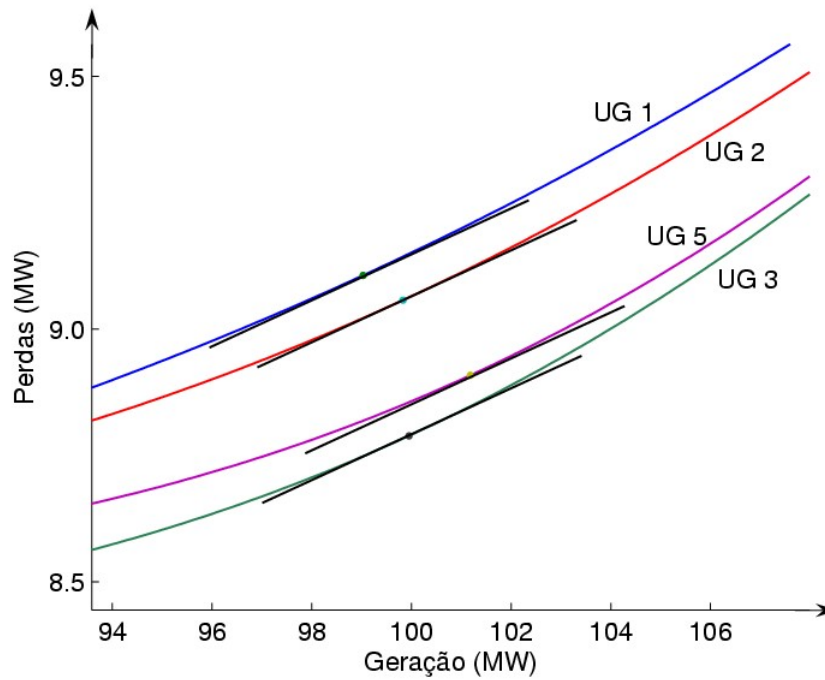


Figura 2.4: Gerações com perdas marginais iguais

Portanto, se as UGs tiverem curvas iguais, a divisão igual da demanda entre as UGs ativas é uma opção trivial, e se as curvas de perdas forem convexas, é a única repartição de carga que satisfaz as condições necessárias de primeira ordem para valores de geração no interior da zona de operação. É mostrado em seguida que esta opção, de repartição igual de carga entre as UGs (com curvas idênticas), satisfaz também as condições suficientes para mínimo local se $\frac{d^2 L_i}{d^2 P_i} > 0$.

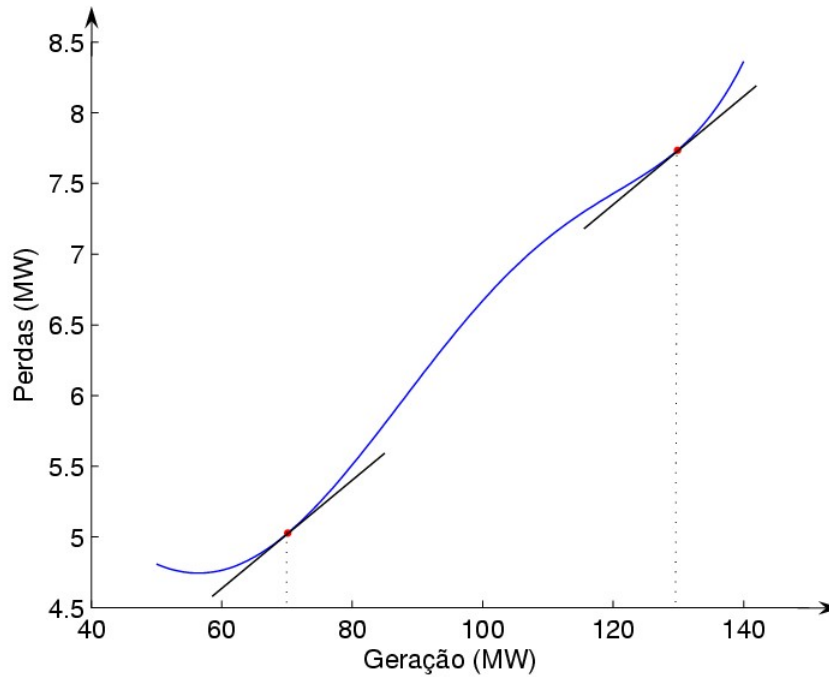


Figura 2.5: Gerações com perdas marginais iguais

Caso as curvas de perdas das UGs sejam idênticas, mas não convexas, existem outras opções de repartição de carga, como indicado, por exemplo, na Figura 2.5⁴. Estão indicadas, nesta figura, as gerações de 129,87 MW e 70,13 MW. Tais valores foram obtidos com o despacho realizado para uma demanda de 400 MW. O despacho escolheu duas UGs a gerarem 129,87 MW e outras duas, 70,13 MW (vide Tabela A.1). Vê-se que, para estas gerações, as perdas marginais são iguais ou muito próximas.

⁴A curva de perdas da Figura 2.5 corresponde aos dados de projeto da UHE em estudo neste trabalho.

As condições necessárias e suficientes de segunda ordem garantem que, se uma função f de classe C^2 é definida em uma região onde x^* é um ponto interior, então x^* é ponto de mínimo local de f se e somente se $\nabla f(x^*) = 0$ e $F(x^*) - \text{Hessiana de } f \text{ em } x^*$ é definida positiva. Para maiores detalhes sobre as condições de ótimos locais e demonstrações, ver Luenberger (1986) e Bazaraa *et al.* (1943).

Pode-se usar a nomenclatura de Hessiana de f como $\nabla^2 f$. Assim, a Hessiana de L_t é dada por

$$\nabla^2 L_t = \begin{bmatrix} \frac{d^2 L_1}{dP_1} + \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} & \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} & \cdots & \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} \\ \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} & \frac{d^2 L_2}{dP_2} + \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} & \cdots & \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} & \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} & \cdots & \frac{d^2 L_{m-1}}{dP_{m-1}} + \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Se as curvas L_i para $i = 1, \dots, m$ são iguais, logicamente

$$\frac{d^2 L_1}{dP_1^2} \left(\frac{D}{m} \right) = \frac{d^2 L_2}{dP_2^2} \left(\frac{D}{m} \right) = \cdots = \frac{d^2 L_m}{dP_m^2} \left(\frac{D}{m} \right), \quad (2.14)$$

sendo $P^* = (\frac{D}{m}, \frac{D}{m}, \dots, \frac{D}{m})$. Foi chamado, então, $k = \frac{d^2 L_i}{dP_i^2} \left(\frac{D}{m} \right)$. Assim,

$$\nabla^2 L_t(P^*) = \begin{bmatrix} 2k & k & \cdots & k \\ k & 2k & \cdots & k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k & k & \cdots & 2k \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

A Hessiana $\nabla^2 L_t$ será definida positiva em P^* se $u^T \nabla^2 L_t(P^*) u > 0$ para todo $u \neq 0$ ou se os menores complementares de $\nabla^2 L_t(P^*)$ forem positivos. Utilizou-se a primeira definição para verificar-se sob quais condições a Hessiana é definida positiva. Seja

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{m-1} \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

então

$$u^T \nabla^2 L_t u = k \left(\sum_{i=1}^{m-1} u_i^2 + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} u_i u_j \right). \quad (2.17)$$

Tem-se

$$\sum_{i=1}^{m-1} u_i^2 > 0 \quad (2.18)$$

se $u \neq 0$. Em seguida analisa-se $\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} u_i u_j$, que, para $m = 2$, $u_1^2 > 0$ ($u_1 \neq 0$). Para $m = 3$

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 u_i u_j = u_1^2 + 2u_1 u_2 + u_2^2 = (u_1 + u_2)^2 > 0 \quad (2.19)$$

quando $u \neq 0$. Então, por indução finita, supõe-se que vale

$$\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} u_i u_j = \left(\sum_{i=1}^{m-1} u_i \right)^2. \quad (2.20)$$

Daí

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m u_i u_j &= \sum_{i=1}^m \left(u_i u_m + \sum_{j=1}^{m-1} u_i u_j \right) = \sum_{i=1}^{m-1} u_i u_m + u_m^2 + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} u_i u_j + \sum_{j=1}^{m-1} u_m u_j = \\ &= \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} u_i u_j + 2u_m \sum_{i=1}^{m-1} u_i + u_m^2 \underbrace{=}_{\text{eq. 2.20}} \left(\sum_{i=1}^{m-1} u_i \right)^2 + 2u_m \sum_{i=1}^{m-1} u_i + u_m^2 = \\ &= \left(\sum_{i=1}^{m-1} u_i + u_m \right)^2 > 0, \quad \forall u \neq 0. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Com isto, tem-se, então, que $u^T \nabla^2 L_t u$ em 2.17 será positiva somente se $k = \frac{d^2 L_i}{dP_i^2} > 0$, que é a condição de concavidade para cima de uma função de $\Re$ em $\Re$.

Isto mostra que a repartição igual da demanda entre as UGs ativas com curvas idênticas é um ótimo local (se a derivada segunda for positiva (negativa) para o caso de minimização (maximização)) e, se as curvas L_i forem convexas, a solução é um ótimo global.

No caso da repartição igual de carga entre as UGs o despacho torna-se um problema de escolha de quantidade de UGs que devem estar ativas, já que a geração de cada uma está

trivialmente determinada. Neste caso, uma curva acumulada de perdas pode ser facilmente obtida.

A Figura 2.6 mostra a curva de perdas convexa das 6 UGs da UHE Xingó (dados de projeto), cada uma com potência máxima de 500 *MW*. A curva de perdas acumulada desta UHE pode ser vista na Figura 2.7. Para demanda de até 1500, a solução ótima é obtida ativando-se o número mínimo possível de UGs, ou seja, 1 UG ativa para demanda de até 500 *MW*, 2 para geração de 500 a 1000 *MW* e 3 de 1000 a 1500 *MW*. A partir de 1500 *MW* isso não vale sempre, por exemplo, para 1990 *MW* as menores perdas são obtidas com 5 UGs, ao invés de 4.

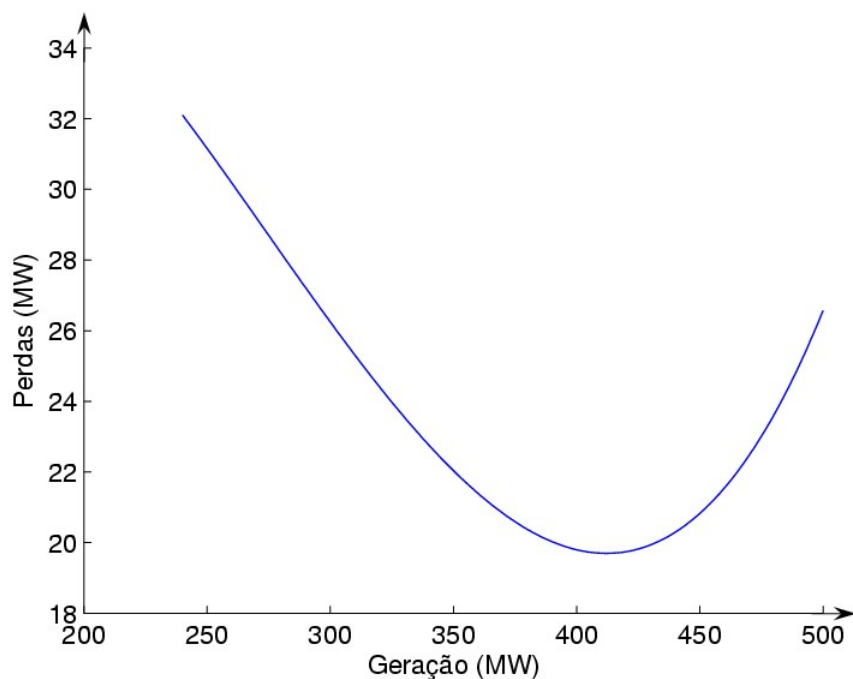


Figura 2.6: Curva de perdas convexa

Já em um despacho com UGs com curvas diferentes, não é válida a premissa de que a divisão igual de carga entre as UGs é uma solução ótima. Torna-se, então, um problema de escolha de quais UGs devem estar ativas, ao invés de apenas a quantidade delas, e o nível

de geração de cada uma que satisfaça as condições de ótimo local.

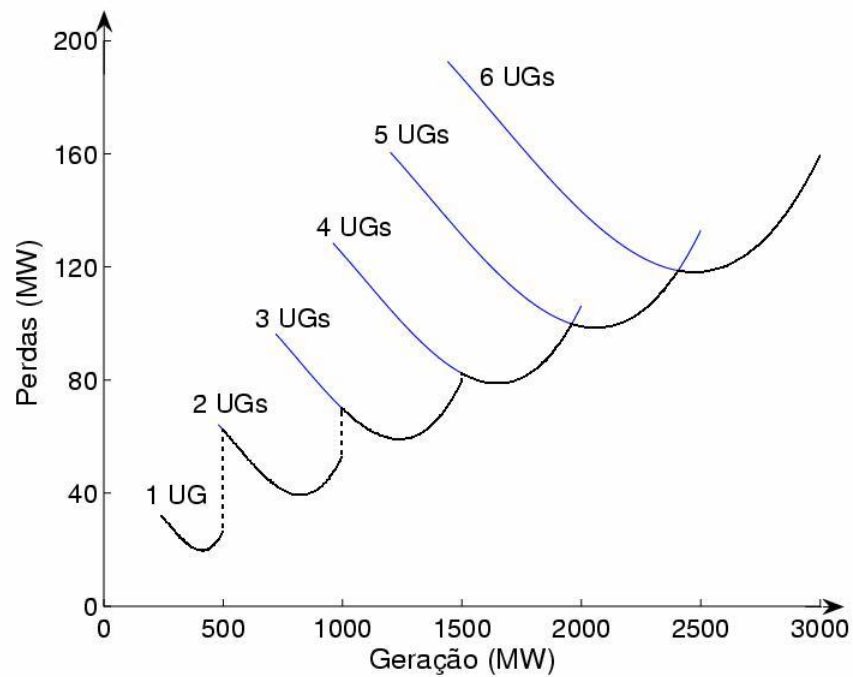


Figura 2.7: Total de perdas da UHE Xingó com altura de queda de 119m

O número de combinações de UGs cresce exponencialmente, sendo igual a 2^n , onde n é o número de UGs disponíveis na UHE. Se n for grande, por exemplo 15, torna-se demorado testar todas as combinações. Este é um problema que surge quando considera-se as UGs diferentes. O método de busca não deve, então, testar todas as combinações possíveis, neste caso.

Capítulo 3

Formulação matemática do problema

3.1 Variáveis e constantes

Nesta seção são descritas as variáveis e constantes envolvidas na formulação do problema de pré-despacho. As variáveis são:

i	Índice da UG
P_i	Potência na UG i (em MW)
B_i	Potência bruta em i (em MW)
$\eta_i(P_i)$	Curva de eficiência da UG i em função de P_i
y_i	Variável booleana que indica se a UG i está ou não ativa
N	Eficiência global da UHE

A cada despacho algumas condições são atualizadas, e desta forma, os seguintes valores, que representam estas condições, são considerados constantes no problema:

n	Número de UGs disponíveis na UHE
D	Demanda elétrica na UHE (em MW)
R	Reserva girante mínima a ser obedecida na UHE (em MW)
$\underline{P}_i$	Limite mínimo de geração para a UG i , quando ativa (em MW)
$\overline{P}_i$	Limite máximo de geração para a UG i , quando ativa (em MW)

A constante n depende da usina em estudo. Obviamente é um valor natural maior que 1. Este valor se refere ao número de UGs que podem entrar em operação, ou seja, que não estão em manutenção ou fora de operação por algum outro motivo. O índice i varia, então, de 1 a n .

$\underline{P}_i$ e $\overline{P}_i$ são os limites mínimo e máximo de geração de uma UG ativa. Existem UGs que possuem vários intervalos possíveis de operação, mas, na formulação, considera-se apenas um entre $\underline{P}_i$ e $\overline{P}_i$. Estes limites podem variar para cada UG. A variável P_i é a potência na UG i e se a mesma não está gerando seu valor é zero. A potência bruta B_i é a potência utilizada para gerar P_i . Desta forma, as perdas na UG i são $B_i - P_i$.

A eficiência da UG i é representada por $\eta_i(P_i)$ e seu domínio é $\{0\} \cup [\underline{P}_i, \overline{P}_i]$. Esta função é um polinômio aproximado pelos dados de eficiência discretos. As eficiências assumem valores estritamente menores que 1. N é a eficiência global da UHE, ou seja, a eficiência da conversão da potência bruta em potência gerada, considerando-se as gerações de todas as UGs da UHE.

A variável y_i pode assumir apenas valores 0 ou 1, chamada variável booleana. Indica quando uma UG está ou não ativa. É fundamental para indicar quando uma UG contribui para a reserva girante ($y_i = 1$).

3.2 Função objetivo

Neste despacho, o critério de otimização é a maximização da eficiência global da UHE

$$\text{Max } N = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n B_i}. \quad (3.1)$$

O somatório $\sum_{i=1}^n P_i$ é a geração das UGs e $\sum_{i=1}^n B_i$ é a potência bruta utilizada para esta

geração. Sabe-se que a geração $\sum_{i=1}^n P_i$ deve ser igual à demanda atendida pela UHE. Assim, 3.1 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\text{Max } N = \frac{D}{\sum_{i=1}^n B_i}. \quad (3.2)$$

Na função objetivo de 3.2 há divisão de variáveis e é preferível que, nas formulações, elas não existam, porque podem dificultar computacionalmente a resolução do problema. Para eliminar a divisão pode ser feita a modificação

$$\text{Max } N \quad (3.3)$$

com a restrição não linear

$$N \sum_{i=1}^n B_i = D. \quad (3.4)$$

Vê-se que a função objetivo N é linear, mas, para esta formulação, foi aumentada uma restrição ao problema.

Uma alternativa à maximização da eficiência global é a minimização da soma das perdas elétricas

$$\sum_{i=1}^n (B_i - P_i), \quad (3.5)$$

que podem ser escritas como segue:

$$\sum_{i=1}^n B_i - \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n B_i - D. \quad (3.6)$$

Minimizar o lado direito de 3.6 é equivalente a minimizar $\sum_{i=1}^n B_i$. Esta nova função objetivo é linear, assim como N em 3.3 e 3.4 e não houve a necessidade de se adicionar mais uma restrição ao problema, logo, foi escolhida como a função objetivo do problema,

$$\sum_{i=1}^n B_i, \quad (3.7)$$

a ser minimizada.

3.3 Restrições

Descreve-se, nesta seção, a formulação matemática das características operativas da UHE e das UGs como restrições para o problema de programação matemática associado ao problema de despacho.

A demanda elétrica é atendida através da restrição linear de igualdade:

$$\sum_{i=1}^n P_i = D \quad (3.8)$$

A zona de operação é obedecida inserindo-se as variáveis binárias y_i da seguinte forma:

$$y_i \underline{P}_i \leq P_i \leq y_i \overline{P}_i. \quad (3.9)$$

Quando $y_i = 0$, a UG i não está ativa, forçando $0 \leq P_i \leq 0$, o que garante $P_i = 0$. E se $y_i = 1$, P_i permanece no intervalo fechado $[\underline{P}_i, \overline{P}_i]$.

A eficiência de uma UG é

$$\eta_i = \frac{P_i}{B_i}. \quad (3.10)$$

A variável η_i representa os dados de eficiência de uma unidade em função da potência P_i com uma altura de queda fixa. Estes dados de eficiência são discretos e a obtenção de uma curva que represente os pontos é necessária neste tipo de formulação. Desta maneira obtém-se a curva $\eta_i(P_i)$ e

$$\eta_i(P_i) = \frac{P_i}{B_i}. \quad (3.11)$$

Como é conveniente eliminar as divisões das equações, rearranjando 3.11 chega-se em

$$B_i \eta_i(P_i) = P_i, \quad (3.12)$$

mais uma restrição do problema.

Algumas alternativas para a obtenção de $\eta_i(P_i)$ são a aproximação de polinômios pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e a interpolação por *spline* cúbica. Esta última

trata-se da união de $n - 1$ curvas cúbicas para n pontos dados, sendo a união delas suave (possui até terceira derivada contínua). Não se tem, então, uma única expressão para toda a curva. Neste caso, seria necessário inserir mais variáveis binárias no problema, uma para cada curva entre dois pontos, sendo 1, se P_i está na região correspondente a esta curva, e 0, se não. Isto aumentaria em muito o número de combinações possíveis de variáveis inteiras, tornando o modelo inviável. Por este motivo, optou-se por utilizar o MMQ ao invés da *spline*.

As n equações representadas por 3.12 são as únicas restrições que apresentam não linearidade no problema. Isto porque $\eta_i(P_i)$ é função não linear de P_i , e, também, pela multiplicação de $\eta_i(P_i)$ por B_i .

A restrição de atendimento da reserva girante pode ser reescrita da seguinte forma

$$\sum_{i=1}^n (y_i (\bar{P}_i - P_i)) \geq R. \quad (3.13)$$

Rearranjando 3.13 chega-se em

$$\sum_{i=1}^n (y_i \bar{P}_i) - \sum_{i=1}^n (y_i P_i) \geq R. \quad (3.14)$$

Sabe-se que $\sum_{i=1}^n (y_i P_i) = D$, logo, de 3.14, obtém-se

$$\sum_{i=1}^n (y_i \bar{P}_i) - D \geq R. \quad (3.15)$$

Se $y_i = 1$, então a unidade i contribui com a reserva girante desde que $P_i < \bar{P}_i$, e se $y_i = 0$, ou $y_i = 1$ e $P_i = \bar{P}_i$, a unidade não contribuirá. A equação 3.15 é linear nas variáveis inteiras y_i e estas são as únicas variáveis na equação, tornando esta restrição mais interessante que a 3.13, que possui, além dos y_i , as variáveis P_i . Se todos os limites superiores forem iguais ($\bar{P}_1 = \bar{P}_2 = \dots = \bar{P}_n = \bar{P}$), 3.15 pode ser simplificada da seguinte forma:

$$\bar{P} \sum_{i=1}^n y_i - D \geq R. \quad (3.16)$$

Para cada UG existem três variáveis a ela relacionada, a saber, y_i , P_i e B_i . A Figura 3.1 mostra um gráfico em três dimensões representando estas variáveis. Considerando apenas as

restrições de zona de operação (equação 3.9) e de eficiência da UG (equação 3.12), a região factível é formado por uma curva e um ponto na origem. A reta tracejada no plano- yP indica a restrição de intervalo quando a UG está ativa. A variável B está relacionada à P , através da função $\eta(P)$. A curva, que é um subconjunto da região factível, juntamente com o ponto na origem, não é uma reta, apesar de assim parecer. Ao fixar $y = 1$, o gráfico no plano- PB que surge tem equação $B = P/\eta(P)$.

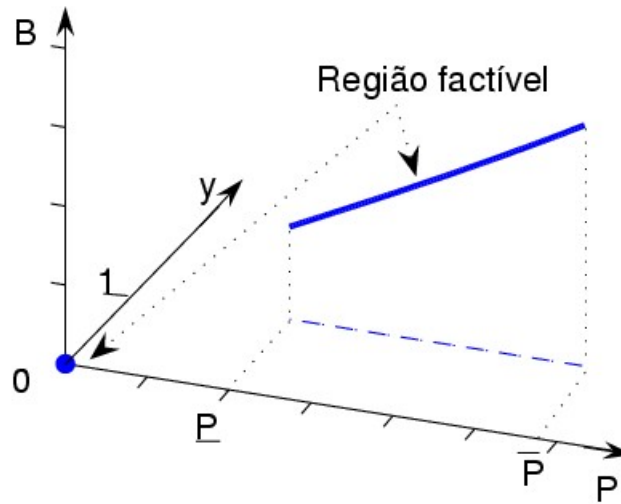


Figura 3.1: Região factível para as variáveis de uma UG

Para a visualização das restrições de demanda e reserva girante (equações 3.8 e 3.15), foram consideradas apenas duas UGs ativas, de números 1 e 2. Neste caso, tem-se fixadas $y_1 = y_2 = 1$ que podem ser consideradas constantes. Restam, então, quatro variáveis, P_1 , P_2 , B_1 e B_2 , formando uma região de dimensão 4, impossível de ser visualizado. Desconsiderando B_1 e B_2 , obtém-se o gráfico da Figura 3.2. A restrição de zona de operação é indicada pelo retângulo (interior e fronteira) e a da demanda por uma reta, por ser restrição de igualdade. A reserva girante é atendida para todos os valores de P_1 e P_2 que pertencem a uma reta ou abaixo dela. A interseção das três regiões é igual à reta da demanda dentro do retângulo.

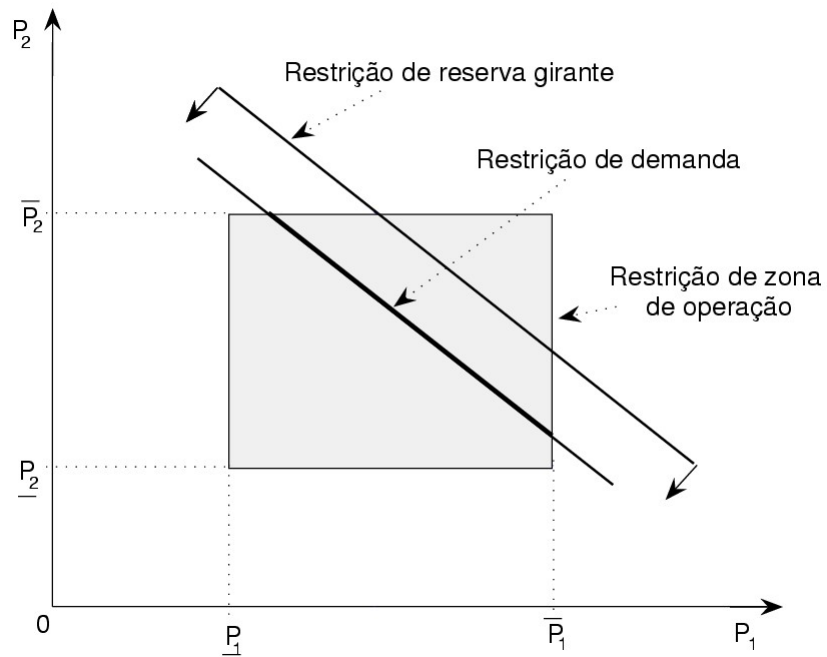


Figura 3.2: Representação gráfica das restrições – região factível coincide com a restrição de demanda dentro do retângulo

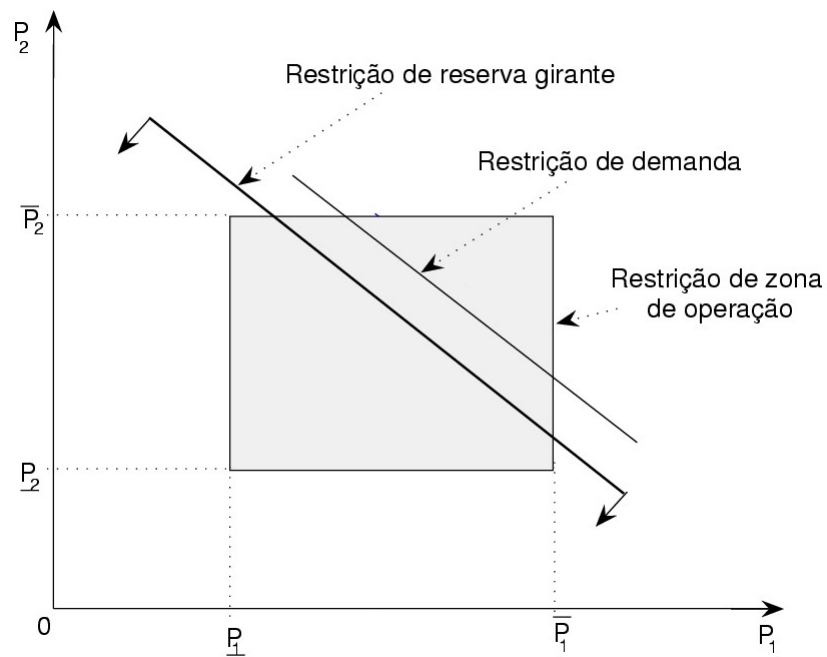


Figura 3.3: Representação gráfica das restrições – infactibilidade

Já a Figura 3.3 indica a infactibilidade do problema para duas UGs ativas. Isto se dá quando a restrição de demanda está acima da região factível do atendimento da reserva girante. Neste caso seria necessária a ativação de uma ou mais UGs.

3.4 Formulação matemática

Toda a formulação (variáveis, função objetivo e restrições) é apresentada e discutida nas seções anteriores. Nesta seção apresenta-se o problema de programação matemática resultante de forma organizada, como segue:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.17)$$

$$\text{s.a. } \sum_{i=1}^n P_i = D \quad (3.18)$$

$$y_i \underline{P}_i \leq P_i \leq y_i \overline{P}_i \quad (3.19)$$

$$\eta_i(P_i) B_i = P_i \quad (3.20)$$

$$\sum_{i=1}^n (y_i \overline{P}_i) - D \geq R \quad (3.21)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad (3.22)$$

para $i = 1, \dots, n$.

A formulação acima possui $3n + 2$ restrições (equações 3.17–3.21) e n restrições de conjunto (equação 3.22) para as variáveis y_i . Para P_i não há a necessidade de impor $P_i \geq 0$, pois este fato está determinado por 3.19.

Quando ocorre $P_i = 0$, B_i deve ser 0 também e por 3.20, isto ocorre sempre, desde que $\eta_i(0) \neq 0$, não havendo a necessidade das restrições $B_i \geq 0$. É importante mencionar que,

computacionalmente, se $|\eta_i(0)|$ for muito pequeno, $\eta_i(0)$ pode ser aproximado para 0, levando B_i para menos infinito. Por isto, caso $|\eta_i(0)|$ seja muito pequeno, insere-se a restrição $B_i \geq 0$ e, então, B_i convergirá para 0 quando $P_i = 0$.

3.5 Técnicas de solução

Nesta seção é apresentado o funcionamento dos métodos de otimização utilizados na resolução do modelo de despacho ótimo. A formulação do problema (equações 3.17 a 3.22), descreve um problema de programação matemática não linear inteira mista.

Para a resolução do problema, foi utilizado um programa comercial, o *Lingo 8.0*, que utiliza para problemas de natureza não linear, basicamente o método do Gradiente Reduzido Generalizado, e para problemas com variáveis inteiras utiliza o método de *Branch and Bound* (B&B). Estes métodos são de busca local. O programa *Lingo 8.0* possui, também, um método de busca global, que converte um problema não convexo em diversos subproblemas convexos através de técnicas de redução em uma estrutura de B&B.

3.5.1 Método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG)

O método do Gradiente Reduzido foi desenvolvido por Wolfe (1963) para resolver problemas cuja função objetivo é não linear com restrições lineares. Este método foi motivado por uma técnica de programação linear, o método Simplex e foi então generalizada para casos com restrições não lineares por Abadie e Carpentier (1969), criando o método GRG.

Considere o problema

$$\text{Min } f(x) \tag{3.23}$$

$$\text{s.a. } h(x) = 0 \tag{3.24}$$

$$l \leq x \leq u \tag{3.25}$$

cujas função objetivo $f(x)$ e as funções $h_i(x)$ com $i = 1, \dots, m$ são não lineares e diferenciáveis onde 3.24 representa tanto as restrições de igualdade como as de desigualdade, através da inserção de variáveis de folga. No GRG, reduz-se o problema 3.23-3.25 em um problema com função objetivo não linear sujeito apenas a restrições de canalização:

$$\text{Min } F(z) = f(y(z), z) \quad (3.26)$$

$$l_z \leq z \leq u_z \quad (3.27)$$

onde $x^T = (y^T, z^T)$ sendo y , chamada variável básica (dependente), de dimensão m e z , chamada variável não básica, de dimensão $n - m$. 3.26 é a função objetivo do problema reduzido e está em função apenas de z e 3.27 é a restrição de canalização da variável z . Neste método coloca-se as variáveis básicas y em função das não básicas z .

Verifica-se que z permanecerá dentro do seu limite, no entanto, y pode violar algum de seus limites quando for resolvido o problema reduzido. Para evitar isto assume-se a não degenerescência das variáveis y , ou seja,

$$l_y < y < u_y \quad (3.28)$$

onde l_y e u_y são os limites inferiores e superiores das variáveis básicas y . Com isto pode-se garantir que uma pequena variação em z implique que y satisfaça

$$l_y \leq y \leq u_y$$

O gradiente de F , chamado gradiente reduzido, é $(\nabla_z F)^T = (\nabla_z f)^T - \pi^T (\nabla_z h)$ onde $\pi^T = -(\nabla_y f)^T B^{-1}$. A direção de busca para a variável não básica z_i é $-(\nabla_{z_i} F)$ se z_i não está em um dos seus limites e se está, a direção de busca, d_i é 0. Para variáveis básicas y , a direção de busca pode ser calculada por

$$d_y = -(\nabla_y h)^{-1} \nabla_z h d \quad (3.29)$$

(Luenberger, 1986). Neste procedimento, o novo ponto é encontrado ao longo da tangente à superfície das restrições no ponto x_K , podendo cair fora da superfície. Então deve ser utilizado um procedimento de correção para obter-se um ponto factível. O processo Newton-Raphson é geralmente utilizado para este passo de correção (Bazaraa *et al.*, 1943). Mais

informações sobre este método podem ser encontradas em Lasdon *et al.* (1974).

3.5.2 Método de *Branch and Bound* (B&B)

Quando se fala em otimização discreta, uma questão que surge é o número de combinações possíveis de variáveis inteiras, que pode ser muito grande, tornando inviável a enumeração completa de todas elas. O método de B&B é de enumeração implícita, que utiliza o conceito de dividir e conquistar.

Aqui é apresentado o funcionamento básico do método de B&B para problemas com variáveis binárias. Considere-se o problema não linear inteiro misto

$$\text{Min } f(x, y) \quad (3.30)$$

$$\text{s.a. } h(x, y) = 0 \quad (3.31)$$

$$x \in B^m \quad (3.32)$$

$$y \in \mathbb{R}^n \quad (3.33)$$

onde x é um vetor com m variáveis binárias, enquanto que y é vetor com n variáveis reais. S é o conjunto união de B^m e $\mathbb{R}^n$.

Seja $S = S_1 \cup \dots \cup S_K$ a decomposição de S em conjuntos menores, e seja z^k o valor ótimo do problema 3.30-3.33 impondo-se que os vetores x e y estejam em S_k ao invés de estarem em S . Pode-se, então, afirmar que o valor ótimo z^* para o problema 3.30-3.33 é o valor máximo entre os z^k 's, $k = 1, \dots, K$.

A afirmação anterior menciona o valor ótimo z^k para um subproblema. Vale mencionar que para o problema descrito neste trabalho, o de despacho ótimo, que se trata de um problema não convexo, portanto, os valores ótimos globais dos subproblemas nem sempre são encontrados através de uma busca local, o GRG, e neste caso, estão sendo tratados ótimos

locais.

O método é baseado em 3 princípios básicos, a saber, Ramificação, Identificação de limites e Sondagem. O processo de Ramificação é o de dividir o problema em subproblemas. O problema 3.30-3.33 pode ser dividido, ou ramificado, em dois subproblemas, inserindo-se $x_1 = 0$ e $x_1 = 1$:

$$\text{Min } f(x, y) \quad (3.34)$$

$$\text{s.a. } h(x, y) = 0 \quad (3.35)$$

$$x_1 = 0 \quad (3.36)$$

$$x_i \in [0, 1] \quad (3.37)$$

$$y \in \mathbb{R}^n \quad (3.38)$$

e

$$\text{Min } f(x, y) \quad (3.39)$$

$$\text{s.a. } h(x, y) = 0 \quad (3.40)$$

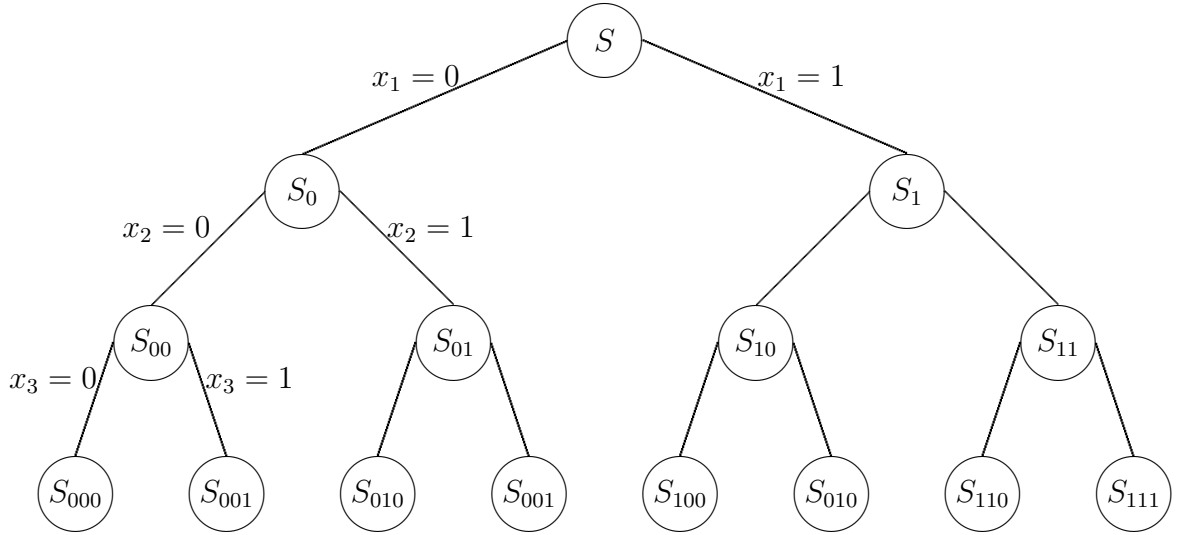
$$x_1 = 1 \quad (3.41)$$

$$x_i \in [0, 1] \quad (3.42)$$

$$y \in \mathbb{R}^n \quad (3.43)$$

onde $i = 2, \dots, m$. O valor ótimo do problema 3.30-3.33 é o menor valor (minimização) entre os valores ótimos dos problemas 3.34-3.38 e 3.39-3.43. Assim por diante, pode-se dividir os subproblemas 3.34-3.38 e 3.39-3.43 em outros subproblemas. Caso fossem enumerados todos os subproblemas, teria-se a árvore de enumeração completa. A Figura 3.4 ilustra uma árvore de enumeração completa para o problema 3.30-3.33 quando $m = 3$.

Cada subproblema é resolvido realizando-se a relaxação de variáveis. No subproblema 3.34-3.38, fixada a variável $x_1 = 0$, a relaxação é realizada nas variáveis x_i , $i = 2, \dots, m$, tornando-as variáveis reais pertencentes ao intervalo $[0, 1]$.



Fonte: Wolsey (1998)

Figura 3.4: Árvore de Enumeração Binária

Em cada um dos novos subproblemas são encontrados limites que indicam onde o valor ótimo deste subproblema está localizado. O limite inferior (no caso de problema de minimização) é obtido fazendo-se a relaxação do problema. O limite superior é uma solução factível para o subproblema inteiro. Este é o processo de Identificação dos limitantes e os limites são importantes para a eliminação de ramos. Condições para a eliminação de ramos são dadas na sequência.

Um subproblema pode ser “conquistado” e, então, eliminado (ou sondado) para que os subproblemas subsequentes não necessitem serem resolvidos. Este é o processo de sondagem. São três as condições para eliminar um ramo da árvore de enumeração dos subproblemas. Para duas dessas condições, utiliza-se a definição de solução incumbente – que se trata da melhor solução factível para o problema 3.30-3.33 encontrada até o atual momento da busca.

Seja z^* o valor da função objetivo da solução incumbente atual. Um subproblema é, então, eliminado se

1. O valor da solução incumbente atual for menor que a solução ótima do subproblema

relaxado

2. O subproblema relaxado não tem soluções factíveis
3. A solução para o subproblema relaxado é factível para o problema 3.30-3.33. Neste caso tem-se que os limites inferior $\underline{z}^k$ e superior $\overline{z}^k$ são iguais. Um critério comumente adotado é o de eliminação do ramo quando $|\underline{z}^k - \overline{z}^k| < \epsilon$. Neste caso, sabe-se que a solução $\underline{z}^k$ é, no máximo, ϵ maior que a solução ótima do subproblema. Se esta solução for melhor que a da incumbente atual, então troca-se a atual por esta solução e, então, o teste 1 é reaplicado para todos os subproblemas não eliminados.

Encontrados os ótimos dos subproblemas, a solução ótima é a melhor entre eles. Para maiores detalhes sobre o método, ver Hillier e Lieberman (1995).

3.5.3 Busca global

O programa *Lingo 8.0* possui um método de busca global que utiliza técnicas que realizam a convexificação do problema e um algoritmo de B&B para dividir o problema em vários subproblemas convexos (Lingo, 2003).

Gau e Schrage (2003) descrevem os procedimentos deste método de busca global. Estes procedimentos consistem, basicamente, em

1. converter o problema original não linear e não convexo em vários subproblemas convexos utilizando análise *Convex*, *Interval* e *Algebraic* (Gau e Schrage, 2003).
2. utiliza uma técnica de B&B para a busca sobre estes subproblemas

As análises no intervalo e de convexidade são realizadas para a limitação da região factível e da função objetivo. A análise algébrica reformula o problema em um melhor formato.

Gau e Schrage (2003) apresentam formas de linearização e convexificação de algumas funções específicas e indicam que, para funções gerais, a convexificação da função objetivo se dá criando um hiperplano tangente à função em um ponto, de forma que este hiperplano seja um limitante inferior (minimização) da função objetivo.

O algoritmo da busca global é baseado no de B&B. Um ramo (subproblema) é sondado quando:

- o subproblema relaxado¹ é infactível;
- é factível mas o valor da função objetivo não é melhor que a solução incumbente;
- é factível e o valor da função objetivo é melhor que o da incumbente – neste caso atualiza-se a solução incumbente.

Realiza-se a ramificação quando:

- a solução encontrada é factível para o subproblema relaxado, mas não é factível para o subproblema corrente (não relaxado); ou
- os valores das funções objetivo (dos problemas relaxado e não relaxado) são consideravelmente diferentes².

¹Diz-se, neste caso, que um problema é relaxado quando foi convexificado através das técnicas descritas anteriormente.

²A diferença entre os valores das funções objetivo são maiores que uma tolerância especificada.

Capítulo 4

Tratamento dos dados de eficiência

4.1 Introdução

Para a formulação proposta, existe a necessidade da obtenção de curvas que representem os dados discretos de eficiência das UGs. Uma alternativa interessante para isto é a interpolação por *spline* cúbica, comentada anteriormente. Entretanto, a presença destas curvas aumenta o número de variáveis inteiras na formulação, tornando mais demorada a solução do problema.

O método dos mínimos quadrados (MMQ) é mais conveniente neste caso, pois pode-se calcular um polinômio aos pontos dados obtendo-se apenas uma expressão para todo o domínio de interesse, e não um conjunto de polinômios, como é o caso da *spline*.

Alguns fatores podem ser adicionados no ajuste com a imposição de condições para alguns pontos. Estas condições podem ser a derivada nula ou interpolação para pontos importantes no conjunto de dados.

4.2 Método dos Mínimos Quadrados

Dados N pontos (x_i, y_i) em um plano, o objetivo é encontrar o polinômio $F(x) = a_k x^k + a_{k-1} x^{k-1} + \dots + a_1 x + a_0$, $k \geq 1$, que melhor se aproxime aos pontos dados, ou seja, que minimize os erros entre o polinômio e os pontos. Nota-se que, se $N = k$, o polinômio interpolará os N pontos, e por isto impõe-se que $N > k$. No MMQ o erro a ser minimizado é o erro quadrático, ou o quadrado dos erros, dado por

$$E = \sum_{i=1}^N (y_i - F(x_i))^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - a_k x_i^k - a_{k-1} x_i^{k-1} - \dots - a_1 x_i - a_0)^2. \quad (4.1)$$

É possível mostrar que o vetor

$$a = \begin{bmatrix} a_k \\ a_{k-1} \\ \vdots \\ a_0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

que minimiza E na equação 4.1 é o que resolve o sistema linear de tamanho $(k+1) \times (k+1)$:

$$A^T A a = A^T Y, \quad (4.3)$$

sendo

$$A = \begin{bmatrix} x_1^k & x_1^{k-1} & \dots & 1 \\ x_2^k & x_2^{k-1} & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N^k & x_N^{k-1} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

e

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

4.3 Condições para pontos específicos

Quando aproximam-se curvas a pontos dados, certas vezes vê-se a importância da imposição de algumas condições para pontos considerados importantes, seja pela acurácia com que

foram medidos, sua importância física ou fins a que se destinam as curvas aproximadas.

Esteves *et al.* (2006) descreveram um modelo matemático para calcular curvas colinas de UGs de UHEs. O trabalho cita a importância do ponto ótimo de eficiência da curva colina. Impõe-se que a superfície aproximante interpole este ponto e as derivadas parciais nele sejam nulas. Isto é realizado para garantir que o ponto ótimo da superfície coincida com o ponto ótimo dos dados discretos. Na formulação do despacho, utilizaram-se os dados no plano. Descreve-se, em seguida, tais condições para o ponto ótimo de eficiência de uma UG no $\mathbb{R}^2$.

Para efeito de simplificação, realizou-se uma modificação nos pontos. Subtraiu-se, inicialmente, de todos x_i 's a quantidade x_s e de todos y_i 's a quantidade y_s ; com isto, o ponto (x_s, y_s) (o ponto de maior eficiência) foi transferido para a origem do sistema de coordenadas. Estes novos pontos $(x_i - x_s, y_i - y_s)$ foram denotados como (X_i, Y_i) . Seja

$$f(X) = b_k X^k + b_{k-1} X^{k-1} + \dots + b_1 X + b_0 \quad (4.6)$$

o polinômio que aproximará os pontos (X_i, Y_i) com $i = 1, \dots, n$. Em seguida, são descritas as condições de interpolação e derivada nula.

- *Condição de interpolação.* No ajuste dos N pontos dados, considere-se um ponto a ser interpolado. Este ponto é (x_s, y_s) mencionado acima, mas, ao invés dele, o importante agora é $(X_s, Y_s) = (0, 0)$. Substituindo-se no polinômio 4.6 obtém-se que $f(X) = b_k 0^k + b_{k-1} 0^{k-1} + \dots + b_1 0 + b_0 = 0$, o que implica $b_0 = 0$.
- *Derivada nula no ponto de ótimo.* Seja, ainda, o ponto (x_s, y_s) ; o seguinte procedimento mostra detalhes para tornar nula a derivada do polinômio aproximante neste ponto. Derivando o polinômio 4.6 obtém-se

$$\frac{df(X)}{dX} = k b_k X^{k-1} + (k-1) b_{k-1} X^{k-2} + \dots + b_1. \quad (4.7)$$

Igualando 4.7 a zero e aplicando o ponto $(X_s, Y_s) = (0, 0)$ obtém-se que $b_1 = 0$.

A partir de $f(X)$, para encontrar o polinômio $F(x)$ correspondente aos N pontos iniciais (x_i, y_i) , realiza-se a substituição $X = x - x_s$ e soma-se à função $f(x - x_s)$ a parcela y_s , como é mostrado na sequência

$$F(x) = f(\underbrace{x - x_s}_X) + y_s. \quad (4.8)$$

4.4 Medidas de análise de ajuste

Algumas medidas foram utilizadas para as análises do ajuste, que são a média absoluta, a média aritmética dos erros e o coeficiente de correlação de Pearson. Seja $y'_i = F(x_i)$ a aproximação de y_i , para $i = 1, \dots, N$. A média aritmética dos erros é dada por

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)}{N}, \quad (4.9)$$

enquanto que a média absoluta dos erros é

$$Mab = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - y'_i|}{N}. \quad (4.10)$$

O coeficiente de correlação de Pearson r é calculado como segue

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y})(y'_i - \bar{y}')] }{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y'_i - \bar{y}')^2}} \quad (4.11)$$

onde $\bar{y}$ e $\bar{y}'$ são as médias

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (4.12)$$

e

$$\bar{y}' = \frac{\sum_{i=1}^N y'_i}{N}. \quad (4.13)$$

Este coeficiente pode assumir valores entre -1 e 1. Se $r = 1$, as variáveis y_i e y'_i possuem correlação linear positiva perfeita, isto é, $F(x)$ se ajustou perfeitamente aos pontos. Se $r = -1$, a correlação entre as variáveis é negativa, ou seja, quando uma aumenta, a outra diminui e, se $r = 0$, as variáveis não dependem linearmente uma da outra. Para os dois últimos casos $F(x)$ não é uma boa aproximação para os pontos.

4.5 Tratamento dos dados de uma hidrelétrica real

Nesta seção são apresentados dados discretos de eficiência das UGs de uma UHE real, que foram aproximados por polinômios. Dois critérios de aproximação foram utilizados, os quais foram denominados ajustes 1 e 2 – que são explicados em seguida nesta seção.

4.5.1 Dados de eficiência

A UHE em estudo possui 6 UGs e os dados que foram chamados atualizados foram obtidos com o auxílio do método Winter Kennedy para medição de vazão. Estes dados são de eficiência em função da potência para altura de queda fixa (ver Tabela 4.1). Para 5 UGs, de números 1, 2, 3, 5 e 6, as medições foram realizadas em altura de queda de 24,8 *m* e, para a quarta UG, a altura de queda correspondente é 20,4 *m*.

Para a altura de queda de 24,8 *m* os dados vão, desde a potência de 50, até 140 *MW*, com exceção das UGs 1 e 2. Os valores limites de potência para as UGs desta usina podem ser diferentes dos valores 50 e 140, mas são estas as potências mínima e máxima consideradas no estudo, justamente por causa da ausência de pontos exteriores a estes limites. As curvas aproximantes podem ter comportamentos não muito realistas fora destes limites pela ausência de pontos para “guiar” a curva.

As eficiências máximas para estes conjuntos de dados são de 92%. Isto provavelmente acontece, porque, na medição, o que se verificava era a diferença entre eficiências correspondentes a potências diferentes, e, a partir daí, escolheu-se uma eficiência máxima de 92% para que todos os pontos de máxima eficiência fossem transferidos para esse valor.

Já para a UG 4 a extensão de dados vai de 50 a 110 *MW*, mas os dados são referentes a uma altura de queda inferior à dos outros dados. Além disto, o valor de eficiência máxima é 90,8%. Estes valores não podem ser inseridos na análise juntamente com os dados das outras

UGs por causa desta diferença de alturas de queda. O que realizou-se foi uma transposição destes dados para uma altura de queda de 24,8 m. Tal transposição é descrita na próxima subseção.

Os dados da curva colina do modelo reduzido, ou de projeto, estavam disponíveis em curvas de nível. Para retirar os dados de eficiência para a altura de queda desejada, utilizou-se papel milimetrado. A Tabela 4.2 mostra estes valores; a partir dela pode-se observar que a eficiência máxima das UGs é provavelmente maior que 94%, diferentemente do mostrado pelos dados atualizados.

Tabela 4.1: Dados atualizados de eficiência

UG	Potência (MW)									
	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	110,00	120,00	130,00	140,00
1 ($H = 24,8m$)	86,52	88,00	89,35	90,50	91,18	91,50	91,85	92,00		
2 ($H = 24,8m$)		87,50	89,00	90,40	91,20	91,65	91,90	92,00	91,90	91,70
3 ($H = 24,8m$)	87,25	88,25	89,20	90,34	91,40	91,90	92,00	91,98	91,81	91,48
4 ($H = 20,4m$)	84,60	87,00	88,87	89,83	90,71	90,80	88,63			
5 ($H = 24,8m$)	87,40	88,40	89,30	90,50	91,50	91,96	92,00	92,00	91,95	91,80
6 ($H = 24,8m$)	85,30	86,75	88,00	89,15	90,10	90,90	91,60	92,00	91,90	91,50

Tabela 4.2: Dados de eficiência de projeto ($H = 24,8 m$)

Potência (MW)	44,60	48,80	54,80	64,00	77,00	113,20	148,00
Eficiência (%)	90,00	91,00	92,00	93,00	93,50	94,00	94,00

4.5.2 Transposição de dados para alturas de queda diferentes

Para a transposição dos dados da UG 4, da altura de queda 20,4 m para 24,8 m, utilizou-se o procedimento indicado na norma NB-228 (1974). A transposição, nesta norma, tem o objetivo de estimar os dados para uma altura de queda H_n , que possui as condições da garantia de rendimento da turbina a partir dos dados referentes a H , condições do ensaio. O procedimento de transposição leva em consideração que, em um mesmo sistema existe a similaridade para alturas de queda diferentes. O fator de escala (equação 2.3), neste caso, é

$C = 1$. Sendo P_t a potência referente a H , a atualização da potência para as condições H_n é retirada da fórmula 2.4 e fica da seguinte forma

$$P_n = P_t \left(\frac{H_n}{H} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (4.14)$$

Extrapolados os valores para serem referentes a H_n , a eficiência pode ser calculada pela fórmula 2.6. Como os dados das 5 UGs (1,2,3,5 e 6) referentes a $H_n = 24,8 \text{ m}$ estão com um ponto máximo de eficiência de 92%, e a eficiência máxima dos dados da UG 4 está em um valor abaixo disto, os dados desta UG, após extrapolados para $H_n = 24,8 \text{ m}$, foram transpostos de forma que o ponto de máxima eficiência estivesse em 92%. A Figura 4.1 mostra os dados atualizados originais ($H_t = 20,4 \text{ m}$) e os extrapolados (e transpostos) para $H_n = 24,8 \text{ m}$. A Tabela 4.3 possui os dados da UG 4 já transpostos que foram utilizados nos ajustes.

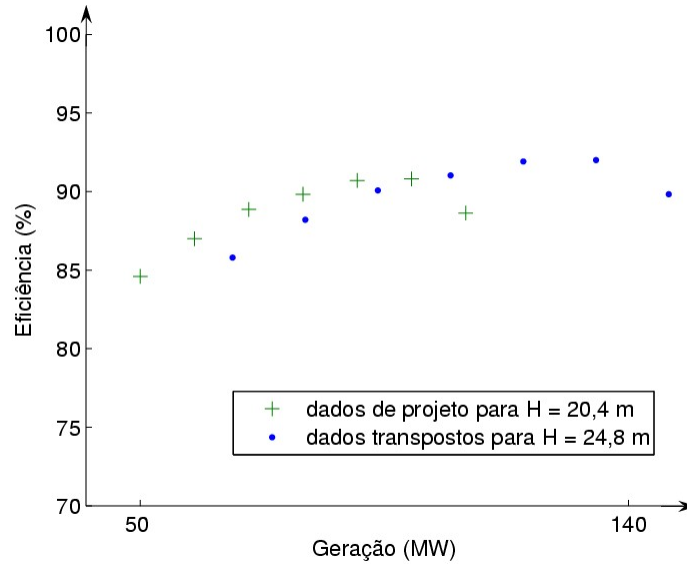


Figura 4.1: Dados de eficiência da UG 4 para $H = 20,4 \text{ m}$ e transpostos para $H = 24,8 \text{ m}$

Tabela 4.3: Dados de eficiência da UG 4 transpostos para $H = 24,8 \text{ m}$							
Potência (MW)	67,02	80,42	93,83	107,23	120,64	134,04	147,44
Eficiência (%)	85,80	88,20	90,07	91,03	91,91	92,00	89,83

4.5.3 Ajustes polinomiais dos dados

No primeiro ajuste polinomial aos dados, utilizou-se o MMQ simples, enquanto que no segundo foram inseridas as condições de interpolação do ponto de maior eficiência e derivada nula neste ponto. Os dados ajustados foram os das UGs 1,2,3,5 e 6 da Tabela 4.1, da UG 4 na Tabela 4.3 e dos dados de projeto da Tabela 4.2.

No Ajuste 2 os valores de máximo das curvas ficam determinados pelos pontos de derivada nula. Este valor não é garantido ser o máximo em toda a extensão do domínio de interesse, porque a curva pode crescer em outros valores de potência diferentes da potência referente ao ponto de máximo dos pontos. A Figura 4.6, por exemplo, mostra os polinômios aproximados segundo os ajustes 1 e 2 ao conjunto de dados da UG 3. Vê-se um leve crescimento da curva do Ajuste 2 nas proximidades do limite máximo de geração. Se o limite máximo de geração adotado fosse maior, esta curva cresceria mais, podendo chegar a valores maiores que o máximo conhecido de 92%.

No Ajuste 1 dos dados da UG 1, foram inseridos dois pontos, referentes a 130 e 140 *MW* (Figura 4.2). Isto, justamente, porque, após a potência de 120 *MW*, que possui a máxima eficiência da UG no Ajuste 1, a curva assume valores cada vez maiores. O ponto estimado referente a 130 *MW* é uma média entre os valores de eficiência das UGs 2, 3, 5 e 6, subsequentes ao ponto de máximo das mesmas. O ponto de 140 *MW* é uma média dos pontos subsequentes aos pontos mencionados acima (para as UGs 2, 3, 5 e 6). Para o Ajuste 2 não houve a necessidade da inserção de tais pontos, porque a curva tem uma tendência decrescente após o ponto máximo (figuras 4.2 e 4.3).

No Ajuste 1 não há condições quaisquer para a imposição do ponto de máximo. A Tabela 4.4 nos fornece os pontos de máxima eficiência para as curvas do Ajuste 1 em comparação com as eficiências máximas dos pontos dados. Os valores de máxima eficiência dos dados atualizados, para o Ajuste 1, foram diferentes de 92%, sendo os valores com maior discrepância

os das UGs 4 e 5, que foram 92,12% e 92,11%. Com relação às potências referentes aos pontos de máximo, os dados foram mais dispersos ainda, principalmente para as UGs 4 e 6.

Nos dados de projeto não existe um valor de máxima eficiência, apenas sabe-se que o mesmo se encontra entre 113,2 e 148 *MW*. Por esta razão, utilizou-se apenas o Ajuste 1 para estes dados. O ponto de máximo no ajuste foi de 94,42% para a potência de 134,84 *MW*.

Para a UG 5 existem dois pontos de máximo, em 110 e 120 *MW*. Provavelmente o ponto de máximo encontra-se entre estes dois valores, mas este seria mais de 92%, o que faria com que esta UG fosse mais recorrida nas otimizações. Por conta disto, optou-se, como máxima para o Ajuste 2, a eficiência referente à potência de 120 *MW*.

Tabela 4.4: Valores de máxima eficiência e suas respectivas potência (dados e curva do Ajuste 1)

		UG 1	UG 2	UG 3	UG 4	UG 5	UG 6	Projeto
Dados	Potência (<i>MW</i>)	120,00	120,00	110,00	134,04	110,00 e 120,00	120,00	–
	Eficiência (%)	92,00	92,00	92,00	92,00	92,00	92,00	–
Ajuste 1	Potência (<i>MW</i>)	119,83	117,19	111,88	127,40	111,40	125,35	134,84
	Eficiência (%)	91,96	91,99	92,09	92,12	92,11	92,01	94,42

A Tabela 4.5 informa acerca dos erros e da qualidade do ajuste. As informações são coeficientes de correlação linear, erros médios e erros absolutos médios. Os erros são mostrados para todos os pontos e para dois conjuntos de pontos, os de eficiência menores que 91% e os de eficiência maiores ou iguais a 91%.

Os coeficientes de correlação linear são todos maiores que 0,99, certamente, porque o número de pontos a serem aproximados é pequeno. Os melhores ajustes, segundo os coeficientes de correlação, como esperado, são os do Ajuste 1. Mesmo para a UG 1 onde foram inseridos 2 pontos estimados, o coeficiente de correlação do Ajuste 1¹ é maior do que o do Ajuste 2.

¹Para o cálculo do coeficiente de correlação e das medidas de erro para a UG 1 não foram considerados os pontos adicionais. Estes só foram utilizados para o cálculo da curva aproximante com o Ajuste 1.

Os erros médios totais do Ajuste 1 estão por volta de 10^{-16} , com exceção da UG 1 que tem valor próximo de 10^{-5} . Para o Ajuste 2 os erros médios estão próximos de 10^{-4} . Para os valores nas duas faixas de eficiência (valores maiores e menores de 91%) os dois ajustes são muito próximos, com vantagem para o Ajuste 1, a não ser pela UG 2, que no Ajuste 2 e eficiência menor que 91%, o erro médio está próximo de 10^{-9} . Resumindo, de maneira geral, o Ajuste 1 tem menores erros médios. No entanto, esta não é uma medida de erro muito eficaz para as análises, visto que erros grandes positivos podem se anular com erros grandes negativos. Em seguida tem-se a descrição dos erros absolutos médios.

Por serem médias de valores positivos, os erros médios absolutos são uma medida de erro mais interessante do que os erros médios. Na Tabela 4.5 vê-se que as médias absolutas para os dois ajustes são muito próximas, e, nas proximidades de 10^{-4} , com maior variação para as UGs 4, 5 e 6, que, para o Ajuste 2, os erros foram de 10^{-3} e do Ajuste 1, de 10^{-4} .

Tabela 4.5: Medidas de erro e ajuste dos dados atualizados das UGs

UG (ajuste)	Coef. de Correl. Linear	Média dos erros			Média absoluta dos erros		
		Total	$\eta \geq 91\%$	$\eta < 91\%$	Total	$\eta \geq 91\%$	$\eta < 91\%$
1 (aj. 1)	0,99929	-1,75E-05	1,07E-04	-1,42E-04	6,17E-04	6,34E-04	6,01E-04
1 (aj. 2)	0,99927	-1,52E-04	1,35E-04	-4,40E-04	5,89E-04	5,57E-04	6,22E-04
2 (aj. 1)	0,99943	2,47E-16	4,23E-05	-2,12E-05	4,19E-04	7,03E-04	2,78E-04
2 (aj. 2)	0,99925	-1,12E-05	-3,36E-05	4,09E-09	4,20E-04	8,27E-04	2,17E-04
3 (aj. 1)	0,99915	-6,66E-17	-1,97E-04	1,31E-04	6,05E-04	6,40E-04	5,81E-04
3 (aj. 2)	0,99866	2,71E-04	-2,64E-04	6,28E-04	8,09E-04	7,57E-04	8,43E-04
4 (aj. 1)	0,99899	-4,28E-16	1,64E-04	-2,18E-04	7,79E-04	8,46E-04	6,91E-04
4 (aj. 2)	0,97159	2,28E-04	-2,29E-03	3,58E-03	4,14E-03	4,55E-03	3,58E-03
5 (aj. 1)	0,99877	-3,11E-16	-1,81E-04	1,21E-04	6,94E-04	6,72E-04	7,09E-04
5 (aj. 2)	0,99534	3,04E-04	-4,02E-04	7,74E-04	1,21E-03	9,14E-04	1,41E-03
6 (aj. 1)	0,99991	1,67E-16	-5,44E-05	8,16E-05	2,38E-04	1,47E-04	3,74E-04
6 (aj. 2)	0,99688	-4,09E-04	-7,97E-04	1,71E-04	1,56E-03	1,78E-03	1,23E-03

Em geral o Ajuste 1 tem uma melhor aproximação aos pontos, pois possui menores erros e maiores coeficientes de correlação em comparação com o Ajuste 2. Entretanto o Ajuste 2 tem a vantagem de os pontos de máximo das curvas coincidirem com os pontos ótimos dos dados. Na sequência, são mostrados os gráficos dos ajustes aos pontos.

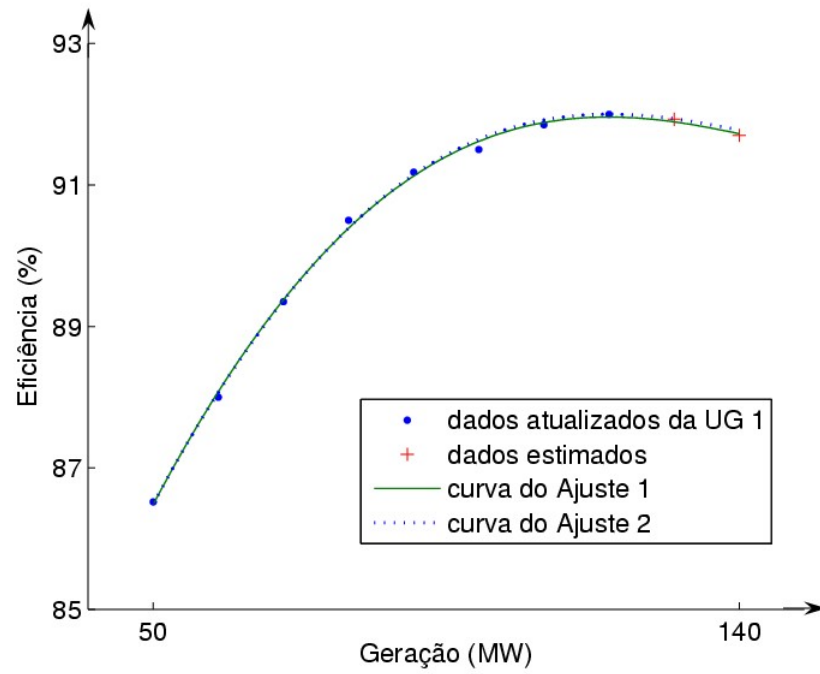


Figura 4.2: Curvas de eficiência da UG 1

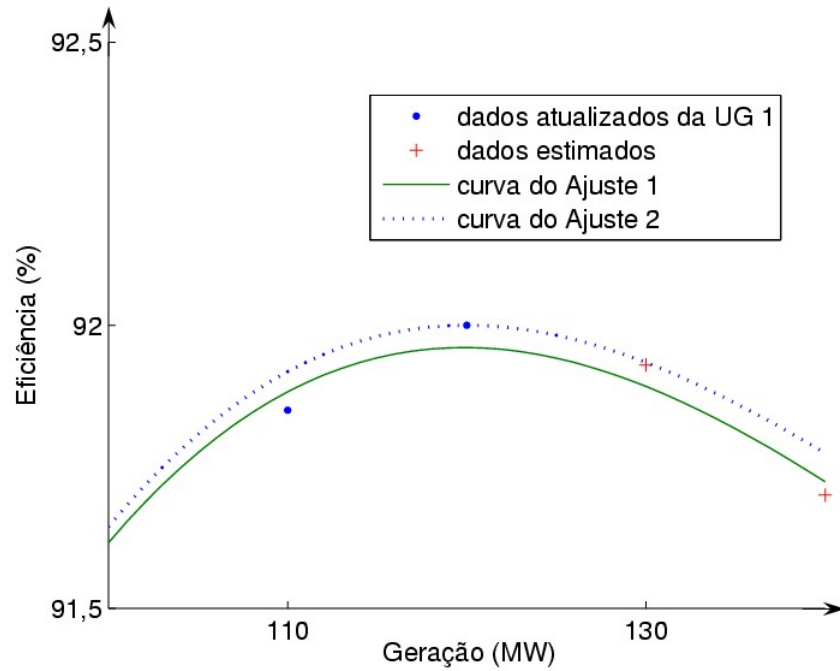


Figura 4.3: Curvas de eficiência da UG 1 – aproximação à região de maiores eficiências

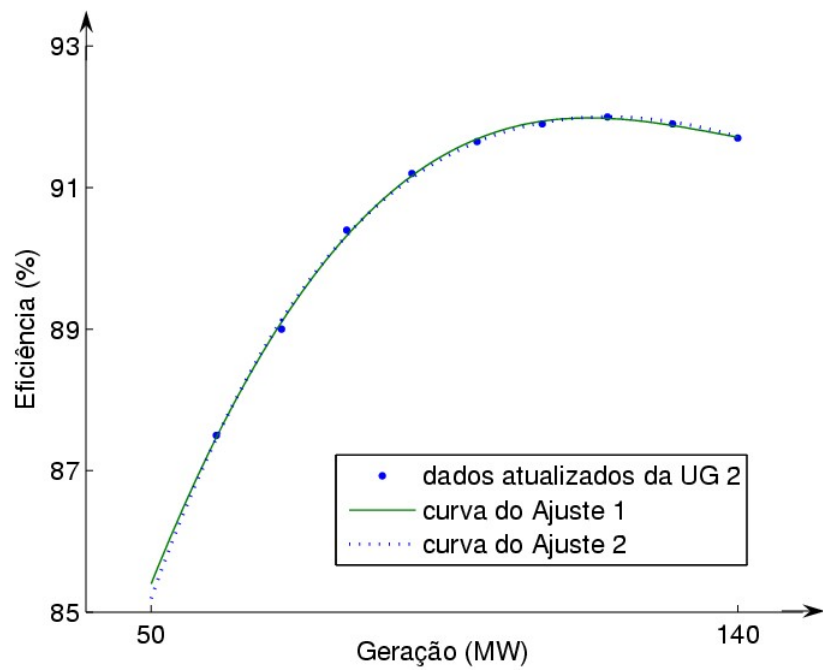


Figura 4.4: Curvas de eficiência da UG 2

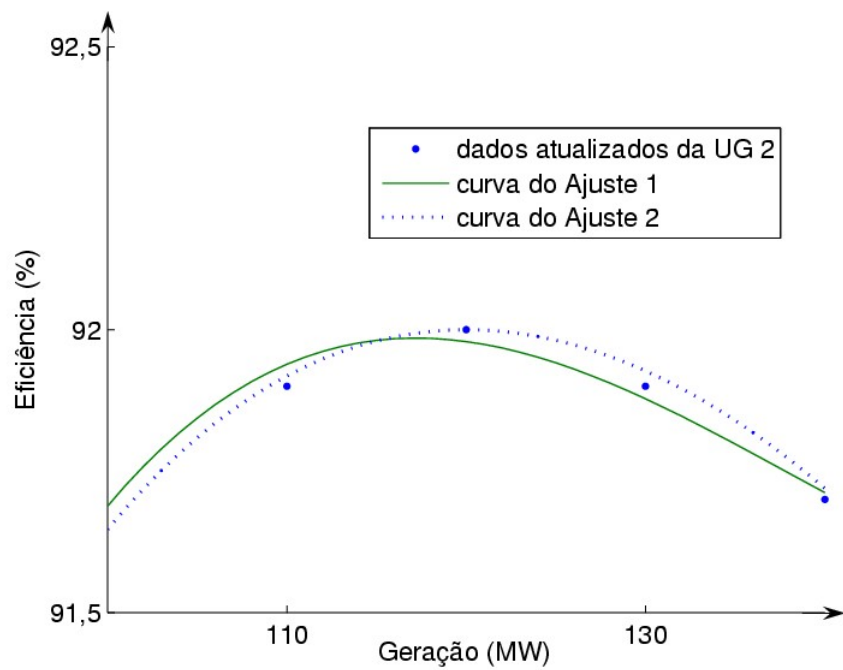


Figura 4.5: Curvas de eficiência da UG 2 – aproximação à região de maiores eficiências

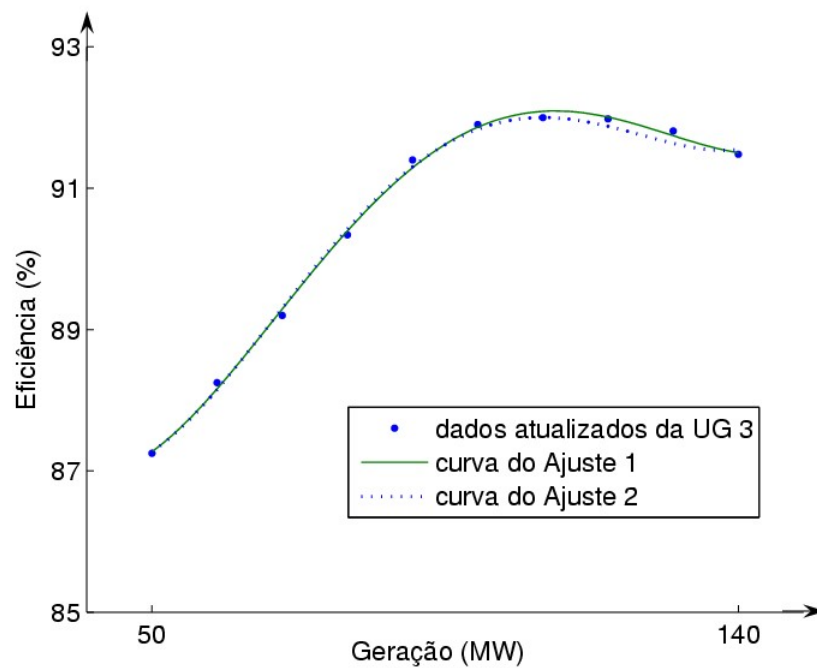


Figura 4.6: Curvas de eficiência da UG 3

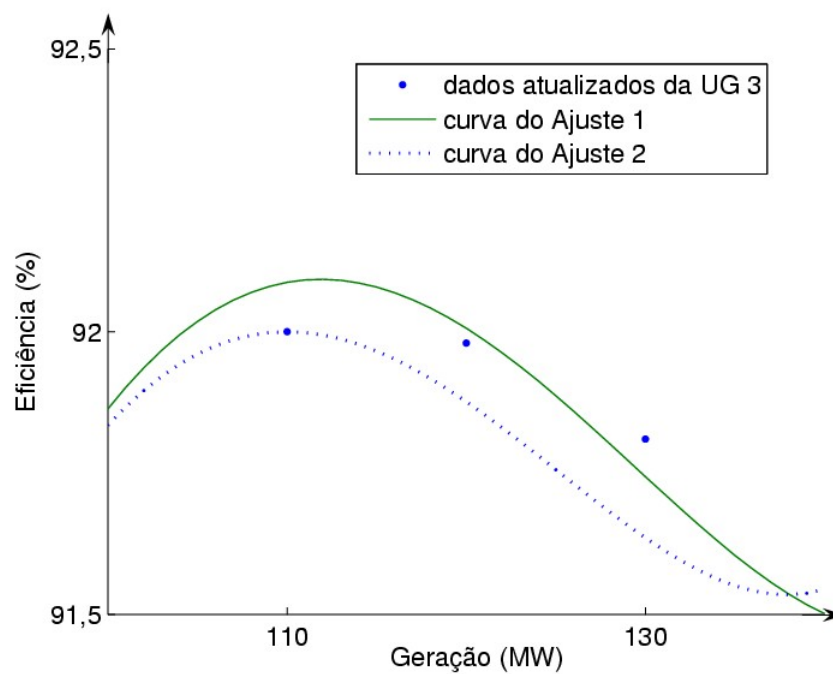


Figura 4.7: Curvas de eficiência da UG 3 – aproximação à região de maiores eficiências

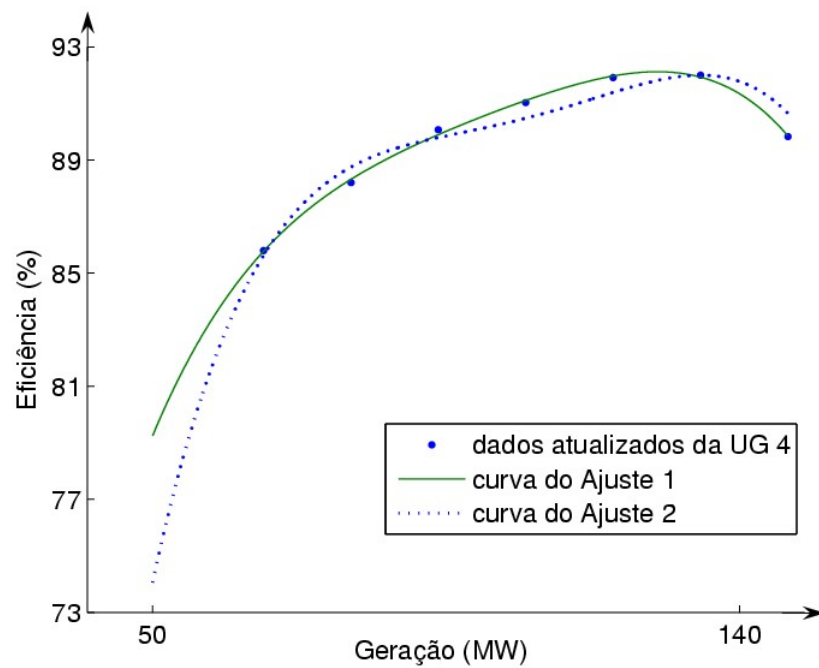


Figura 4.8: Curvas de eficiência da UG 4

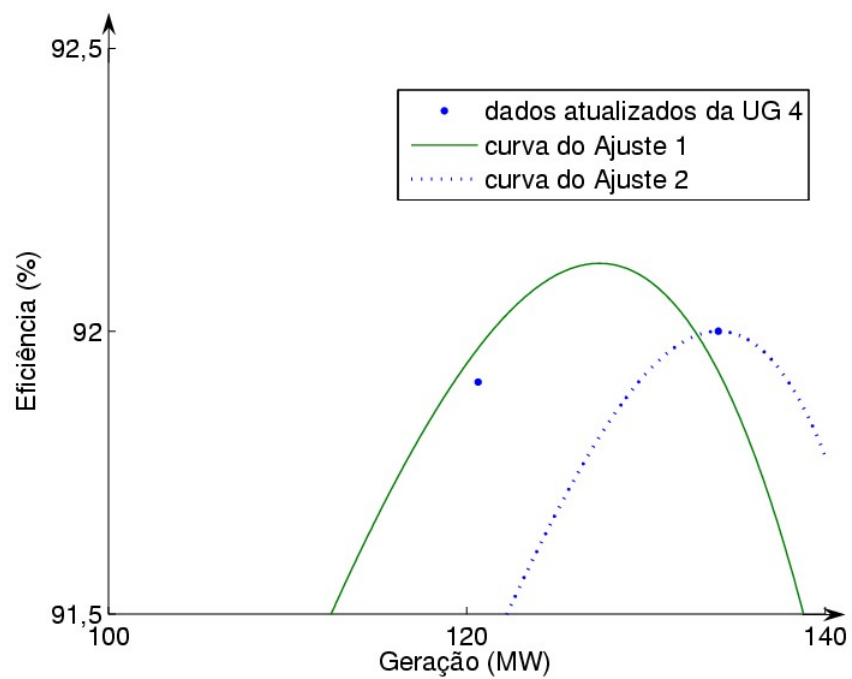


Figura 4.9: Curvas de eficiência da UG 4 – aproximação à região de maiores eficiências

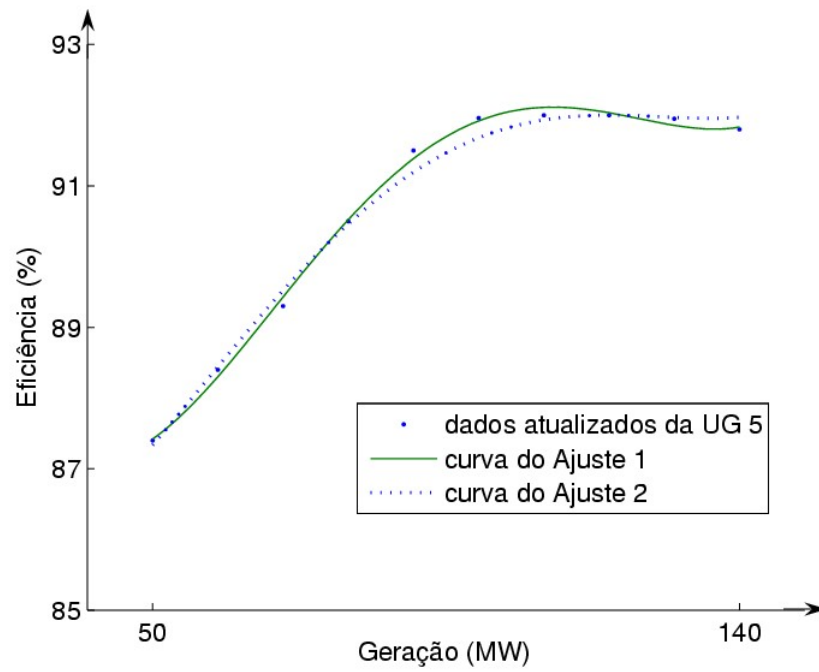


Figura 4.10: Curvas de eficiência da UG 5

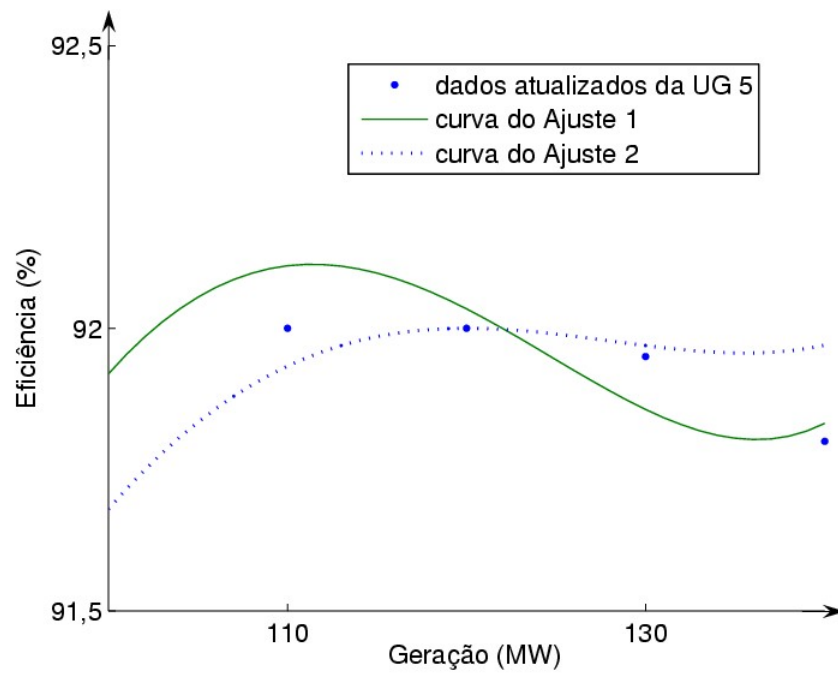


Figura 4.11: Curvas de eficiência da UG 5 – aproximação à região de maiores eficiências

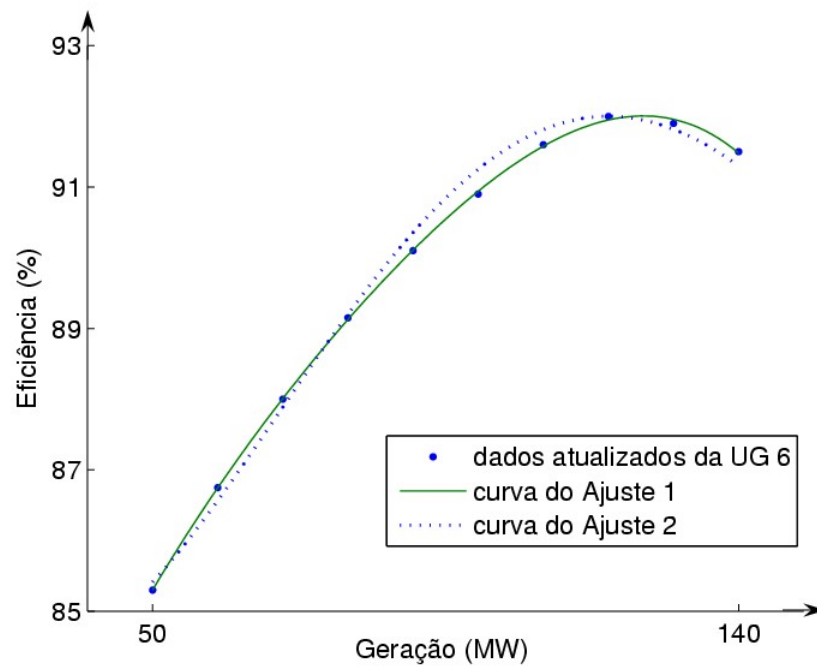


Figura 4.12: Curvas de eficiência da UG 6

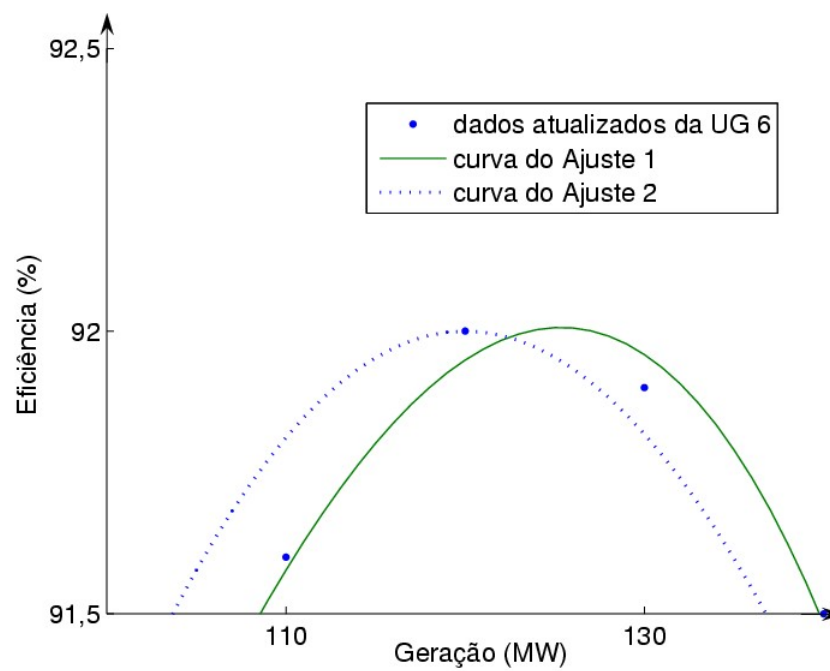


Figura 4.13: Curvas de eficiência da UG 6 – aproximação à região de maiores eficiências

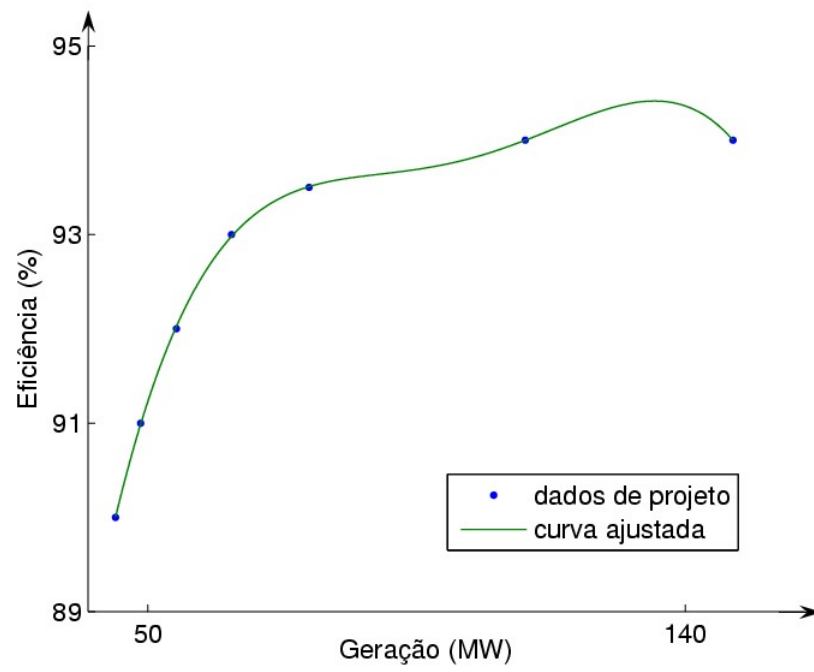


Figura 4.14: Eficiência de projeto

Capítulo 5

Resultados

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com as otimizações realizadas com os dados mostrados no Capítulo 4. Primeiramente, são comparados os resultados referentes aos métodos de busca global e local. O programa utilizado para as simulações foi o *Lingo 8.0*. Em seguida, são mostradas e comparadas as eficiências obtidas com o despacho, considerando as eficiências das UGs como sendo os dados de projeto e os atualizados (ajustes 1 e 2). Na sequência, são estimados os ganhos de eficiência que se pode obter em um dia de operação. Por último, apresenta-se uma discussão do número de UGs ativas em relação aos valores de demanda.

Os limites mínimo e máximo de geração das 6 UGs da UHE em estudo são de 50 e 140 *MW*. Assim, a UHE pode gerar de 50 *MW*, com apenas uma UG, até 840 *MW*, com todas as UGs na geração máxima. Para as otimizações fixou-se um valor de reserva girante mínima de $R = 50MW$, restringindo, assim, a geração máxima da UHE para 790 *MW*. Variando valores de 10 em 10 *MW*, partindo de 50 *MW* até 790 *MW*, foram construídas tabelas referentes aos despachos com estes valores de demanda, que são apresentadas no apêndice. A altura de queda dos dados é de 24,8 *m*.

5.2 Buscas local e global

Nesta seção são comparadas as eficiências obtidas com buscas global e local. As eficiências consideradas são as dos ajustes 1 e 2. Não foram realizadas comparações com relação ao método de busca para a otimização com dados de projeto.

O método de busca local demorou poucos segundos, no máximo 5, para a otimização com cada valor de demanda até sua finalização, fornecendo uma configuração ótima. O método de busca global, por ser mais refinado, buscando um ótimo global para o problema, foi mais demorado.

Para a busca global utilizou-se um critério de parada de 10 minutos, quando necessário, isto é, quando o método não foi finalizado em menos de 10 minutos. Este critério foi utilizado, porque o método, na maioria dos casos, para o problema em estudo encontrou uma solução em um período curto de tempo, em geral, menor que 1 minuto, e, depois de horas buscando não encontrou uma solução melhor. O motivo desta demora pode ser por causa de um dos motivos indicados na Subseção 3.5.3 para a ramificação de um problema em novos subproblemas.

A Figura 5.1 mostra o esquema de comparação das eficiências obtidas com os tipos de busca. Os dados atualizados são utilizados na otimização, obtendo a configuração de UGs XAL , e a eficiência global da UHE NAL com a busca local. Por outro lado, utilizou-se a busca global, obtendo-se, assim, XA e NA . A partir daí, são comparados NA e NAL . Isto é realizado separadamente para os ajustes 1 e 2, indicado por Ajuste i na figura.

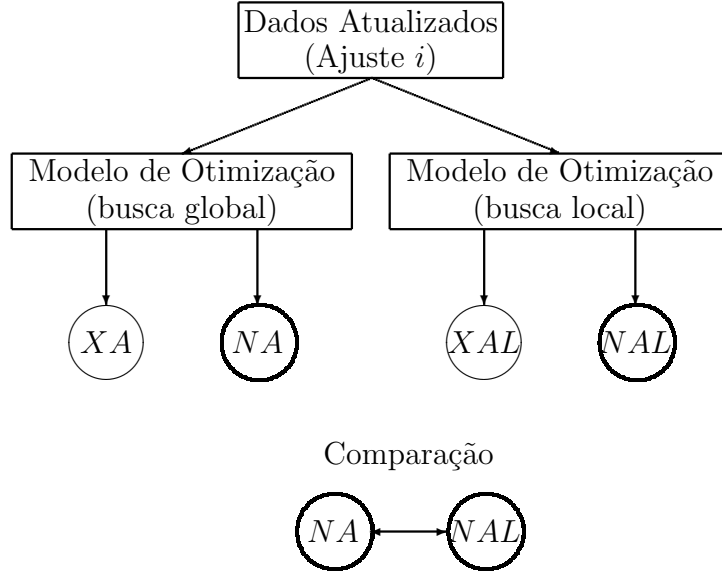


Figura 5.1: Comparação dos resultados das buscas local e global

A Figura 5.2 mostra NA e NAL quando se está utilizando o Ajuste 1. A linha contínua da Figura 5.4 mostra a diferença $NA - NAL$ para o mesmo ajuste. A eficiência obtida com a busca global (NA) foi, em média, 0,0841% maior que a obtida com a busca local (NAL)¹. Esta diferença chega, no máximo, nas proximidades de 1%.

Já para o Ajuste 2 (Figura 5.3) a diferença entre as eficiências NA e NAL são, em geral, maiores do que as encontradas para o Ajuste 1, com uma média de 0,21%, chegando a diferenças próximas de 1,7%.

Os resultados da busca local e global para o Ajuste 1 estão nas tabelas A.3 e A.2, respectivamente. A título de exemplo, considere-se a demanda de 520 MW . Para as buscas local e global com o Ajuste 1, a eficiência da UHE é $NA = NAL = 91,82\%$. Pode haver diferença da ordem de 10^{-3} entre estas eficiências, mas uma diferença deste tipo não é

¹Para o cálculo do ganho médio de eficiência, foram tomadas as eficiências referentes a valores discretos de 10 em 10 MW .

representativa neste caso. A geração das UGs determinadas pela busca local é

$$XAL = (99, 94; 100, 51; 101, 65; - ; 100, 43; 117, 47) \quad (5.1)$$

sendo que ‘-’ indica que a UG não está ativa. A geração, em *MW*, determinada pela busca global é

$$XA = (97, 99; 99, 06; 100, 65, 122, 90; 99, 40; -). \quad (5.2)$$

A maior diferença entre as configurações foi justamente a escolha da UG parada, que, na primeira busca, foi referente à UG 4, e na segunda, à UG 6.

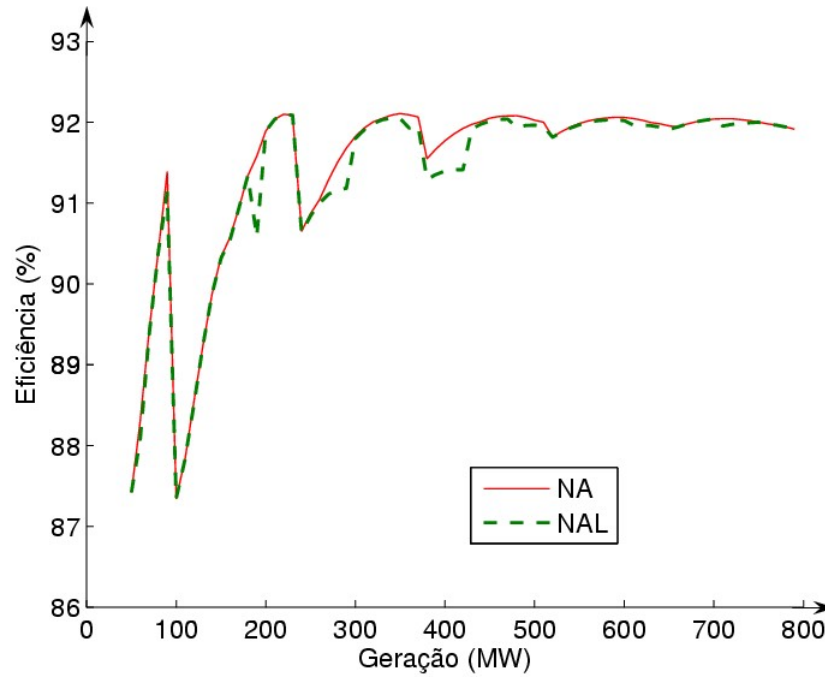


Figura 5.2: Resultados das buscas local e global – Ajuste 1

Para o Ajuste 2 as tabelas que possuem informações referentes às buscas local e global são A.9 e A.8, respectivamente. Para a mesma demanda do exemplo dado anteriormente, com a busca local, a eficiência da UHE é $NAL = 91,32\%$, enquanto que, para a busca global, essa eficiência é de $NA = 91,79\%$. Isto significa que existe um ganho de $0,47\%$ com a busca

global. A configuração determinada pela busca local é

$$XAL = (120, 00; 120, 00; 110, 00; - ; 120, 00; 50, 00). \quad (5.3)$$

Percebe-se que o método buscou os valores 120 *MW* e 110 *MW*, que são justamente os valores de máxima eficiência das respectivas UGs; no entanto, o valor 50 *MW* é um valor de baixa eficiência, o que diminui a eficiência global da UHE. Para a busca global tem-se

$$XA = (102, 64; 102, 97; 100, 68; - ; 101, 67; 112, 53), \quad (5.4)$$

que não possui nenhum valor, cuja eficiência de uma UG seja máxima, mas também não possui nenhum valor de eficiência muito baixa, como encontrado em *XAL*, tornando, desta forma, que $NA > NAL$.

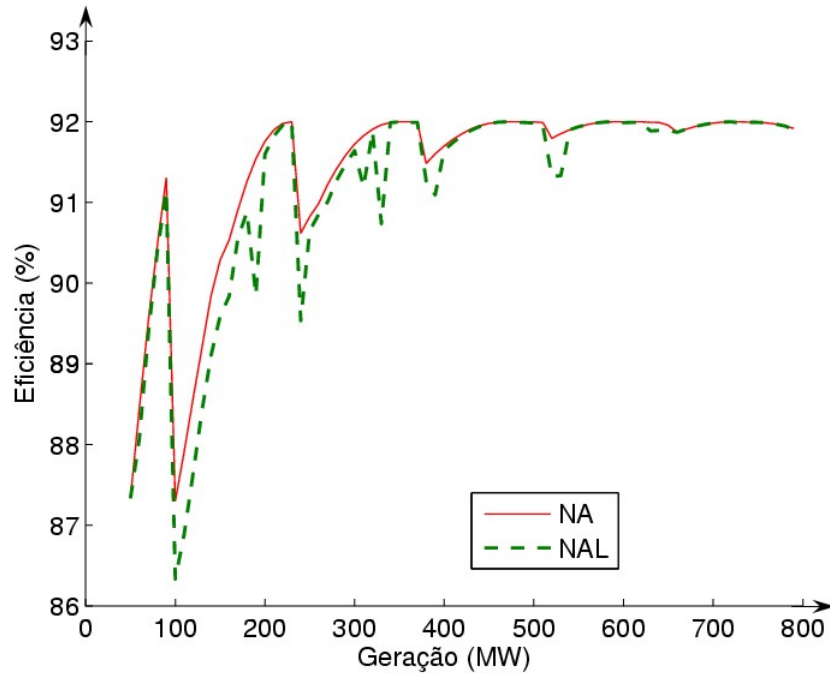


Figura 5.3: Resultados das buscas local e global – Ajuste 2

Ainda em relação aos resultados referentes ao Ajuste 2, vê-se que a maior eficiência obtida com a configuração *XP* (obtida com dados de projeto), que é $\overline{NP}$, como é explicado

no Capítulo 1 e é explicado com mais detalhes na próxima seção, é de 91,20% (Tabela A.10). A eficiência NAL é maior que $\overline{NP}$, mas o ganho é ainda maior quando $\overline{NP}$ é comparado com NA . Isto mostra a importância da utilização da busca global neste problema de despacho ótimo.

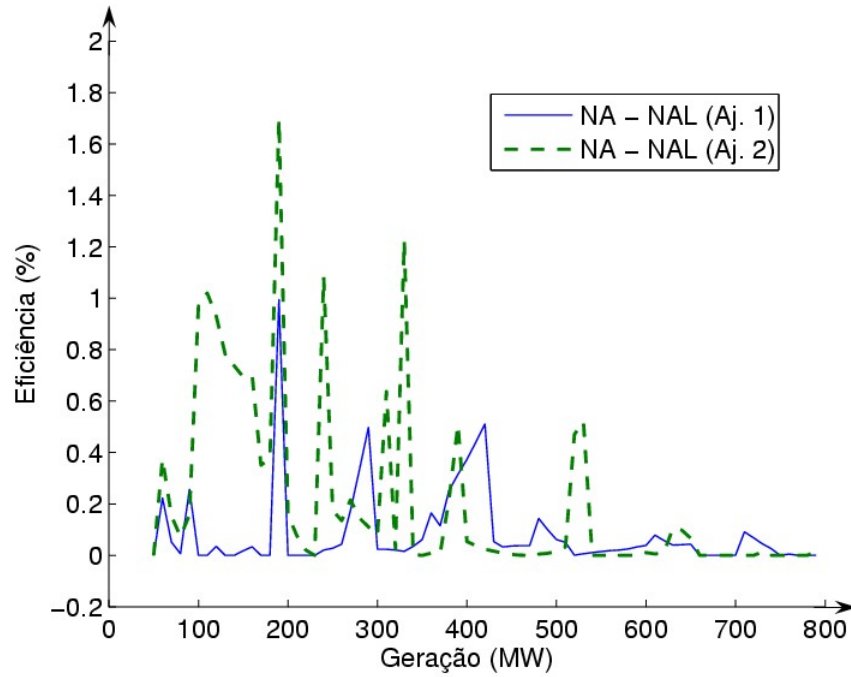


Figura 5.4: Diferença das eficiências obtidas com buscas global e local

5.3 Resultados obtidos com os ajustes

A comparação das eficiências obtidas com as otimizações seguem o padrão da Figura 1.1 com algumas modificações. Como foram utilizadas duas formas de ajuste aos dados de eficiência atualizados, as análises são realizadas independentemente para cada um destes ajustes. Na Figura 5.7 os ajustes são indicados por Ajuste i , com $i = 1, 2$.

A explicação das eficiências $\underline{NP}$ e $\overline{NP}$ é aqui retomada com o auxílio de um exemplo numérico. As configurações obtidas na otimização com dados de projeto são o número de

UGs ativas e gerações, independentemente de quais sejam estas UGs, porque as mesmas são consideradas idênticas. Logo, quando são inseridas as configurações de UGs nos dados atualizados, o valor de eficiência global da UHE varia de acordo com a combinação de UGs.

Seja, por exemplo, a configuração de UGs da Tabela A.1 determinada para uma demanda de 350 *MW*. Nesta configuração 3 UGs estão ativas, sendo 2 com potências de 134,5 *MW* e uma com 81 *MW*. A eficiência obtida com essa configuração, na ótica dos dados de projeto, é de 94,22%. Esta eficiência foi chamada de eficiência aparente, por ser embasada nos dados de projeto. Com relação aos dados atualizados e ao Ajuste 1, se as UGs 1 e 2 estiverem gerando 134,50 *MW* e a UG 3 81 *MW*, a eficiência da UHE é

$$\frac{D}{\frac{P_1}{\eta_1(P_1)} + \frac{P_2}{\eta_2(P_2)} + \frac{P_3}{\eta_3(P_3)}} = \frac{350}{\frac{134,50}{0,9183} + \frac{134,50}{0,9181} + \frac{81}{0,9050}} = 0,9151, \quad (5.5)$$

ou 91,51%. Se esta configuração é: UGs 1 e 3 gerando 134,50 *MW* e a UG 2 gerando 81 *MW*, a eficiência da UHE é

$$\frac{350}{\frac{134,50}{\eta_1(134,50)} + \frac{81}{\eta_2(81)} + \frac{134,50}{\eta_3(134,50)}} = 0,9142. \quad (5.6)$$

Com a segunda combinação a eficiência global é 91,42%. O número de combinações de configurações possíveis para este caso é $C_{6,2}C_{4,1} = 60$. Dentre os valores de eficiência referentes às 60 combinações de UGs, o maior foi denotado $\overline{NP}$ e o menor foi denominado $\underline{NP}$ (Figura 1.1).

As eficiências NA , $\overline{NP}$ e $\underline{NP}$ são comparadas com o objetivo de analisar dois cenários extremos de ganho de eficiência (ganhos máximo e mínimo possíveis). Quando se está operando uma UHE segundo um despacho com dados de projeto, a eficiência global da UHE está entre $\underline{NP}$ e $\overline{NP}$; e quando a UHE é operada segundo o despacho realizado com dados de atualizados, a eficiência global é NA . Operando em uma eficiência referente a $\overline{NP}$, a eficiência que poderia ser ganha é $NA - \overline{NP}$ – o valor mínimo possível de ganho; e operando segundo $\underline{NP}$, o ganho que se poderia obter é $NA - \underline{NP}$ – valor máximo de eficiência a ser ganho.

Uma UG particular é a de número 4, cujos dados foram transpostos de uma altura de queda para a de interesse e, mesmo assim, possui eficiências, em geral, menores do que às das outras UGs, principalmente nas potências mais próximas do limite inferior de geração. Assim, UG 4 é bastante utilizada quando é calculado $\underline{NP}$, como pode ser visto nas tabelas A.5 e A.11. Nestes casos, a eficiência global da UHE pode ser bastante baixa, chegando a valores abaixo de 80%. Assim, tomou-se uma medida com o intuito de excluir, quando possível, a UG 4 das análises.

A medida tomada é descrita a seguir: quando a configuração XP determina que devem estar ativos um número de UGs menor ou igual a 5, dentre os valores $NP_1, \dots, NP_k$ são excluídos aqueles em que a UG 4 está ativa. Assim, $\underline{NP}^*$ é tomado como o menor dentre estes valores. Quando XP indica que devem estar ativas 6 UGs, a UG 4 é, então, incluída, mas nos valores de maior eficiência possível. Um exemplo da metodologia tomada para 6 UGs ativas é mostrado na sequência. Na Tabela A.1, para uma demanda de 730 MW, está determinado que 5 UGs devem estar gerando 131,50 MW e outra, 72,51 MW. O valor $\underline{NP}$ referente a esta configuração é de 91,33%, sendo que a UG 4 foi escolhida para gerar 72,51 MW. Na metodologia referente a $\underline{NP}^*$ a UG 4 é fixada na geração 131,50 MW, na qual sua eficiência não é tão diferente das eficiências das outras UGs. Fixada a geração da UG 4, as combinações são realizadas com as outras 5 UGs, com 4 UGs gerando 131,50 MW e uma, 72,51 MW. Para o Ajuste 1 neste exemplo $\underline{NP} = 91,33\%$ e $\underline{NP}^* = 91,50\%$. Desta forma, ficou denotado que:

$$\underline{NP}^* = \begin{cases} \min \{NP_j : j \text{ é referente às combinações em que a UG 4 não está presente}\}, & \text{se o número de UGs ativas for menor ou igual a 5} \\ \min \{NP_j : j \text{ é referente às combinações em que UG 4 possui a maior potência}\}, & \text{se o número de UGs ativas for igual a 6} \end{cases} \quad (5.7)$$

As figuras 5.5 e 5.6 mostram que $\underline{NP}^*$ é quase sempre estritamente maior do que $\underline{NP}$. As maiores diferenças entre as eficiências acontecem nos valores mais baixos de geração e, nos valores mais altos, as eficiências $\underline{NP}$ e $\underline{NP}^*$ tendem a se aproximar.

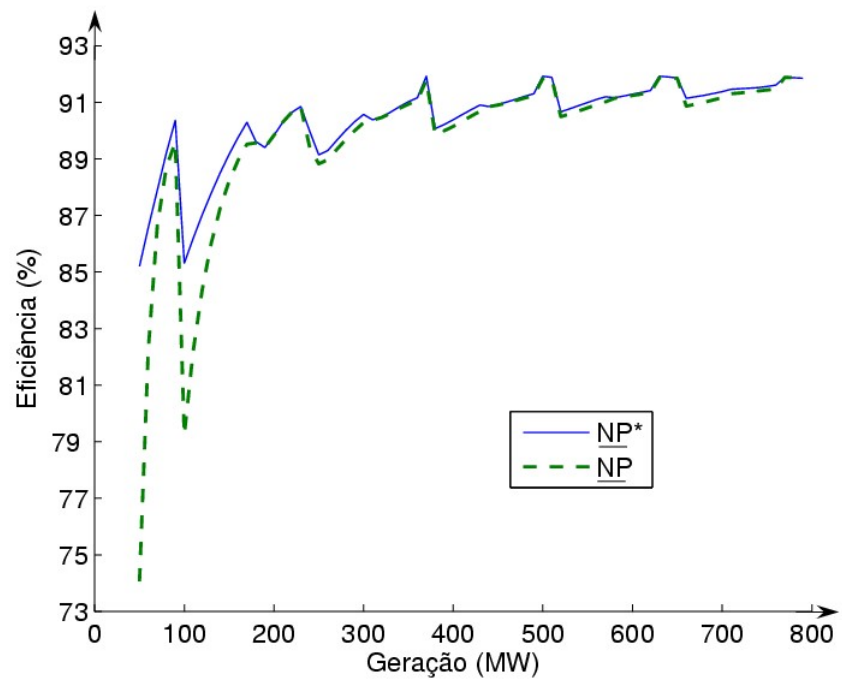


Figura 5.5: Eficiências $\underline{NP}$ e $\underline{NP}^*$ – Ajuste 1

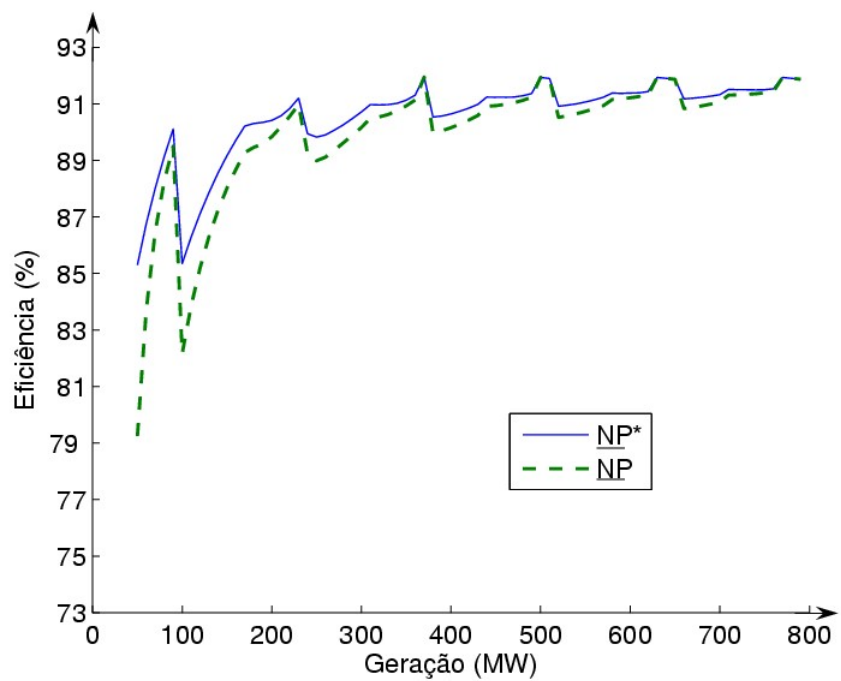


Figura 5.6: Eficiências $\underline{NP}$ e $\underline{NP}^*$ – Ajuste 2

Nas tabelas A.6 e A.12, que possuem as eficiências $\underline{NP}^*$ referentes aos dois ajustes, vê-se que a UG 4 é ativada apenas para as demanda iguais ou maiores a 660 MW.

Assim, ao invés de $\underline{NP}$, tem-se, na Figura 5.7, $\underline{NP}^*$. As comparações são feitas entre NA , $\underline{NP}^*$ e $\overline{NP}$.

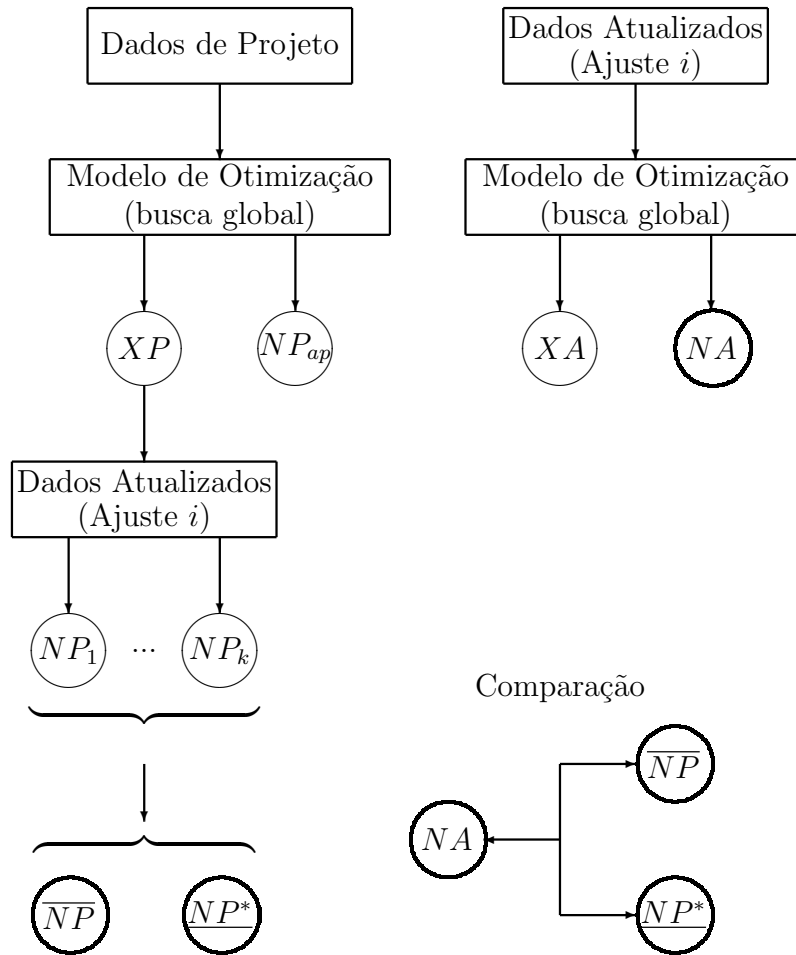


Figura 5.7: Comparação dos resultados com buscas local e global

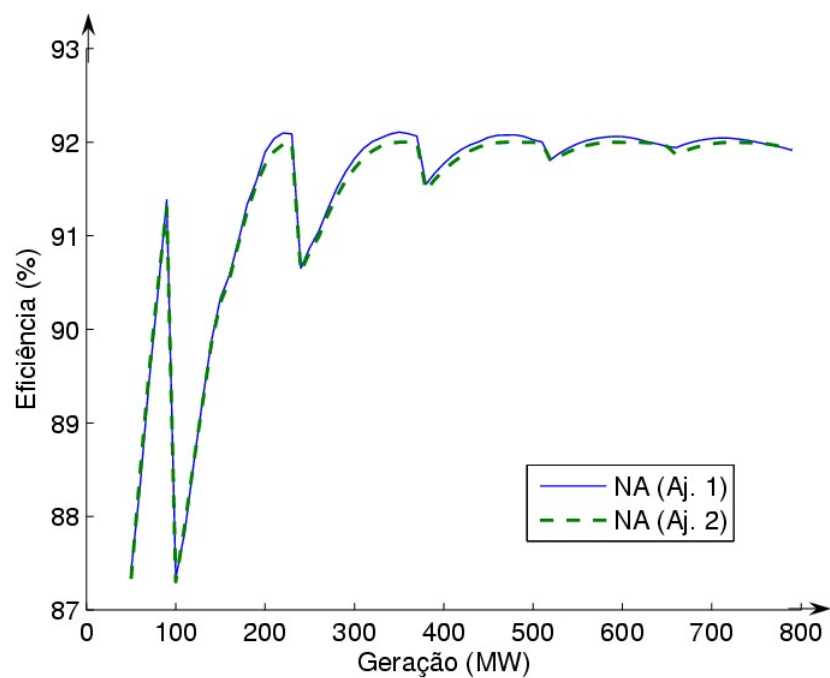


Figura 5.8: Eficiências NA obtidas com os ajustes 1 e 2

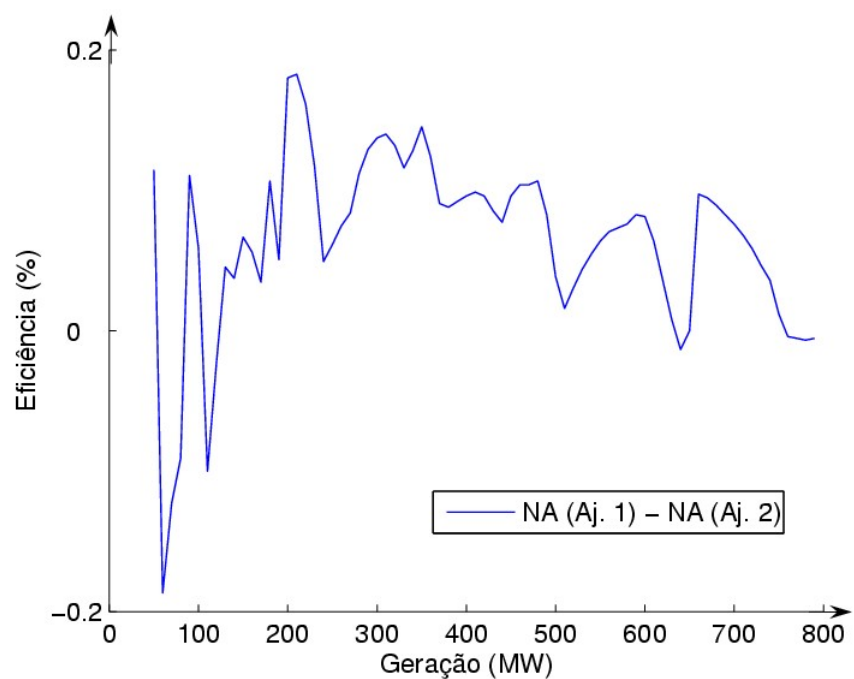


Figura 5.9: Diferença entre NA dos ajustes 1 e 2

No gráfico da Figura 5.8 mostra-se as eficiências NA em função da geração para os dois ajustes. Vê-se que os gráficos possuem comportamentos parecidos com caídas e subseqüentes subidas de eficiência que referem-se a ativação de mais uma UG. Percebe-se que a partir da geração aproximada de 150 MW , as eficiências globais da UHE, para o Ajuste 1, são maiores do que para o Ajuste 2, o que pode ser comprovado visualizando a Figura 5.9 que mostra a diferença entre NA do Ajuste 1 e do Ajuste 2. Isso acontece justamente por conta do que é explicado no Capítulo 4: os valores de máxima eficiência do Ajuste 2 são fixos em 92 %, enquanto que, estes máximos, para o Ajuste 1, ultrapassam os 92%, por falta da fixação da eficiência máxima, sendo esta dependente do ajuste polinomial.

5.3.1 Ajuste 1

Aqui são comparadas as eficiências NA , $\underline{NP}^*$ e $\overline{NP}$ para o Ajuste 1. Os dados da Figura 5.10 foram retirados da Tabela A.7. Considere-se, por exemplo, a geração de 550 MW . Se a UHE está operando segundo o despacho realizado com os dados de projeto, a eficiência da mesma está entre $\underline{NP}^* = 91,06\%$ e $\overline{NP} = 91,37\%$. Se a UHE estiver operando segundo o despacho realizado com os dados atualizados, a eficiência é de $NA = 91,98\%$. O valor de NA é, em geral, estritamente maior que $\overline{NP}$, ocorrendo igualdade, geralmente, nas gerações abaixo de 100 MW .

A diferença entre as eficiências NA e $\overline{NP}$, e entre NA e $\underline{NP}^*$ estão apresentadas na Figura 5.11. Estas diferenças indicam o ganho de eficiência que se pode obter utilizando o despacho referente a NA . Considere-se o exemplo dado acima para uma geração de 550 MW . Tem-se $NA - \overline{NP} = 0,61\%$, que representa o menor ganho de eficiência que se pode obter com os dados atualizados. O maior ganho é de $NA - \underline{NP}^* = 0,92\%$. Logicamente, quando uma UHE opera com o despacho realizado com os dados de projeto, não se sabe qual é a eficiência da UHE segundo os dados atualizados. Sendo assim, a eficiência varia de 91,06% a 91,37%, e os ganhos que podem ser obtidos estão entre 0,61% e 0,92%.

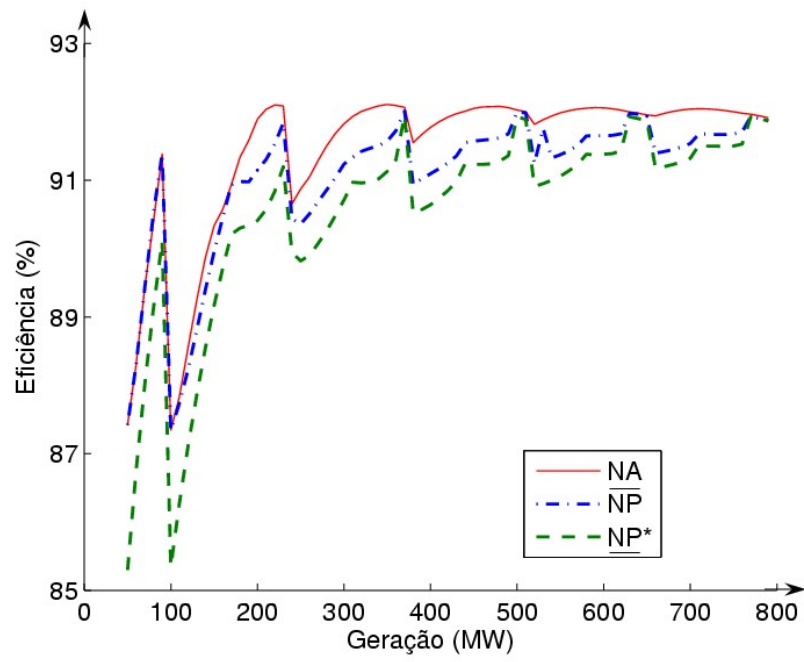


Figura 5.10: Eficiências NA , $\underline{NP^*}$ e $\overline{NP}$ – Ajuste 1

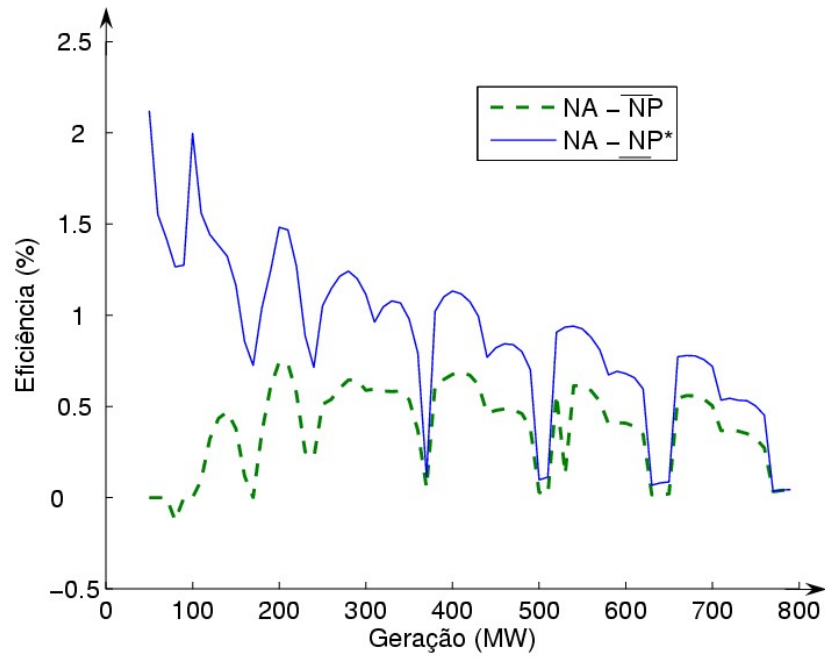


Figura 5.11: Diferença entre NA e $\underline{NP^*}$, NA e $\overline{NP}$ – Ajuste 1

As diferenças $NA - \overline{NP}$ são, em média, 0,38% com pico de 0,74%, enquanto as diferenças $NA - \underline{NP}^*$ estão na média de 0,89%, com valor máximo de 2,12%.

Supondo que uma configuração é utilizada por uma hora até ser modificada por uma nova configuração de UGs, determinada pelo despacho, o ganho em MWh para esta hora é um valor entre

$$1h \frac{D}{NA} - 1h \frac{D}{\overline{NP}} \quad (5.8)$$

e

$$1h \frac{D}{NA} - 1h \frac{D}{\underline{NP}^*}, \quad (5.9)$$

sendo D a demanda elétrica daquela hora. O valor D/NA é a potência bruta utilizada para gerar D e, quando é multiplicada por $1h$, tem-se a energia bruta utilizada, em MWh , para gerar a potência D em uma hora. Da mesma forma, têm-se as potências brutas $D/\overline{NP}$ e $D/\underline{NP}^*$ e as energias brutas respectivas. Assim, os ganhos em MWh neste período se referem a um valor que está entre $1h \times D/\overline{NP}$ e $1h \times D/\underline{NP}^*$.

Utilizando, então, as eficiências da Tabela A.7, referentes a NA , $\overline{NP}$ e $\underline{NP}^*$, calcularam-se os ganhos $D/NA - D/\overline{NP}$ e $D/NA - D/\underline{NP}^*$ para os valores de demanda de 50 a 790 MW , variando de 10 em 10 MW . A média dos ganhos $D/NA - D/\overline{NP}$ é de 1,9402 MW , e a média dos ganhos $D/NA - D/\underline{NP}^*$ é de 3,5943 MW .

Pode-se estabelecer um preço para o MWh para se verificar os possíveis ganhos econômicos referentes aos ganhos em MWh . O preço do MWh considerado é de $R\$ 50,00$. Este preço de energia elétrica foi escolhido baseado nos preços de liquidação das diferenças do MWh , do sítio da CCEE (2006) para a Região Nordeste no mês de outubro de 2006. Nas outras Regiões, o preço era maior, razão pela qual escolheu-se este valor, de modo que as precificações dos ganhos em energia fossem conservadoras.

Supõe-se que o ganho em energia, quando utilizado o despacho com eficiência NA , por

hora esteja entre $1,902 \text{ MWh}$ e $3,5943 \text{ MWh}$. Desta forma, em uma hora o ganho econômico está entre $R\$ 97,01$ e $R\$ 179,72$. Utilizando contas simples, em um dia de operação o ganho econômico é um valor intermediário entre $R\$ 2.328,26$ e $R\$ 4.313,18$. Em um ano estes valores chegam a $R\$ 849.813,26$ e $R\$ 1.574.311,50$.

5.3.2 Ajuste 2

Para o Ajuste 2, os ganhos de eficiência $NA - \overline{NP}$ são, em geral, menores do que os obtidos no Ajuste 1, com média de $0,34\%$ e pico de $0,68\%$. Já os ganhos de eficiência $NA - \underline{NP}$ são, em média, $0,99\%$ com pico de $2,14\%$.

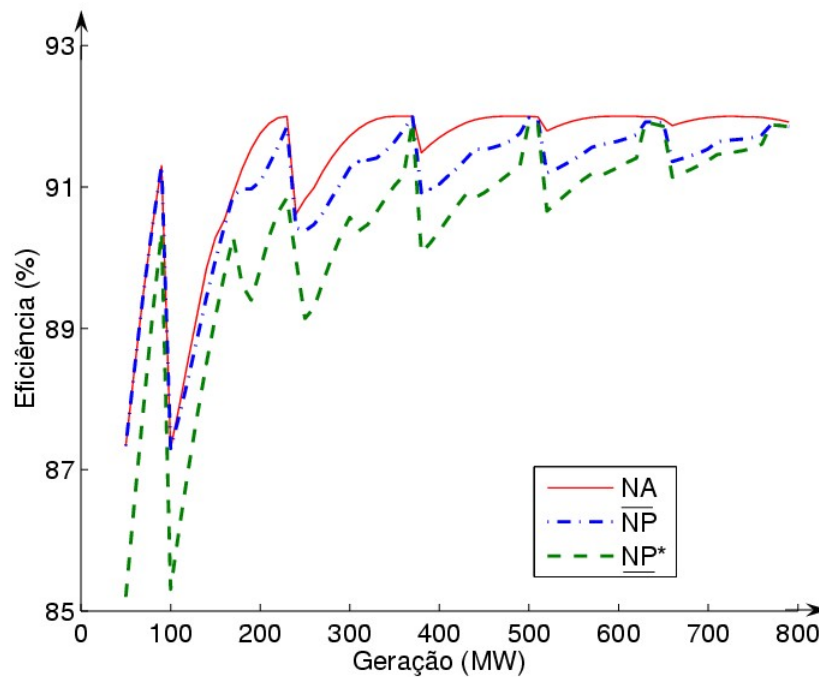


Figura 5.12: Eficiências NA , $\underline{NP^*}$ e $\overline{NP}$ – Ajuste 2

Considere-se o mesmo exemplo dado anteriormente para uma geração de 550 MW . Na Tabela A.13, $NA = 91,85\%$, $\underline{NP^*} = 90,77\%$ e $\overline{NP} = 91,25\%$. Desta forma, o ganho de eficiência que se pode obter está entre $0,6\%$ e $1,08\%$.

Realizando o mesmo procedimento descrito anteriormente para o Ajuste 1, verifica-se que os ganhos médios, em MWh , para o Ajuste 2 estão entre 1,7730 e 3,9450, o que, em reais, considerando $R\$ 50,00/MWh$, poderia chegar a $R\$ 88,65$ e $R\$ 197,25$. Em um dia de operação, seguindo este raciocínio, o ganho fica entre $R\$ 2.127,63$ e $R\$ 4.734,05$. Em um ano, o ganho poderia chegar a um valor entre $R\$ 776.586,28$ e $R\$ 1.727.928,96$.

As eficiências NA , $\underline{NP^*}$ e $\overline{NP}$ para o Ajuste 2 estão na Figura 5.12 e os valores podem ser vistos na Tabela A.13. As diferenças entre NA e $\underline{NP^*}$, NA e $\overline{NP}$ podem ser visualizadas na Figura 5.13.

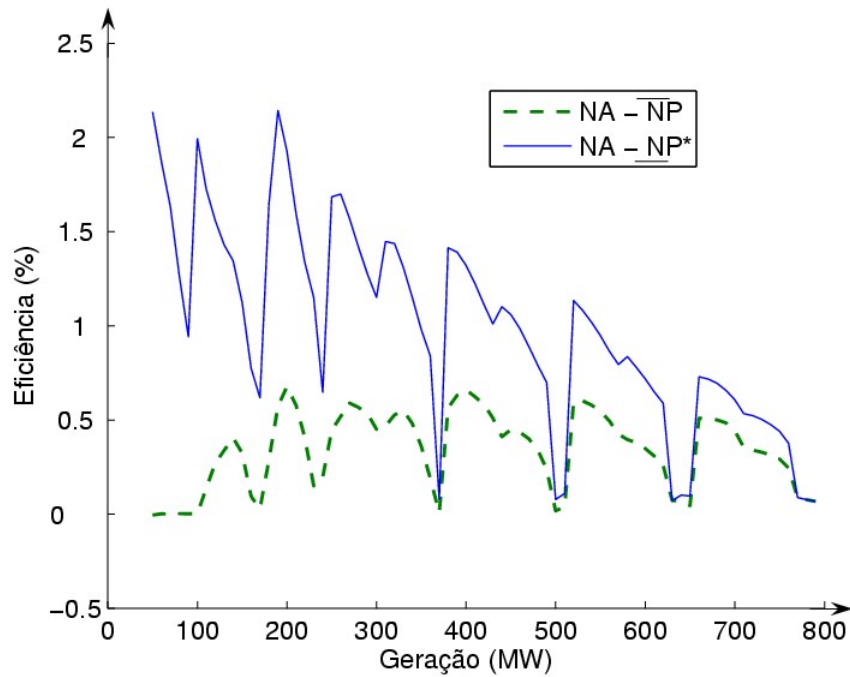


Figura 5.13: Diferença entre NA e $\underline{NP^*}$, NA e $\overline{NP}$ – Ajuste 2

5.4 Ganhos em um dia de operação

Não foi possível encontrar um histórico de um dia de operação da UHE. Por esta razão criou-se um histórico (Tabela 5.1), de modo a verificar os ganhos de eficiência em todo um dia de operação. Este histórico foi baseado nos patamares de carga de dias úteis obtidos no sítio do ONS (2006). Ficticiamente a UHE, durante todo o dia de operação, está com a mesma altura de queda de 24,8 *m*, o que não é absurdo visto, que a UHE em estudo possui uma área alagada grande, podendo permanecer dias com altura de queda sem muita variação.

As figuras 5.14 e 5.15 mostram, além das eficiências NA , $\underline{NP}^*$ e $\overline{NP}$, as eficiências NP_{ap} , que são as eficiências aparentes. Se a UHE opera segundo o despacho realizado com dados de projeto, acredita-se que a sua eficiência global seja NP_{ap} , que é uma “falsa” eficiência e, na realidade, a eficiência “real” está entre $\underline{NP}^*$ e $\overline{NP}$, de maneira a eficiência que pode ser obtida é NA . Esses dados de eficiência, para as demandas de 50 *MW* a 790 *MW* estão nas tabelas A.7 e A.13.

Tabela 5.1: Histórico de demanda criado para um dia de operação da UHE

Hora	Demanda (<i>MW</i>)	Hora	Demanda (<i>MW</i>)
1	280	13	480
2	200	14	430
3	120	15	440
4	150	16	490
5	200	17	510
6	250	18	590
7	300	19	670
8	350	20	740
9	400	21	650
10	420	22	530
11	450	23	430
12	500	24	380
Geração total de 9960 <i>MWh</i>			

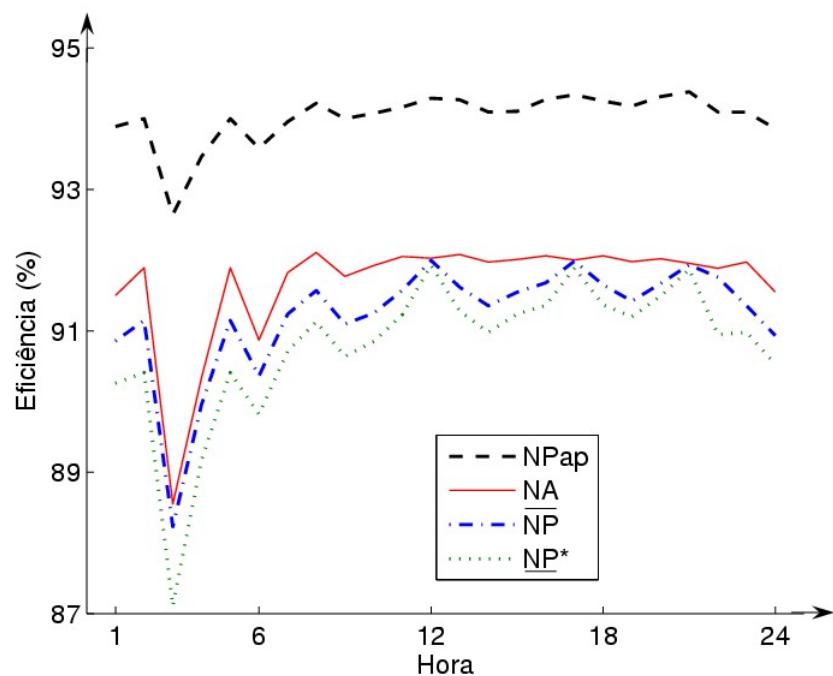


Figura 5.14: Eficiências aparente e atualizadas em um dia de operação – Ajuste 1

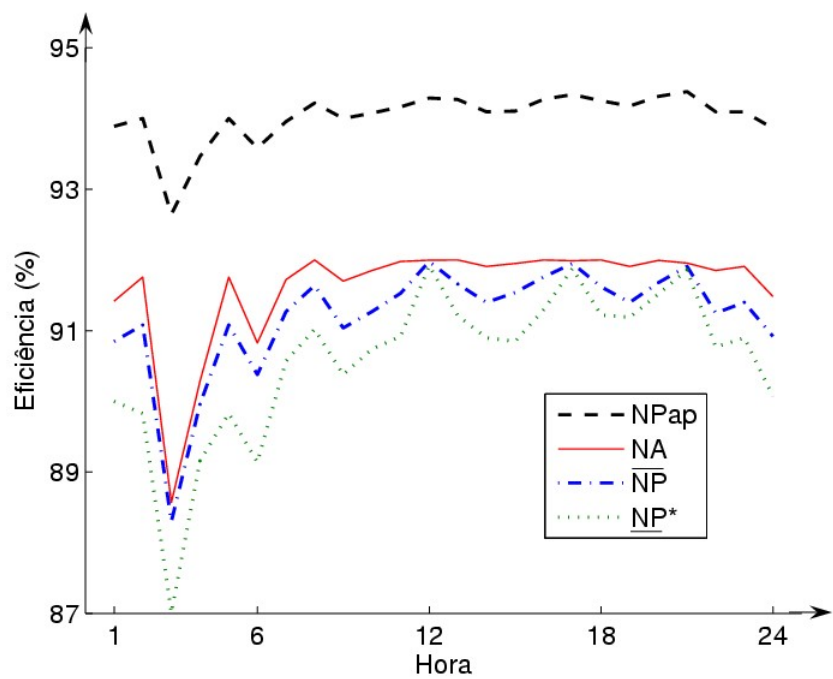


Figura 5.15: Eficiências aparente e atualizadas em um dia de operação – Ajuste 2

Tabela 5.2: Energias brutas e eficiências em 1 dia de operação – Ajuste 1

	$\overline{NP}$	$\overline{NP^*}$	NA
Energia bruta (MWh)	10.892,74	10.936,43	10.843,08
Eficiência total no dia (%)	91,44	91,07	91,86

Tabela 5.3: Ganhos com NA em comparação com as NP 's em 1 dia de operação – Ajuste 1

	$NA - \overline{NP}$	$NA - \overline{NP^*}$
Ganhos em eficiência (%)	0,42	0,79
Ganhos em MWh	49,66	93,34
Ganhos em $R\$ (50R\$/MWh)$	2.483,00	4.667,00

Uma conta simples pode dar indícios de valores monetários anuais, que podem ser atingidos com os valores da Tabela 5.3. Multiplicando-se os ganhos monetários no dia de operação por 365, obtém-se os valores de $R\$ 906.295$ e $R\$ 1.703.455$.

Os ganhos para o Ajuste 2 estão indicados na Tabela 5.5. O ganho monetário no dia de operação está entre $NA - \overline{NP} = R\$ 2.317,00$ e $NA - \overline{NP^*} = R\$ 5.263,00$. Em um ano estes valores chegam a $R\$ 845.705$ e $R\$ 1.920.995$. Tais valores são bastante expressivos e podem subir ainda mais se o preço do MWh for maior.

Tabela 5.4: Energias brutas e eficiências em 1 dia de operação – Ajuste 2

	$\overline{NP}$	$\overline{NP^*}$	NA
Energia bruta (MWh)	10.896,08	10.955,00	10849,75
Eficiência total no dia (%)	91,41	90,92	91,80

Tabela 5.5: Ganhos com NA em comparação com as NP 's em 1 dia de operação – Ajuste 2

	$NA - \overline{NP}$	$NA - \overline{NP^*}$
Ganhos em eficiência (%)	0,39	0,88
Ganhos em MWh	46,34	105,26
Ganhos em $R\$ (50R\$/MWh)$	2.317,00	5.263,00

Os dados atualizados foram obtidos através do método Winter Kennedy. O ganho econômico mensal, obtido com a utilização destes dados no despacho, são maiores que o

custo dos equipamentos de medição ultra-sônicos (que possuem custos maiores que os equipamentos e instalação do método Winter Kennedy). Com a utilização de dados atualizados medidos com o auxílio de métodos de medição de vazão ultra-sônicos, o ganho pode ser ainda maior, visto que este método é mais preciso que o Winter Kennedy.

5.5 Número de unidades geradoras ativas

A reserva girante, para alguns valores de demanda, “sacrifica” a eficiência da UHE. Este é o caso, principalmente, verificado para a demandas de 100 *MW*, pois, inicialmente, 1 UG apenas seria suficiente para gerar este valor, mas por causa de uma reserva girante mínima de 50 *MW*, houve a necessidade de se ativar uma segunda, deixando as duas UGs na geração mínima de 50 *MW*. Já para valores maiores de geração existe uma maior liberdade de alocação da reserva girante, não comprometendo de forma grave a eficiência da UHE.

A linha contínua na Figura 5.16 indica o número de UGs possíveis para cada geração. Por exemplo, para uma geração de 400 *MW*, é possível ativar 3, 4, 5 ou 6 UGs. No caso, o número de UGs escolhido foi 4, mesmo porque, no problema simulado, a reserva girante de 50 *MW* não permite a ativação de apenas 3 UGs. A geração máxima de 3 UGs é 420 *MW* e, gerando 400, a reserva é de apenas 20 *MW*.

Verificou-se que, para todos os casos, tanto no Ajuste 1 quanto no 2, o número de UGs ativas foi sempre o mínimo possível, obedecendo à restrição de reserva girante. O fato número de UGs ativas ter sido escolhido como o mínimo possível, pode estar relacionada à extensão da faixa de geração, que é pequena no caso estudado. Se tal faixa fosse maior, poderia por exemplo, ser melhor sincronizar as 4 UGs em valores de eficiências altas, ao invés de 3 UGs em eficiências mais baixas nas proximidades do limite máximo de geração.

O gráfico da Figura 5.16 indica UGs com limites de geração iguais, pois caso contrário,

não seriam determinados apenas o número de UGs ativas, mas também seriam determinadas quais poderiam ser as combinações destas UGs que satisfizessem a demanda.

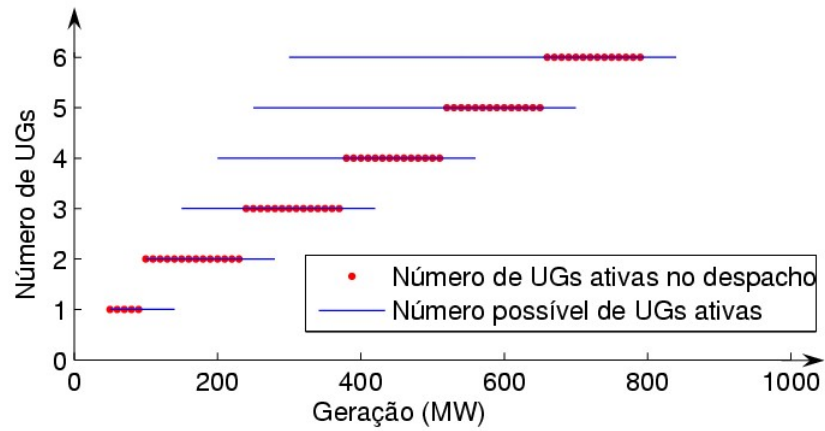


Figura 5.16: Número de UGs ativas em função da geração

Capítulo 6

Conclusões e sugestões de continuidade

6.1 Conclusões

Resolvendo o modelo de despacho com o método de busca global, os ganhos de eficiência no despacho foram de até 1% no Ajuste 1 e chegaram nas proximidades de 1,7% no Ajuste 2 em relação ao método de busca local. Isto mostra a importância da utilização da busca global neste problema, por causa da não convexidade encontrada.

O estudo de caso levou em consideração uma UHE com 6 UGs. Um problema maior, com várias UGs e várias faixas de operação disjuntas para cada UG, pode torná-lo um problema de solução demorada, já que o número de variáveis inteiras cresce consideravelmente.

As configurações determinadas com o modelo são aptas a serem utilizadas na operação real da UHE. Para problemas pequenos, como o estudado, a otimização pode ser feita através de tabelas variando-se a demanda com a informação da reserva girante disponível.

Em média, os menores ganhos de eficiência, quando utilizados os dados atualizados são de 0,34% e 0,38%, valores obtidos com os dois tipos de ajustes realizados, enquanto que os maiores ganhos são 0,89% e 0,99%. Em valores monetários estes ganhos estão entre $R\$ 776.586,28$ e $R\$ 1.727.928,96$ anuais.

Para a simulação da operação de um dia os ganhos em eficiência estão entre 0,42% a 0.79% em um ajuste, levando a $R\$ 906.295$ e $R\$ 1.703.455$ anualmente. Para o outro ajuste as eficiências ganhas estão entre 0,39% a 0.88%, levando aos valores anuais $R\$ 845.705$ e $R\$ 1.920.995$. Os ganhos são bastante expressivos, considerando que está sendo levada em conta apenas uma UHE e o preço do MWh como $R\$ 50$ é um preço conservador da energia elétrica.

Para o caso em estudo, os custos para a medição dos dados atualizados foram praticamente nulos, já que foi utilizado o método Winter Kennedy para a medição de vazão. As estimativas de ganhos monetários obtidas indicam que podem ser utilizados métodos de medição de vazão mais precisos, como por exemplo os métodos ultrasônicos, e obter-se um retorno rápido do capital investido, evidenciando, assim, baixo custo e alto benefício na utilização de dados atualizados.

Utilizando dados atualizados no despacho das UHEs do Sistema Interligado Nacional os ganhos e a economia de recursos podem diminuir a necessidade de construção de novas usinas para atendimento da demanda crescente. Além do mais, o melhor uso dos recursos hídricos significam ganhos monetários para as empresas geradoras de energia hidrelétrica.

6.2 Sugestões de continuidade

Um fator interessante é a utilização de outros métodos de busca para a formulação proposta, no sentido de comparar resultados, ganhos de eficiência e tempo de resolução.

Alguns trabalhos levam em conta, no despacho, a minimização das perdas e do número de partidas e paradas das UGs. Apesar da minimização das perdas ser um fator mais relevante do que o número de partidas e paradas de UGs (Santos, 2001), este fator pode vir a tornar o trabalho mais completo. Para isto, o despacho deve levar em conta a conexão entre vários

períodos de tempo discretizados.

Referências Bibliográficas

- Abadie, J. e J. Carpentier (1969). Generalization of the wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints. Em R. Fletcher (Ed.), *Optimization*.
- Andrade, L. A., C. B. Martinez, N. Filho, e L. A. Aguirre (2002). Estudo comparativo dos métodos de medição de vazão - uma aplicação em comissionamento de turbinas hidráulicas. Seminários Internos do Centro de Pesquisas Hidráulicas I. Disponível em: <http://www.cph.eng.ufmg.br/docscph/matevento15.pdf>. Acesso em: Novembro de 2006.
- ANEEL (2005). Atlas de energia elétrica do Brasil.
- Bazaraa, M. S., H. D. Sherali, e C. M. Shetty (1943). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Borges, C. L. T. (2005). Cpe 754: Confiabilidade de sistemas de potência, capítulo 13. Disponível em: http://www.coep.ufrj.br/~carmen/Reserva_Operativa.pdf. Último acesso em outubro de 2006.
- Calainho, J. A. L., C. A. Horta, C. Gonçalves, e F. G. Lomônaco (1999). Cavitação em turbinas hidráulicas do tipo francis e kaplan no brasil. Em *XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz do Iguaçu, Brasil.
- CCEE (2006). Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Sítio: www.ccee.org.br. Acesso em: outubro de 2006.
- Duarte, E. A. C. e R. G. Bittencourt (2003). Projeto de componentes para turbinas de reação - enfoque a turbinas de baixa queda. Seminários Internos do Centro de Pesquisas Hidráulicas II. Disponível em: <http://www.cph.eng.ufmg.br/docscph/matevento43.pdf>. Acesso em: Novembro de 2006.
- Encina, A. S. A. (2006). *Despacho Ótimo de Unidades Geradoras Em Sistemas Hidrelétricos Via Heurística Baseada Em Relaxação Lagrangeana e Programação Dinâmica*. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.
- Esteves, P. P. I., A. L. Diniz, e C. A. Sagastizábal (2006). A mathematical model for the efficiency curves of hydroelectric units. Em *X Simpósio de Especialistas Em Planejamento Da Operação e Expansão Elétrica*, Florianópolis, Brasil.

- Faria, A. M., P. de Barros Correia, e C. T. Salmazo (1993). Alocação de geração e reserva girante em usinas hidrelétricas considerando as faixas operativas das unidades. Em *XXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Campinas.
- Finardi, E. C. e E. L. D. Silva (2005). Unit commitment of single hydroelectric plant. *Electric Power Systems Research* 75, 116 – 123.
- Fox, R. W. e A. T. McDonald (1998). *Introduction do Fluid Mechanics* (4 ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Gau, C.-Y. e L. E. Schrage (2003). Implementation and testing of a branch-and-bound based method for deterministic global optimization: Operations research applications. *Frontiers In Global Optimization*, 1–20.
- Hillier, F. S. e G. J. Lieberman (1995). *Introduction to Mathematical Programming*. McGraw-Hill, Inc.
- Lasdon, L. S., R. L. Fox, e M. W. Ratner (1974). Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue Française d'Automatique, Informatique et Recherche Opérationnelle* 3, 73 – 99.
- Lingo (2003). *User's Guide*. Lindo Systems, Inc.
- Luenberger, D. G. (1986). *Linear and Nonlinear Programming*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Macintyre, A. J. (1983). *Máquinas Motrizes Hidráulicas*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A.
- NB-228 (1974). Ensaio de recepção de turbinas hidráulicas. Relatório técnico, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Nilsson, O. e D. Sjelvgren (1997). Hydro unit start-up costs and their impact on the short term scheduling strategies of swedish power producers. *IEEE Transactions on Power Systems* 12, 38 – 43.
- Nilsson, O., L. Söder, e D. Sjelvgren (1998). Integer modelling of spinning reserve requirements in short term scheduling hydro systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 13(3), 959 – 964.
- ONS (2003). Norma de operação - controle da geração em operação normal -submódulo 10.8. Relatório técnico, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: www.ons.org.br. Acesso em: Outubro de 2006.
- ONS (2006). Operador Nacional do Sistema Elétrico. Sítio: www.ons.org.br. Acesso em: outubro de 2006.

- Sala de Física (2006). Energia hidrelétrica. Disponível em <http://br.geocities.com/salade-fisica5/leituras/hidreletrica.htm>. Acesso em: Outubro de 2006.
- Salmazo, C. T. (1997). Modelo de otimização eletro-energético de curto prazo (pré-despacho) aplicado ao sistema Copel. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.
- Santos, E. F. D. (2001). Um modelo de pré-despacho em usinas hidrelétricas usando algoritmos genéticos. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.
- Santos, E. F. D., A. S. A. Encina, M. A. Cicogna, S. Soares, e T. Ohishi (2002). Um critério de desempenho para o despacho ótimo de unidades geradoras. Em *III Simpósio de Especialistas Em Operação de Centrais Hidrelétricas*, Foz do Iguaçu.
- Soares, S. e C. T. Salmazo (1997). Minimum loss predispach model for hydroelectric power plant. *IEEE Transactions on Power Systems* 12(3), 1220 – 1228.
- Sontek (2006). Sítio: www.sontek.com. Acesso em: dezembro de 2006.
- Wolfe, P. (1963). Methods of nonlinear programming. Em R. L. Graves e P. Wolfe (Eds.), *Recent Advances in Mathematical Programming*.
- Wolsey, L. A. (1998). *Integer Programming*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Apêndice A

Tabelas do despacho

Neste apêndice são apresentadas as tabelas referentes aos PDs realizados com a demanda variando de 50 *MW* a 790 *MW*, de 10 em 10 *MW*. A reserva girante (R) foi considerada 50 *MW*, para todos os casos.

Tabela A.1: Eficiências aparente (NP_{ap}) e configurações de UGs (XP) [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência Aparente UHE (%)	UGs ativas e geração			
		N° de UGs	Geração	N° UGs	Geração
50	91,23	1	50,00	-	-
60	92,64	1	60,00	-	-
70	93,31	1	70,00	-	-
80	93,56	1	80,00	-	-
90	93,65	1	90,00	-	-
100	91,23	2	50,00	-	-
110	92,05	2	55,00	-	-
120	92,64	2	60,00	-	-
130	93,05	2	65,00	-	-
140	93,31	2	70,00	-	-
150	93,46	2	75,00	-	-
160	93,56	2	80,00	-	-
170	93,61	2	85,00	-	-
180	93,68	1	111,88	1	68,13
190	93,86	1	123,98	1	66,02
200	94,00	1	129,87	1	70,13
210	94,08	1	133,36	1	76,64
220	94,10	1	135,00	1	85,00
230	94,12	1	134,31	1	95,69
240	93,56	3	80,00	-	-
250	93,58	2	65,78	1	118,45
260	93,72	2	66,93	1	126,14
270	93,82	2	70,09	1	129,83
280	93,89	2	73,89	1	132,23
290	93,93	2	78,09	1	133,82
300	93,96	2	82,62	1	134,76
310	93,98	2	122,17	1	65,65
320	94,08	2	126,44	1	67,11
330	94,15	2	129,91	1	70,18
340	94,20	2	132,62	1	74,75
350	94,22	2	134,50	1	81,00
360	94,22	2	135,03	1	89,94
370	94,25	3	123,33	-	-
380	93,86	2	123,98	2	66,02
390	93,94	2	127,31	2	67,69
400	94,00	2	129,87	2	70,13
410	94,05	2	131,85	2	73,15
420	94,08	2	133,36	2	76,64
430	94,09	2	134,42	2	80,58
440	94,10	3	124,59	1	66,23

Tabela A.1: Eficiências aparentes (NP_{ap}) e configurações de UGs (XP) [2/2]

Demanda (MW)	Eficiência Aparente UHE (%)	UGs ativas e geração			
		Nº UGs	Geração	Nº de UGs	Geração
450	94,17	3	127,41	1	67,76
460	94,22	3	129,93	1	70,21
470	94,25	3	132,11	1	73,66
480	94,27	3	133,89	1	78,34
490	94,28	3	135,00	1	85,00
500	94,29	4	125,00	-	-
510	94,34	4	127,50	-	-
520	94,05	3	127,90	2	68,14
530	94,09	3	129,89	2	70,16
540	94,13	3	131,57	2	72,64
550	94,15	3	132,96	2	75,56
560	94,17	3	134,04	2	78,93
570	94,17	3	134,78	2	82,82
580	94,22	4	127,95	1	68,19
590	94,25	4	129,94	1	70,23
600	94,28	4	131,76	1	72,97
610	94,30	4	133,35	1	76,61
620	94,30	4	134,60	1	81,59
630	94,31	5	126,00	-	-
640	94,35	5	128,00	-	-
650	94,38	5	130,00	-	-
660	94,15	4	129,91	2	70,18
670	94,18	4	131,36	2	72,28
680	94,20	4	132,62	2	74,75
690	94,21	4	133,68	2	77,64
700	94,22	4	134,50	2	81,00
710	94,25	5	128,30	1	68,49
720	94,28	5	129,95	1	70,24
730	94,30	5	131,50	1	72,51
740	94,31	5	132,91	1	75,44
750	94,32	5	134,14	1	79,31
760	94,33	5	135,00	1	85,00
770	94,36	6	128,33	-	-
780	94,38	6	130,00	-	-
790	94,40	6	131,67	-	-

Tabela A.2: Eficiências NA (busca global) e configurações de UGs (XA) – Ajuste 1 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NA (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	87,42	-	-	-	-	50,00	-
60	88,30	-	-	-	-	60,00	-
70	89,43	-	-	-	-	70,00	-
80	90,52	-	-	-	-	80,00	-
90	91,39	-	-	-	-	90,00	-
100	87,35	-	-	50,00	-	50,00	-
110	87,83	-	-	50,00	-	60,00	-
120	88,55	70,00	-	-	-	50,00	-
130	89,24	-	-	50,00	-	80,00	-
140	89,87	-	-	50,00	-	90,00	-
150	90,33	-	-	100,00	-	50,00	-
160	90,58	-	-	110,00	-	50,00	-
170	90,93	-	-	85,95	-	84,05	-
180	91,34	-	-	90,76	-	89,24	-
190	91,58	-	94,18	-	-	95,82	-
200	91,89	-	-	100,62	-	99,38	-
210	92,04	-	-	105,51	-	104,49	-
220	92,10	-	-	110,31	-	109,69	-
230	92,09	-	-	114,90	-	115,10	-
240	90,65	-	93,41	96,59	-	50,00	-
250	90,87	-	99,23	100,77	-	50,00	-
260	91,05	77,19	-	92,15	-	90,67	-
270	91,28	-	87,55	91,97	-	90,48	-
280	91,50	-	91,34	95,03	-	93,63	-
290	91,68	-	95,32	98,00	-	96,67	-
300	91,82	-	99,43	100,90	-	99,66	-
310	91,93	-	103,63	103,75	-	102,62	-
320	92,01	-	107,90	106,53	-	105,57	-
330	92,05	-	112,24	109,25	-	108,51	-
340	92,09	-	-	107,53	125,83	106,64	-
350	92,11	-	-	111,57	127,32	111,11	-
360	92,09	-	-	115,52	128,58	115,90	-
370	92,07	-	-	114,76	128,36	-	126,88
380	91,55	91,62	94,67	97,52	-	96,18	-
390	91,67	95,39	97,20	99,35	-	98,06	-
400	91,77	99,03	99,83	101,18	-	99,95	-
410	91,86	102,58	102,54	103,02	-	101,86	-
420	91,92	106,05	105,31	104,85	-	103,79	-
430	91,97	109,47	108,13	106,68	-	105,72	-
440	92,01	112,83	111,01	108,49	-	107,68	-

Tabela A.2: Eficiências NA (busca global) e configurações das UGs (XA) – Ajuste 1 [2/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NA (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
450	92,05	-	109,68	107,66	125,88	106,78	-
460	92,07	-	113,64	110,10	126,80	109,46	-
470	92,08	-	-	109,98	126,76	109,32	123,95
480	92,08	-	-	113,18	127,86	112,99	125,98
490	92,06	-	-	116,38	128,83	117,05	127,74
500	92,03	126,50	-	-	129,59	116,41	127,50
510	92,00	-	-	114,76	128,36	140,00	126,88
520	91,82	97,99	99,06	100,65	122,90	99,40	-
530	91,88	101,29	101,54	102,35	123,66	101,16	-
540	91,94	104,53	104,08	104,05	124,40	102,94	-
550	91,98	107,73	106,68	105,74	125,11	104,73	-
560	92,02	110,89	109,33	107,44	125,80	106,54	-
570	92,04	114,01	112,04	109,13	126,44	108,38	-
580	92,05	-	112,26	109,26	126,49	108,53	123,46
590	92,06	-	115,71	111,34	127,24	110,85	124,85
600	92,06	-	119,28	113,41	127,93	113,26	126,11
610	92,05	-	122,99	115,43	128,56	115,78	127,24
620	92,03	128,26	-	116,85	129,17	117,73	127,98
630	92,00	131,91	-	118,80	129,47	120,93	128,89
640	91,98	127,21	-	116,29	128,81	140,00	127,69
650	91,96	127,86	125,36	-	128,90	140,00	127,87
660	91,94	104,67	104,19	104,12	124,43	103,01	119,58
670	91,98	107,48	106,48	105,61	125,06	104,59	120,78
680	92,01	110,28	108,82	107,11	125,67	106,19	121,92
690	92,03	113,07	111,22	108,62	126,25	107,82	123,02
700	92,04	115,85	113,68	110,13	126,81	109,48	124,05
710	92,05	118,62	116,20	111,63	127,34	111,18	125,03
720	92,04	121,38	118,78	113,13	127,84	112,92	125,95
730	92,03	124,54	121,89	114,84	126,78	115,03	126,93
740	92,02	126,79	124,21	116,06	128,74	116,62	127,58
750	92,00	129,40	127,08	117,47	129,13	118,64	128,28
760	91,98	125,67	123,04	115,46	128,57	140,00	127,26
770	91,97	128,96	126,58	117,23	129,07	140,00	128,16
780	91,94	132,15	130,46	118,93	129,50	140,00	128,95
790	91,91	135,05	135,05	120,46	129,86	140,00	129,58

Tabela A.3: Eficiências NAL (busca local) e configurações de UGs (XAL) – Ajuste 1 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NAL (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	87,42	-	-	-	-	50,00	-
60	88,08	60,00	-	-	-	-	-
70	89,38	70,00	-	-	-	-	-
80	90,39	80,00	-	-	-	-	-
90	91,13	90,00	-	-	-	-	-
100	87,35	-	-	50,00	-	50,00	-
110	87,83	-	-	50,00	-	60,00	-
120	88,52	-	-	50,00	-	70,00	-
130	89,24	-	-	50,00	-	80,00	-
140	89,87	-	-	50,00	-	90,00	-
150	90,32	-	-	50,00	-	100,00	-
160	90,54	-	-	50,00	-	110,00	-
170	90,93	-	-	85,95	-	84,05	-
180	91,34	-	-	90,76	-	89,24	-
190	90,59	-	-	50,00	-	140,00	-
200	91,89	-	-	100,62	-	99,38	-
210	92,04	-	-	105,51	-	104,49	-
220	92,10	-	-	110,31	-	109,69	-
230	92,09	-	-	114,90	-	115,10	-
240	90,63	92,20	-	97,80	-	50,00	-
250	90,84	98,89	-	101,11	-	50,00	-
260	91,00	105,46	-	104,54	-	50,00	-
270	91,11	111,97	-	108,03	-	50,00	-
280	91,17	118,46	-	111,54	-	50,00	-
290	91,18	124,94	-	115,06	-	50,00	-
300	91,80	98,95	-	101,14	-	99,91	-
310	91,91	103,80	-	103,66	-	102,53	-
320	91,98	108,58	-	106,20	-	105,22	-
330	92,03	113,30	-	108,74	-	107,96	-
340	92,05	117,96	-	111,27	-	110,77	-
350	92,05	122,55	-	113,76	-	113,69	-
360	91,93	111,97	-	108,03	-	140,00	-
370	91,95	118,46	-	111,54	-	140,00	-
380	91,30	105,50	-	104,56	-	50,00	119,94
390	91,36	111,09	-	50,00	-	106,66	122,25
400	91,40	116,16	-	50,00	-	109,67	124,16
410	91,42	121,25	-	50,00	-	112,84	125,91
420	91,41	126,30	-	50,00	-	116,26	127,44
430	91,92	104,12	-	103,83	-	102,71	119,34
440	91,98	108,09	-	105,94	-	104,94	121,03

Tabela A.3: Eficiências *NAL* (busca local) e configurações das UGs (*XAL*) – Ajuste 1 [2/2]

Demanda (<i>MW</i>)	Eficiência UHE <i>NAL</i> (%)	Geração das UGs (<i>MW</i>)					
		1	2	3	4	5	6
450	92,01	112,07	-	108,08	-	107,23	122,63
460	92,04	116,05	-	110,23	-	109,60	124,12
470	92,04	120,03	-	112,40	-	112,07	125,51
480	91,94	110,63	-	107,30	-	140,00	122,06
490	91,96	115,84	-	110,12	-	140,00	124,05
500	91,96	121,14	-	113,00	-	140,00	125,87
510	91,95	126,56	-	115,93	-	140,00	127,51
520	91,82	99,94	100,51	101,65	-	100,43	117,47
530	91,88	102,99	102,86	103,23	-	102,08	118,84
540	91,93	106,00	105,26	104,82	-	103,76	120,15
550	91,97	108,99	107,73	106,42	-	105,45	121,40
560	92,00	111,96	110,26	108,02	-	107,17	122,59
570	92,02	114,92	112,84	109,62	-	108,92	123,71
580	92,03	117,85	115,48	111,21	-	110,70	124,76
590	92,03	120,75	118,19	112,79	-	112,52	125,74
600	92,02	123,62	120,97	114,35	-	114,41	126,65
610	91,97	118,10	115,71	111,34	-	140,00	124,85
620	91,97	121,65	119,05	113,27	-	140,00	126,03
630	91,96	125,17	122,53	115,19	-	140,00	127,11
640	91,94	128,64	126,22	117,06	-	140,00	128,08
650	91,91	131,99	130,25	118,85	-	140,00	128,91
660	91,94	104,67	104,19	104,12	124,43	103,01	119,58
670	91,98	107,48	106,48	105,61	125,06	104,59	120,78
680	92,01	110,28	108,82	107,11	125,67	106,19	121,92
690	92,03	113,07	111,22	108,62	126,25	107,82	123,02
700	92,04	115,85	113,68	110,13	126,81	109,48	124,05
710	91,95	109,01	107,75	106,43	125,39	140,00	121,41
720	91,98	112,35	110,59	108,23	126,10	140,00	122,74
730	91,99	115,68	113,52	110,03	126,78	140,00	123,99
740	91,99	119,02	116,56	111,84	127,42	140,00	125,16
750	92,00	129,40	127,08	117,47	129,13	118,64	128,28
760	91,98	131,87	130,10	118,78	129,47	120,89	128,88
770	91,97	128,96	126,58	117,23	129,07	140,00	128,16
780	91,94	132,15	130,46	118,93	129,50	140,00	128,95
790	91,91	135,05	135,05	120,46	129,86	140,00	129,58

Tabela A.4: Eficiências $\overline{NP}$ e configurações – Ajuste 1 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE $\overline{NP}$ (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	87,42	-	-	-	-	50,00	-
60	88,30	-	-	-	-	60,00	-
70	89,43	-	-	-	-	70,00	-
80	90,52	-	-	-	-	80,00	-
90	91,39	-	-	-	-	90,00	-
100	87,35	-	-	50,00	-	50,00	-
110	87,74	-	-	55,00	-	55,00	-
120	88,23	-	-	60,00	-	60,00	-
130	88,81	65,00	-	-	-	65,00	-
140	89,40	70,00	-	-	-	70,00	-
150	89,96	75,00	-	-	-	75,00	-
160	90,46	-	-	80,00	-	80,00	-
170	90,93	-	-	85,00	-	85,00	-
180	90,98	-	-	111,88	-	68,13	-
190	90,97	-	-	-	123,98	66,02	-
200	91,15	-	-	-	129,87	70,13	-
210	91,30	-	-	-	133,36	76,64	-
220	91,52	-	-	-	135,00	85,00	-
230	91,84	-	-	-	134,31	95,69	-
240	90,43	80,00	-	80,00	-	80,00	-
250	90,36	65,78	-	118,45	-	65,78	-
260	90,51	66,93	-	-	126,14	66,93	-
270	90,68	70,09	-	-	129,83	70,09	-
280	90,86	73,89	-	-	132,23	73,89	-
290	91,03	78,09	-	-	133,82	78,09	-
300	91,24	-	-	82,62	134,76	82,62	-
310	91,34	-	-	-	122,17	65,65	122,17
320	91,42	-	-	-	126,44	67,11	126,44
330	91,47	-	-	-	129,91	70,18	129,91
340	91,50	-	-	-	132,62	74,75	132,62
350	91,57	134,50	-	-	134,50	81,00	-
360	91,72	135,03	-	-	135,03	89,94	-
370	92,01	-	-	-	123,33	123,33	123,33
380	90,94	66,02	-	-	123,98	66,02	123,98
390	91,02	67,69	-	-	127,31	67,69	127,31
400	91,10	70,13	-	-	129,87	70,13	129,87
410	91,17	73,15	-	-	131,85	73,15	131,85
420	91,25	76,64	-	-	133,36	76,64	133,36
430	91,36	134,42	-	80,58	134,42	80,58	-
440	91,55	-	124,59	-	124,59	66,23	124,59
450	91,57	127,41	-	-	127,41	67,76	127,41

Tabela A.4: Eficiências $\overline{NP}$ e configurações – Ajuste 1 [2/2]

Demanda (<i>MW</i>)	Eficiência UHE $\overline{NP}$ (%)	Geração das UGs (<i>MW</i>)					
		1	2	3	4	5	6
460	91,59	129,93	-	-	129,93	70,21	129,93
470	91,60	132,11	-	-	132,11	73,66	132,11
480	91,62	133,89	-	-	133,89	78,34	133,89
490	91,68	135,00	135,00	-	135,00	85,00	-
500	92,00	125,00	-	-	125,00	125,00	125,00
510	91,99	127,50	127,50	-	127,50	-	127,50
520	91,25	-	68,14	68,14	127,90	127,90	127,90
530	91,76	70,16	129,89	-	129,89	70,16	129,89
540	91,33	72,64	131,57	-	131,57	72,64	131,57
550	91,37	75,56	132,96	-	132,96	75,56	132,96
560	91,43	134,04	-	78,93	134,04	78,93	134,04
570	91,51	134,78	134,78	82,82	134,78	82,82	-
580	91,65	127,95	127,95	-	127,95	68,19	127,95
590	91,65	129,94	129,94	-	129,94	70,23	129,94
600	91,65	131,76	131,76	-	131,76	72,97	131,76
610	91,66	133,35	133,35	-	133,35	76,61	133,35
620	91,68	134,60	134,60	-	134,60	81,59	134,60
630	91,98	126,00	126,00	-	126,00	126,00	126,00
640	91,96	128,00	128,00	-	128,00	128,00	128,00
650	91,94	130,00	130,00	-	130,00	130,00	130,00
660	91,40	129,91	129,91	70,18	129,91	70,18	129,91
670	91,42	131,36	131,36	72,28	131,36	72,28	131,36
680	91,45	132,62	132,62	74,75	132,62	74,75	132,62
690	91,49	133,68	133,68	77,64	133,68	77,64	133,68
700	91,54	134,50	134,50	81,00	134,50	81,00	134,50
710	91,68	68,49	128,30	128,30	128,30	128,30	128,30
720	91,67	129,95	129,95	70,24	129,95	129,95	129,95
730	91,67	131,50	131,50	72,51	131,50	131,50	131,50
740	91,67	132,91	132,91	75,44	132,91	132,91	132,91
750	91,68	134,14	134,14	79,31	134,14	134,14	134,14
760	91,71	135,00	135,00	85,00	135,00	135,00	135,00
770	91,93	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33
780	91,90	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00
790	91,87	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67

Tabela A.5: Eficiências $\underline{NP}$ e configurações – Ajuste 1 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE $\underline{NP}$ (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	79,25	-	-	-	50,00	-	-
60	83,68	-	-	-	60,00	-	-
70	86,47	-	-	-	70,00	-	-
80	88,26	-	-	-	80,00	-	-
90	89,50	-	-	-	90,00	-	-
100	82,16	-	-	-	50,00	-	50,00
110	83,83	-	-	-	55,00	-	55,00
120	85,19	-	-	-	60,00	-	60,00
130	86,31	-	-	-	65,00	-	65,00
140	87,23	-	-	-	70,00	-	70,00
150	88,02	-	-	-	75,00	-	75,00
160	88,69	-	-	-	80,00	-	80,00
170	89,28	-	-	-	85,00	-	85,00
180	89,46	-	-	-	68,13	-	111,88
190	89,58	-	-	123,98	66,02	-	-
200	89,84	-	-	129,87	70,13	-	-
210	90,18	-	-	133,36	76,64	-	-
220	90,55	-	-	135,00	85,00	-	-
230	90,97	-	-	134,31	95,69	-	-
240	89,23	-	80,00	-	80,00	-	80,00
250	88,98	65,78	-	118,45	-	65,78	-
260	89,12	-	-	126,14	66,93	-	66,93
270	89,36	-	-	129,83	70,09	-	70,09
280	89,62	-	-	132,23	73,89	-	73,89
290	89,89	-	-	133,82	78,09	-	78,09
300	90,16	-	-	134,76	82,62	-	82,62
310	90,49	122,17	-	122,17	65,65	-	-
320	90,54	-	-	126,44	67,11	126,44	-
330	90,62	-	-	129,91	70,18	129,91	-
340	90,76	-	-	132,62	74,75	132,62	-
350	90,92	-	134,50	134,50	81,00	-	-
360	91,14	-	-	135,03	89,94	-	135,03
370	91,95	123,33	123,33	123,33	-	-	-
380	89,97	123,98	-	123,98	66,02	-	66,02
390	90,05	-	-	127,31	67,69	127,31	67,69
400	90,16	-	-	129,87	70,13	129,87	70,13
410	90,28	-	-	131,85	73,15	131,85	73,15
420	90,43	-	-	133,36	76,64	133,36	76,64
430	90,58	-	134,42	134,42	80,58	-	80,58
440	90,91	124,59	124,59	124,59	66,23	-	-
450	90,93	-	127,41	127,41	67,76	127,41	-

Tabela A.5: Eficiências $\underline{NP}$ e configurações – Ajuste 1 [2/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE $\underline{NP}$ (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
460	90,98	-	129,93	129,93	70,21	129,93	-
470	91,04	-	132,11	132,11	73,66	132,11	-
480	91,12	-	133,89	133,89	78,34	133,89	-
490	91,23	-	135,00	135,00	85,00	135,00	-
500	91,93	125,00	125,00	125,00	-	125,00	-
510	91,89	127,50	127,50	127,50	-	127,50	-
520	90,51	-	127,90	127,90	68,14	127,90	68,14
530	90,57	-	129,89	129,89	70,16	129,89	70,16
540	90,65	-	131,57	131,57	72,64	131,57	72,64
550	90,73	-	132,96	132,96	75,56	132,96	75,56
560	90,83	-	134,04	134,04	78,93	134,04	78,93
570	90,94	-	134,78	134,78	82,82	134,78	82,82
580	91,15	127,95	127,95	127,95	68,19	127,95	-
590	91,18	129,94	129,94	129,94	70,23	129,94	-
600	91,21	131,76	131,76	131,76	72,97	131,76	-
610	91,25	133,35	133,35	133,35	76,61	133,35	-
620	91,31	-	134,60	134,60	81,59	134,60	134,60
630	91,93	126,00	126,00	126,00	-	126,00	126,00
640	91,90	128,00	128,00	128,00	-	128,00	128,00
650	91,87	130,00	130,00	130,00	-	130,00	130,00
660	90,83	129,91	129,91	129,91	70,18	129,91	70,18
670	90,88	131,36	131,36	131,36	72,28	131,36	72,28
680	90,93	132,62	132,62	132,62	74,75	132,62	74,75
690	90,99	133,68	133,68	133,68	77,64	133,68	77,64
700	91,06	134,50	134,50	134,50	81,00	134,50	81,00
710	91,31	128,30	128,30	128,30	68,49	128,30	128,30
720	91,32	129,95	129,95	129,95	70,24	129,95	129,95
730	91,33	131,50	131,50	131,50	72,51	131,50	131,50
740	91,35	132,91	132,91	132,91	75,44	132,91	132,91
750	91,38	134,14	134,14	134,14	79,31	134,14	134,14
760	91,44	135,00	135,00	135,00	85,00	135,00	135,00
770	91,93	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33
780	91,90	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00
790	91,87	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67

Tabela A.6: Eficiências $\underline{NP}^*$ e configurações – Ajuste 1 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE $\underline{NP}^*$ (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	85,30	-	-	-	-	-	50,00
60	86,75	-	-	-	-	-	60,00
70	88,01	-	-	-	-	-	70,00
80	89,13	-	-	-	-	-	80,00
90	90,11	-	-	-	-	-	90,00
100	85,35	-	50,00	-	-	-	50,00
110	86,27	-	55,00	-	-	-	55,00
120	87,11	-	60,00	-	-	-	60,00
130	87,86	-	65,00	-	-	-	65,00
140	88,55	-	70,00	-	-	-	70,00
150	89,17	-	75,00	-	-	-	75,00
160	89,72	-	80,00	-	-	-	80,00
170	90,21	-	85,00	-	-	-	85,00
180	90,30	111,88	-	-	-	-	68,13
190	90,34	-	-	123,98	-	-	66,02
200	90,41	-	-	129,87	-	-	70,13
210	90,57	-	-	133,36	-	-	76,64
220	90,83	-	-	135,00	-	-	85,00
230	91,20	-	-	134,31	-	-	95,69
240	89,94	80,00	80,00	-	-	-	80,00
250	89,82	118,45	65,78	-	-	-	65,78
260	89,90	-	66,93	126,14	-	-	66,93
270	90,07	-	70,09	129,83	-	-	70,09
280	90,26	-	73,89	132,23	-	-	73,89
290	90,48	-	78,09	133,82	-	-	78,09
300	90,71	-	82,62	134,76	-	-	82,62
310	90,97	122,17	-	122,17	-	-	65,65
320	90,96	-	-	126,44	-	126,44	67,11
330	90,97	-	-	129,91	-	129,91	70,18
340	91,02	-	-	132,62	-	132,62	74,75
350	91,13	-	134,50	134,50	-	-	81,00
360	91,30	-	135,03	135,03	-	-	89,94
370	91,95	123,33	123,33	123,33	-	-	-
380	90,53	123,98	66,02	123,98	-	-	66,02
390	90,57	-	67,69	127,31	-	127,31	67,69
400	90,64	-	70,13	129,87	-	129,87	70,13
410	90,74	-	73,15	131,85	-	131,85	73,15
420	90,85	-	76,64	133,36	-	133,36	76,64
430	90,98	-	80,58	134,42	-	134,42	80,58
440	91,24	124,59	124,59	124,59	-	-	66,23
450	91,23	-	127,41	127,41	-	127,41	67,76

Tabela A.6: Eficiências NP^* e configurações – Ajuste 1 [2/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NP^* (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
460	91,23	-	129,93	129,93	-	129,93	70,21
470	91,24	-	132,11	132,11	-	132,11	73,66
480	91,28	-	133,89	133,89	-	133,89	78,34
490	91,36	-	135,00	135,00	-	135,00	85,00
500	91,93	125,00	125,00	125,00	-	125,00	-
510	91,89	127,50	127,50	127,50	-	127,50	-
520	90,91	127,90	68,14	127,90	-	127,90	68,14
530	90,95	129,89	70,16	129,89	-	129,89	70,16
540	91,00	131,57	72,64	131,57	-	131,57	72,64
550	91,06	132,96	75,56	132,96	-	132,96	75,56
560	91,14	134,04	78,93	134,04	-	134,04	78,93
570	91,23	82,82	134,78	134,78	-	134,78	82,82
580	91,38	127,95	127,95	127,95	-	127,95	68,19
590	91,37	129,94	129,94	129,94	-	129,94	70,23
600	91,38	131,76	131,76	131,76	-	131,76	72,97
610	91,39	133,35	133,35	133,35	-	133,35	76,61
620	91,43	134,60	134,60	134,60	-	134,60	81,59
630	91,93	126,00	126,00	126,00	-	126,00	126,00
640	91,90	128,00	128,00	128,00	-	128,00	128,00
650	91,87	130,00	130,00	130,00	-	130,00	130,00
660	91,17	129,91	70,18	129,91	129,91	129,91	70,18
670	91,20	131,36	72,28	131,36	131,36	131,36	72,28
680	91,23	132,62	74,75	132,62	132,62	132,62	74,75
690	91,27	133,68	77,64	133,68	133,68	133,68	77,64
700	91,32	134,50	81,00	134,50	134,50	134,50	81,00
710	91,51	128,30	128,30	128,30	128,30	128,30	68,49
720	91,50	129,95	129,95	129,95	129,95	129,95	70,24
730	91,50	131,50	131,50	131,50	131,50	131,50	72,51
740	91,49	132,91	132,91	132,91	132,91	132,91	75,44
750	91,50	134,14	134,14	134,14	134,14	134,14	79,31
760	91,53	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	85,00
770	91,93	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33
780	91,90	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00
790	91,87	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67

Tabela A.7: Eficiências aparente e atualizadas – Ajuste 1
[1/2]

Demanda	Eficiências (%)			
	NP_{ap}	NP^*	NP	NA
50	91,23	85,30	87,42	87,42
60	92,64	86,75	88,30	88,30
70	93,31	88,01	89,43	89,43
80	93,56	89,13	90,52	90,52
90	93,65	90,11	91,39	91,39
100	91,23	85,35	87,35	87,35
110	92,05	86,27	87,74	87,83
120	92,64	87,11	88,23	88,55
130	93,05	87,86	88,81	89,24
140	93,31	88,55	89,40	89,87
150	93,46	89,17	89,96	90,33
160	93,56	89,72	90,46	90,58
170	93,61	90,21	90,93	90,93
180	93,68	90,30	90,98	91,34
190	93,86	90,34	90,97	91,58
200	94,00	90,41	91,15	91,89
210	94,08	90,57	91,30	92,04
220	94,10	90,83	91,52	92,10
230	94,12	91,20	91,84	92,09
240	93,56	89,94	90,43	90,65
250	93,58	89,82	90,36	90,87
260	93,72	89,90	90,51	91,05
270	93,82	90,07	90,68	91,28
280	93,89	90,26	90,86	91,50
290	93,93	90,48	91,03	91,68
300	93,96	90,71	91,24	91,82
310	93,98	90,97	91,34	91,93
320	94,08	90,96	91,42	92,01
330	94,15	90,97	91,47	92,05
340	94,20	91,02	91,50	92,09
350	94,22	91,13	91,57	92,11
360	94,22	91,30	91,72	92,09
370	94,25	91,95	92,01	92,07
380	93,86	90,53	90,94	91,55
390	93,94	90,57	91,02	91,67
400	94,00	90,64	91,10	91,77
410	94,05	90,74	91,17	91,86
420	94,08	90,85	91,25	91,92
430	94,09	90,98	91,36	91,97
440	94,10	91,24	91,55	92,01
450	94,17	91,23	91,57	92,05

Tabela A.7: Eficiências aparente e atualizadas – Ajuste 1
[2/2]

Demanda	Eficiências (%)			
	NP_{ap}	NP^*	NP	NA
460	94,22	91,23	91,59	92,07
470	94,25	91,24	91,60	92,08
480	94,27	91,28	91,62	92,08
490	94,28	91,36	91,68	92,06
500	94,29	91,93	92,00	92,03
510	94,34	91,89	91,99	92,00
520	94,05	90,91	91,25	91,82
530	94,09	90,95	91,76	91,88
540	94,13	91,00	91,33	91,94
550	94,15	91,06	91,37	91,98
560	94,17	91,14	91,43	92,02
570	94,17	91,23	91,51	92,04
580	94,22	91,38	91,65	92,05
590	94,25	91,37	91,65	92,06
600	94,28	91,38	91,65	92,06
610	94,30	91,39	91,66	92,05
620	94,30	91,43	91,68	92,03
630	94,31	91,93	91,98	92,00
640	94,35	91,90	91,96	91,98
650	94,38	91,87	91,94	91,96
660	94,15	91,17	91,40	91,94
670	94,18	91,20	91,42	91,98
680	94,20	91,23	91,45	92,01
690	94,21	91,27	91,49	92,03
700	94,22	91,32	91,54	92,04
710	94,25	91,51	91,68	92,05
720	94,28	91,50	91,67	92,04
730	94,30	91,50	91,67	92,03
740	94,31	91,49	91,67	92,02
750	94,32	91,50	91,68	92,00
760	94,33	91,53	91,71	91,98
770	94,36	91,93	91,93	91,97
780	94,38	91,90	91,90	91,94
790	94,40	91,87	91,87	91,91

Tabela A.8: Eficiências NA (busca global) e configurações de UGs (XA) – Ajuste 2 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NA (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	87,34	-	-	-	-	50,00	-
60	88,44	-	-	-	-	60,00	-
70	89,52	-	-	-	-	70,00	-
80	90,46	-	-	-	-	80,00	-
90	91,30	-	-	90,00	-	-	-
100	87,30	-	-	50,00	-	50,00	-
110	87,91	-	-	50,00	-	60,00	-
120	88,57	-	-	50,00	-	70,00	-
130	89,21	-	-	80,00	-	50,00	-
140	89,84	-	-	90,00	-	50,00	-
150	90,28	-	-	100,00	-	50,00	-
160	90,53	-	-	97,65	-	62,35	-
170	90,91	-	-	92,04	-	77,96	-
180	91,26	-	-	93,45	-	86,55	-
190	91,54	-	-	96,40	-	93,60	-
200	91,76	-	-	99,84	-	100,16	-
210	91,90	-	-	103,42	-	106,58	-
220	91,98	-	-	106,91	-	113,09	-
230	92,00	-	-	110,00	-	-	120,00
240	90,62	-	94,02	95,98	-	50,00	-
250	90,82	-	100,42	99,58	-	50,00	-
260	90,99	-	87,77	92,10	-	80,13	-
270	91,22	88,53	-	93,83	-	87,64	-
280	91,42	92,47	-	95,61	-	91,92	-
290	91,58	-	96,68	97,51	-	95,80	-
300	91,72	-	100,55	99,65	-	99,80	-
310	91,83	104,67	-	101,75	-	103,58	-
320	91,91	-	108,61	103,91	-	107,48	-
330	91,96	112,65	-	106,01	-	111,35	-
340	91,99	116,46	-	108,07	-	115,47	-
350	92,00	-	-	110,00	-	120,00	120,00
360	92,00	-	120,00	-	-	120,00	120,00
370	91,99	122,60	122,46	-	-	124,94	-
380	91,48	94,48	95,02	96,57	-	93,93	-
390	91,60	97,49	97,63	98,05	-	96,83	-
400	91,70	101,14	101,01	97,59	-	100,26	-
410	91,78	104,62	104,42	101,72	-	99,23	-
420	91,85	108,28	108,12	101,13	-	102,47	-
430	91,91	109,11	108,97	104,10	-	107,82	-
440	91,95	112,20	112,15	104,75	-	110,90	-

Tabela A.8: Eficiências NA (busca global) e configurações das UGs (XA) – Ajuste 2 [2/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NA (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
450	91,98	115,12	115,13	107,34	-	112,41	-
460	91,99	117,62	117,66	108,71	-	116,01	-
470	92,00	120,00	-	110,00	-	120,00	120,00
480	92,00	120,00	120,00	-	-	120,00	120,00
490	92,00	122,40	122,27	-	-	124,40	120,93
500	91,99	120,00	120,00	-	-	140,00	120,00
510	91,98	124,32	124,03	-	-	140,00	121,65
520	91,79	102,64	102,47	100,68	-	101,67	112,53
530	91,85	105,21	105,01	102,03	-	104,09	113,67
540	91,90	107,75	107,58	103,38	-	106,51	114,79
550	91,94	110,27	110,16	104,72	-	108,95	115,90
560	91,97	112,76	112,72	106,07	-	111,47	116,99
570	91,99	115,23	115,25	107,40	-	114,08	118,04
580	92,00	117,65	117,69	108,72	-	116,88	119,05
590	92,00	120,00	120,00	110,00	-	120,00	120,00
600	92,00	122,15	122,04	111,17	-	123,80	120,84
610	91,99	120,00	120,00	110,00	-	140,00	120,00
620	91,99	123,49	123,27	111,90	-	140,00	121,34
630	91,97	127,10	126,41	113,86	-	140,00	122,63
640	91,95	130,90	129,34	115,90	-	140,00	123,86
650	91,92	134,98	132,00	118,04	-	140,00	124,98
660	91,87	104,74	104,54	101,78	131,83	103,65	113,46
670	91,91	107,19	107,01	103,08	132,21	105,97	114,55
680	91,94	109,62	109,49	104,38	132,58	108,32	115,62
690	91,96	112,03	111,97	105,67	132,94	110,72	116,67
700	91,98	114,42	114,42	106,97	133,29	113,21	117,70
710	91,99	116,78	116,82	108,25	133,61	115,84	118,69
720	92,00	119,09	119,12	109,51	133,92	118,73	119,64
730	92,00	121,29	121,23	110,70	134,20	122,07	120,51
740	91,99	123,08	122,90	111,67	134,42	126,74	121,19
750	91,99	121,98	121,88	111,08	134,29	140,00	120,77
760	91,98	125,39	124,96	112,93	134,68	140,00	122,04
770	91,97	128,95	127,89	114,86	135,06	140,00	123,25
780	91,95	132,73	130,60	116,87	135,40	140,00	124,39
790	91,92	136,85	133,02	119,00	135,71	140,00	125,42

Tabela A.9: Eficiências NAL (busca local) e configurações de UGs (XAL) – Ajuste 2 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NAL (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	87,34	-	-	-	-	50,00	-
60	88,07	60,00	-	-	-	-	-
70	89,37	70,00	-	-	-	-	-
80	90,39	80,00	-	-	-	-	-
90	91,14	90,00	-	-	-	-	-
100	86,33	-	-	50,00	-	-	50,00
110	86,89	-	-	60,00	-	-	50,00
120	87,64	-	-	70,00	-	-	50,00
130	88,43	-	-	80,00	-	-	50,00
140	89,11	-	-	90,00	-	-	50,00
150	89,59	-	-	100,00	-	-	50,00
160	89,84	-	-	110,00	-	-	50,00
170	90,56	-	-	50,00	-	-	120,00
180	90,88	-	-	80,79	-	-	99,21
190	89,85	-	-	140,00	-	-	50,00
200	91,60	-	-	93,51	-	-	106,49
210	91,82	-	-	98,95	-	-	111,05
220	91,96	-	-	104,38	-	-	115,62
230	92,00	-	-	110,00	-	-	120,00
240	89,53	-	-	50,00	-	140,00	50,00
250	90,65	-	-	50,00	-	91,81	108,19
260	90,85	-	-	50,00	-	98,81	111,19
270	91,00	-	-	50,00	-	105,62	114,38
280	91,27	-	-	92,34	-	82,12	105,54
290	91,47	-	-	94,23	-	88,69	107,08
300	91,64	-	-	96,69	-	94,17	109,14
310	91,19	-	-	50,00	-	140,00	120,00
320	91,88	-	-	102,09	-	104,20	113,72
330	90,74	-	-	140,00	-	140,00	50,00
340	91,99	-	-	107,53	-	114,34	118,14
350	92,00	-	-	110,00	-	120,00	120,00
360	91,99	-	-	111,71	-	127,08	121,21
370	91,99	-	-	110,00	-	140,00	120,00
380	91,27	108,15	-	50,00	-	106,89	114,97
390	91,09	116,46	-	108,07	-	115,47	50,00
400	91,65	96,57	-	97,59	-	95,95	109,90
410	91,75	100,04	-	99,34	-	99,23	111,39
420	91,83	103,49	-	101,13	-	102,47	112,91
430	91,89	106,92	-	102,94	-	105,71	114,43
440	91,94	110,32	-	104,75	-	109,01	115,92

Tabela A.9: Eficiências *NAL* (busca local) e configurações das UGs (*XAL*) – Ajuste 2 [2/2]

Demanda (<i>MW</i>)	Eficiência UHE <i>NAL</i> (%)	Geração das UGs (<i>MW</i>)					
		1	2	3	4	5	6
450	91,98	113,66	-	106,56	-	112,41	117,38
460	91,99	116,92	-	108,32	-	116,01	118,75
470	92,00	120,00	-	110,00	-	120,00	120,00
480	91,99	122,60	-	111,42	-	124,97	121,01
490	91,99	120,00	-	110,00	-	140,00	120,00
500	91,98	125,20	-	112,83	-	140,00	121,97
510	91,96	130,54	-	115,71	-	140,00	123,75
520	91,32	120,00	120,00	110,00	-	120,00	50,00
530	91,33	122,32	122,20	111,26	-	124,21	50,00
540	91,90	107,75	107,58	103,38	-	106,51	114,79
550	91,94	110,27	110,16	104,72	-	108,95	115,90
560	91,97	112,76	112,72	106,07	-	111,47	116,99
570	91,99	115,23	115,25	107,40	-	114,08	118,04
580	92,00	117,65	117,69	108,72	-	116,88	119,05
590	92,00	120,00	120,00	110,00	-	120,00	120,00
600	91,99	116,60	116,64	108,15	-	140,00	118,62
610	91,99	120,00	120,00	110,00	-	140,00	120,00
620	91,99	123,49	123,27	111,90	-	140,00	121,34
630	91,89	115,84	115,87	140,00	-	140,00	118,30
640	91,89	120,00	120,00	140,00	-	140,00	120,00
650	91,89	124,32	124,03	140,00	-	140,00	121,65
660	91,87	104,74	104,54	101,78	131,83	103,65	113,46
670	91,91	107,19	107,01	103,08	132,21	105,97	114,55
680	91,94	109,62	109,49	104,38	132,58	108,32	115,62
690	91,96	112,03	111,97	105,67	132,94	110,72	116,67
700	91,98	114,42	114,42	106,97	133,29	113,21	117,70
710	91,99	116,78	116,82	108,25	133,61	115,84	118,69
720	92,00	119,09	119,12	109,51	133,92	118,73	119,64
730	91,99	115,45	115,47	107,52	133,43	140,00	118,13
740	91,99	123,08	122,90	111,67	134,42	126,74	121,19
750	91,99	121,98	121,88	111,08	134,29	140,00	120,77
760	91,98	125,39	124,96	112,93	134,68	140,00	122,04
770	91,97	128,95	127,89	114,86	135,06	140,00	123,25
780	91,95	132,73	130,60	116,87	135,40	140,00	124,39
790	91,90	126,66	126,04	140,00	134,82	140,00	122,48

Tabela A.10: Eficiências $\overline{NP}$ e configurações – Ajuste 2 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE $\overline{NP}$ (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	87,34	-	-	-	-	50,00	-
60	88,44	-	-	-	-	60,00	-
70	89,52	-	-	-	-	70,00	-
80	90,46	-	-	-	-	80,00	-
90	91,30	-	-	90,00	-	0,00	-
100	87,30	-	-	50,00	-	50,00	-
110	87,77	-	-	55,00	-	55,00	-
120	88,30	-	-	60,00	-	60,00	-
130	88,87	65,00	-	-	-	65,00	-
140	89,44	70,00	-	-	-	70,00	-
150	89,96	75,00	-	-	-	75,00	-
160	90,44	-	-	80,00	-	80,00	-
170	90,88	-	-	85,00	-	85,00	-
180	90,97	-	-	111,88	-	68,13	-
190	90,97	123,98	-	-	-	66,02	-
200	91,08	129,87	-	-	-	70,13	-
210	91,32	-	-	-	133,36	76,64	-
220	91,57	-	-	85,00	135,00	-	-
230	91,85	-	-	95,69	134,31	-	-
240	90,42	80,00	-	80,00	-	80,00	-
250	90,38	65,78	118,45	-	-	65,78	-
260	90,47	66,93	126,14	-	-	66,93	-
270	90,63	70,09	129,83	-	-	70,09	-
280	90,85	73,89	-	-	132,23	73,89	-
290	91,05	-	-	78,09	133,82	78,09	-
300	91,27	-	-	82,62	134,76	82,62	-
310	91,36	122,17	122,17	-	-	65,65	-
320	91,38	126,44	126,44	-	-	67,11	-
330	91,41	129,91	129,91	-	-	70,18	-
340	91,51	74,75	-	-	132,62	132,62	-
350	91,64	-	-	81,00	134,50	134,50	-
360	91,81	-	-	89,94	135,03	135,03	-
370	91,99	123,33	123,33	-	-	123,33	-
380	90,92	66,02	123,98	-	-	66,02	123,98
390	90,97	127,31	127,31	67,69	-	67,69	-
400	91,04	70,13	129,87	-	129,87	70,13	-
410	91,16	73,15	131,85	-	131,85	73,15	-
420	91,27	76,64	-	76,64	133,36	133,36	-
430	91,40	80,58	-	80,58	134,42	134,42	-
440	91,54	124,59	124,59	-	-	66,23	124,59
450	91,53	127,41	127,41	-	-	67,76	127,41

Tabela A.10: Eficiências $\overline{NP}$ e configurações – Ajuste 2 [2/2]

Demanda (<i>MW</i>)	Eficiência UHE $\overline{NP}$ (%)	Geração das UGs (<i>MW</i>)					
		1	2	3	4	5	6
460	91,56	129,93	129,93	-	129,93	70,21	-
470	91,60	132,11	132,11	-	132,11	73,66	0,00
480	91,66	133,89	-	78,34	133,89	133,89	0,00
490	91,76	135,00	-	85,00	135,00	135,00	0,00
500	91,98	125,00	125,00	-	-	125,00	125,00
510	91,95	127,50	127,50	-	-	127,50	127,50
520	91,20	127,90	127,90	68,14	-	68,14	127,90
530	91,25	129,89	129,89	70,16	129,89	70,16	-
540	91,32	131,57	131,57	72,64	131,57	72,64	-
550	91,39	75,56	132,96	75,56	132,96	132,96	-
560	91,47	78,93	134,04	78,93	134,04	134,04	-
570	91,56	82,82	134,78	82,82	134,78	134,78	-
580	91,60	127,95	127,95	-	127,95	68,19	127,95
590	91,62	129,94	129,94	70,23	129,94	129,94	-
600	91,65	131,76	131,76	72,97	131,76	131,76	-
610	91,69	133,35	133,35	76,61	133,35	133,35	-
620	91,74	134,60	134,60	81,59	134,60	134,60	-
630	91,92	126,00	126,00	-	126,00	126,00	126,00
640	91,92	128,00	128,00	-	128,00	128,00	128,00
650	91,91	130,00	130,00	-	130,00	130,00	130,00
660	91,36	129,91	129,91	70,18	129,91	70,18	129,91
670	91,40	131,36	131,36	72,28	131,36	72,28	131,36
680	91,44	74,75	132,62	74,75	132,62	132,62	132,62
690	91,48	77,64	133,68	77,64	133,68	133,68	133,68
700	91,54	81,00	134,50	81,00	134,50	134,50	134,50
710	91,64	128,30	128,30	68,49	128,30	128,30	128,30
720	91,66	129,95	129,95	70,24	129,95	129,95	129,95
730	91,67	131,50	131,50	72,51	131,50	131,50	131,50
740	91,68	132,91	132,91	75,44	132,91	132,91	132,91
750	91,70	134,14	134,14	79,31	134,14	134,14	134,14
760	91,74	135,00	135,00	85,00	135,00	135,00	135,00
770	91,88	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33
780	91,87	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00
790	91,85	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67

Tabela A.11: Eficiências $\underline{NP}$ e configurações – Ajuste 2 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE $\underline{NP}$ (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	74,06	-	-	-	50,00	-	-
60	82,25	-	-	-	60,00	-	-
70	86,63	-	-	-	70,00	-	-
80	88,70	-	-	-	80,00	-	-
90	89,59	-	-	-	90,00	-	-
100	79,24	-	50,00	-	50,00	-	-
110	82,19	-	-	-	55,00	-	55,00
120	84,35	-	-	-	60,00	-	60,00
130	86,00	-	-	-	65,00	-	65,00
140	87,25	-	-	-	70,00	-	70,00
150	88,21	-	-	-	75,00	-	75,00
160	88,95	-	-	-	80,00	-	80,00
170	89,52	-	-	-	85,00	-	85,00
180	89,56	-	-	-	111,88	-	68,13
190	89,40	-	-	123,98	66,02	-	-
200	89,83	-	-	129,87	70,13	-	-
210	90,30	-	-	133,36	76,64	-	-
220	90,64	-	-	135,00	85,00	-	-
230	90,85	-	-	134,31	95,69	-	-
240	89,40	-	80,00	-	80,00	-	80,00
250	88,82	-	-	118,45	65,78	-	65,78
260	88,97	-	-	126,14	66,93	-	66,93
270	89,32	-	-	129,83	70,09	-	70,09
280	89,67	-	-	132,23	73,89	-	73,89
290	89,99	-	-	133,82	78,09	-	78,09
300	90,28	-	-	134,76	82,62	-	82,62
310	90,37	-	-	122,17	65,65	-	122,17
320	90,46	-	-	126,44	67,11	-	126,44
330	90,61	-	-	129,91	70,18	-	129,91
340	90,78	-	-	132,62	74,75	-	132,62
350	90,93	-	-	134,50	81,00	-	134,50
360	91,07	-	-	135,03	89,94	-	135,03
370	91,78	-	-	123,33	123,33	-	123,33
380	89,86	-	123,98	123,98	66,02	-	66,02
390	89,99	-	127,31	127,31	67,69	-	67,69
400	90,15	-	129,87	129,87	70,13	-	70,13
410	90,33	-	131,85	131,85	73,15	-	73,15
420	90,51	-	133,36	133,36	76,64	-	76,64
430	90,68	-	134,42	134,42	80,58	-	80,58
440	90,85	-	124,59	124,59	66,23	-	124,59
450	90,90	-	127,41	127,41	67,76	-	127,41

Tabela A.11: Eficiências NP e configurações – Ajuste 2 [2/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NP (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
460	90,98	-	129,93	129,93	70,21	-	129,93
470	91,06	-	132,11	132,11	73,66	-	132,11
480	91,15	-	133,89	133,89	78,34	-	133,89
490	91,23	-	135,00	135,00	85,00	-	135,00
500	91,84	-	125,00	125,00	125,00	-	125,00
510	91,84	-	127,50	127,50	127,50	-	127,50
520	90,49	127,90	127,90	127,90	68,14	-	68,14
530	90,59	129,89	129,89	129,89	70,16	-	70,16
540	90,69	131,57	131,57	131,57	72,64	-	72,64
550	90,80	132,96	132,96	132,96	75,56	-	75,56
560	90,91	134,04	134,04	134,04	78,93	-	78,93
570	91,02	134,78	134,78	134,78	82,82	-	82,82
580	91,14	127,95	127,95	127,95	68,19	-	127,95
590	91,19	129,94	129,94	129,94	70,23	-	129,94
600	91,24	131,76	131,76	131,76	72,97	-	131,76
610	91,29	133,35	133,35	133,35	76,61	-	133,35
620	91,34	134,60	134,60	134,60	81,59	-	134,60
630	91,87	126,00	126,00	126,00	126,00	-	126,00
640	91,86	128,00	128,00	128,00	128,00	-	128,00
650	91,85	130,00	130,00	130,00	130,00	-	130,00
660	90,86	129,91	129,91	129,91	70,18	129,91	70,18
670	90,93	131,36	131,36	131,36	72,28	131,36	72,28
680	91,00	132,62	132,62	132,62	74,75	132,62	74,75
690	91,08	133,68	133,68	133,68	77,64	133,68	77,64
700	91,16	134,50	134,50	134,50	81,00	134,50	81,00
710	91,30	128,30	128,30	128,30	68,49	128,30	128,30
720	91,33	129,95	129,95	129,95	70,24	129,95	129,95
730	91,36	131,50	131,50	131,50	72,51	131,50	131,50
740	91,40	132,91	132,91	132,91	75,44	132,91	132,91
750	91,43	134,14	134,14	134,14	79,31	134,14	134,14
760	91,47	135,00	135,00	135,00	85,00	135,00	135,00
770	91,88	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33
780	91,87	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00
790	91,85	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67

Tabela A.12: Eficiências NP^* e configurações – Ajuste 2 [1/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NP^* (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
50	85,20	-	50,00	-	-	-	-
60	86,57	-	-	-	-	-	60,00
70	87,89	-	-	-	-	-	70,00
80	89,20	-	-	-	-	-	80,00
90	90,36	-	-	-	-	-	90,00
100	85,31	-	50,00	-	-	-	50,00
110	86,18	-	55,00	-	-	-	55,00
120	87,01	-	60,00	-	-	-	60,00
130	87,78	-	65,00	-	-	-	65,00
140	88,50	-	70,00	-	-	-	70,00
150	89,16	-	75,00	-	-	-	75,00
160	89,76	-	80,00	-	-	-	80,00
170	90,29	-	85,00	-	-	-	85,00
180	89,61	-	111,88	-	-	68,13	-
190	89,40	-	-	123,98	-	66,02	-
200	89,83	-	-	129,87	-	70,13	-
210	90,30	-	-	133,36	-	76,64	-
220	90,64	-	-	135,00	-	85,00	-
230	90,85	-	-	134,31	-	95,69	-
240	89,97	80,00	80,00	-	-	-	80,00
250	89,14	-	65,78	118,45	-	65,78	-
260	89,29	-	66,93	126,14	-	66,93	-
270	89,65	-	70,09	129,83	-	70,09	-
280	90,00	-	73,89	132,23	-	73,89	-
290	90,31	-	78,09	133,82	-	78,09	-
300	90,57	-	82,62	134,76	-	82,62	-
310	90,38	-	122,17	122,17	-	65,65	-
320	90,47	-	126,44	126,44	-	67,11	-
330	90,65	-	129,91	129,91	-	70,18	-
340	90,84	-	132,62	132,62	-	74,75	-
350	91,02	-	134,50	134,50	-	81,00	-
360	91,16	-	135,03	135,03	-	89,94	-
370	91,92	-	123,33	123,33	-	-	123,33
380	90,07	123,98	66,02	123,98	-	66,02	-
390	90,21	127,31	67,69	127,31	-	67,69	-
400	90,38	129,87	70,13	129,87	-	70,13	-
410	90,56	131,85	73,15	131,85	-	73,15	-
420	90,74	133,36	76,64	133,36	-	76,64	-
430	90,90	134,42	80,58	134,42	-	80,58	-
440	90,85	124,59	124,59	124,59	-	66,23	-
450	90,92	127,41	127,41	127,41	-	67,76	-

Tabela A.12: Eficiências NP^* e configurações – Ajuste 2 [2/2]

Demanda (MW)	Eficiência UHE NP^* (%)	Geração das UGs (MW)					
		1	2	3	4	5	6
460	91,01	129,93	129,93	129,93	-	70,21	-
470	91,11	132,11	132,11	132,11	-	73,66	-
480	91,21	133,89	133,89	133,89	-	78,34	-
490	91,30	135,00	135,00	135,00	-	85,00	-
500	91,92	125,00	125,00	125,00	-	-	125,00
510	91,88	127,50	127,50	127,50	-	-	127,50
520	90,66	127,90	68,14	127,90	-	68,14	127,90
530	90,77	129,89	70,16	129,89	-	70,16	129,89
540	90,88	131,57	72,64	131,57	-	72,64	131,57
550	90,99	132,96	75,56	132,96	-	75,56	132,96
560	91,10	134,04	134,04	134,04	-	78,93	78,93
570	91,19	134,78	134,78	134,78	-	82,82	82,82
580	91,16	127,95	127,95	127,95	-	68,19	127,95
590	91,22	129,94	129,94	129,94	-	70,23	129,94
600	91,28	131,76	131,76	131,76	-	72,97	131,76
610	91,35	133,35	133,35	133,35	-	76,61	133,35
620	91,41	134,60	134,60	134,60	-	81,59	134,60
630	91,92	126,00	126,00	126,00	-	126,00	126,00
640	91,89	128,00	128,00	128,00	-	128,00	128,00
650	91,86	130,00	130,00	130,00	-	130,00	130,00
660	91,14	129,91	70,18	129,91	129,91	129,91	70,18
670	91,19	131,36	72,28	131,36	131,36	131,36	72,28
680	91,24	132,62	74,75	132,62	132,62	132,62	74,75
690	91,31	133,68	77,64	133,68	133,68	133,68	77,64
700	91,38	134,50	134,50	134,50	134,50	81,00	81,00
710	91,46	128,30	128,30	128,30	128,30	128,30	68,49
720	91,48	129,95	129,95	129,95	129,95	129,95	70,24
730	91,50	131,50	131,50	131,50	131,50	131,50	72,51
740	91,52	132,91	132,91	132,91	132,91	132,91	75,44
750	91,55	134,14	134,14	134,14	134,14	134,14	79,31
760	91,61	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	85,00
770	91,88	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33	128,33
780	91,87	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00	130,00
790	91,85	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67	131,67

Tabela A.13: Eficiências aparente e atualizadas – Ajuste 2
[1/2]

Demanda	Eficiências (%)			
	NP_{ap}	NP^*	NP	NA
50	91,23	85,20	87,34	87,34
60	92,64	86,57	88,44	88,44
70	93,31	87,89	89,52	89,52
80	93,56	89,20	90,46	90,46
90	93,65	90,36	91,30	91,30
100	91,23	85,31	87,30	87,30
110	92,05	86,18	87,77	87,91
120	92,64	87,01	88,30	88,57
130	93,05	87,78	88,87	89,21
140	93,31	88,50	89,44	89,84
150	93,46	89,16	89,96	90,28
160	93,56	89,76	90,44	90,53
170	93,61	90,29	90,88	90,91
180	93,68	89,61	90,97	91,26
190	93,86	89,40	90,97	91,54
200	94,00	89,83	91,08	91,76
210	94,08	90,30	91,32	91,90
220	94,10	90,64	91,57	91,98
230	94,12	90,85	91,85	92,00
240	93,56	89,97	90,42	90,62
250	93,58	89,14	90,38	90,82
260	93,72	89,29	90,47	90,99
270	93,82	89,65	90,63	91,22
280	93,89	90,00	90,85	91,42
290	93,93	90,31	91,05	91,58
300	93,96	90,57	91,27	91,72
310	93,98	90,38	91,36	91,83
320	94,08	90,47	91,38	91,91
330	94,15	90,65	91,41	91,96
340	94,20	90,84	91,51	91,99
350	94,22	91,02	91,64	92,00
360	94,22	91,16	91,81	92,00
370	94,25	91,92	91,99	92,00
380	93,86	90,07	90,92	91,48
390	93,94	90,21	90,97	91,60
400	94,00	90,38	91,04	91,70
410	94,05	90,56	91,16	91,78
420	94,08	90,74	91,27	91,85
430	94,09	90,90	91,40	91,91
440	94,10	90,85	91,54	91,95
450	94,17	90,92	91,53	91,98

Tabela A.13: Eficiências aparente e atualizadas – Ajuste 2
[2/2]

Demanda	Eficiências (%)			
	NP_{ap}	NP^*	NP	NA
460	94,22	91,01	91,56	91,99
470	94,25	91,11	91,60	92,00
480	94,27	91,21	91,66	92,00
490	94,28	91,30	91,76	92,00
500	94,29	91,92	91,98	92,00
510	94,34	91,88	91,95	91,99
520	94,05	90,66	91,20	91,79
530	94,09	90,77	91,25	91,85
540	94,13	90,88	91,32	91,90
550	94,15	90,99	91,39	91,94
560	94,17	91,10	91,47	91,97
570	94,17	91,19	91,56	91,99
580	94,22	91,16	91,60	92,00
590	94,25	91,22	91,62	92,00
600	94,28	91,28	91,65	92,00
610	94,30	91,35	91,69	92,00
620	94,30	91,41	91,74	92,00
630	94,31	91,92	91,92	91,99
640	94,35	91,89	91,92	91,99
650	94,38	91,86	91,91	91,96
660	94,15	91,14	91,36	91,87
670	94,18	91,19	91,40	91,91
680	94,20	91,24	91,44	91,94
690	94,21	91,31	91,48	91,96
700	94,22	91,38	91,54	91,98
710	94,25	91,46	91,64	91,99
720	94,28	91,48	91,66	92,00
730	94,30	91,50	91,67	92,00
740	94,31	91,52	91,68	91,99
750	94,32	91,55	91,70	91,99
760	94,33	91,61	91,74	91,98
770	94,36	91,88	91,88	91,97
780	94,38	91,87	91,87	91,95
790	94,40	91,85	91,85	91,92

