



## ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AO PROBLEMA DE COORDENAÇÃO HIDROTÉRMICA

Anna Carolina da Rocha Henriques da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Alexandre Pinto Alves da Silva  
Antonio Carlos Siqueira de Lima

Rio de Janeiro  
Setembro de 2013

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AO PROBLEMA DE COORDENAÇÃO  
HIDROTÉRMICA

Anna Carolina da Rocha Henriques da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Dr. Alexandre Pinto Alves da Silva, Ph. D.

---

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.

---

Prof. Carlos Eduardo Pedreira, Ph. D.

---

Prof. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2013

Silva, Anna Carolina da Rocha Henriques da

Algoritmo Genético aplicado ao problema de  
Coordenação Hidrotérmica/Anna Carolina da Rocha  
Henriques da Silva – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XII, 89 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Pinto Alves da Silva  
Antonio Carlos Siqueira de Lima

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 72-74.

1.Algoritmo Genético. 2. Otimização. 3. Coordenação  
Hidrotérmica. I. Silva, Alexandre Pinto Alves da, *et al.* II.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,  
Programa de Engenharia Elétrica. III. Título

Dedico a Deus por ter colocado pessoas tão iluminadas no meu caminho. Aos meus pais e irmãos, pelas palavras de apoio. Ao meu marido, por me apoiar integralmente. E aos meus orientadores Alexandre e Antonio Carlos, por me amparar em todo o processo.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pela força de vontade, fé, saúde e por ter colocado pessoas no meu caminho que me apoiaram integralmente neste processo, mesmo sem ter a obrigação disso.

Aos meus pais e aos meus irmãos por todo apoio e ajuda com palavras de incentivos e por entender a necessidade de dedicar o meu tempo livre a esse trabalho.

Ao meu marido Angelo pelo tempo gasto ouvindo os problemas do trabalho, mesmo não entendendo nada de Coordenação Hidrotérmica e por ter passado as noites de sábado acordado ao meu lado me vendo programar em MATLAB.

Aos amigos da Eletrobrás pelo suporte dado e pelo apoio integral, entendendo que eu precisaria me ausentar em alguns momentos.

Ao meu orientador Alexandre pelo tempo gasto comigo, pelo apoio acadêmico e emocional e pela dedicação com o que faz o seu trabalho, sempre motivando a quem está a sua volta.

E ao Professor Antonio Carlos que me ajudou a concluir esse longo caminho.

Muito obrigada a todos, eu não teria conseguido sem vocês!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AO PROBLEMA DE COORDENAÇÃO HIDROTÉRMICA

Anna Carolina da Rocha Henriques da Silva

Setembro/2013

Orientadores: Alexandre Pinto Alves da Silva  
Antonio Carlos Siqueira de Lima

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho buscou analisar a Coordenação Hidrotérmica, através das técnicas de Algoritmo Genético (AG) somada a Cooperação Coevolutiva. O problema de Coordenação Hidrotérmica foi formulado através de uma minimização de custos. Para análise desse problema utilizou-se um Sistema Teste de alta complexidade composto de 14 usinas. Esse sistema hidrotérmico foi modelado a usinas individualizadas com vazões determinísticas.

As simulações utilizando Cooperação Coevolutiva foram realizadas utilizando quatro formas de Decomposição do Problema, sendo elas: Geográfica, Temporal, Cascata e Delta. Essa decisão visou analisar qual a melhor forma de decomposição.

Como resultado chegou-se a conclusão que a melhor forma de decomposição foi a Geográfica que resultou em uma melhora de mais de 11% do resultado comparado ao resultado utilizando apenas AG (sem a cooperação coevolutiva).

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

GENETIC ALGORITHM APPLIED TO THE PROBLEM OF HYDROTHERMAL  
COORDINATION

Anna Carolina da Rocha Henriques da Silva

September/2013

Advisors: Alexandre Pinto Alves da Silva  
Antonio Carlos Siqueira de Lima

Department: Electrical Engineering

This work analyzes the Hydrothermal Coordination, through the techniques of Genetic Algorithm (GA) coupled coevolutionary Cooperation. The hydrothermal coordination problem was made by a minimization of costs. To analyze this problem used a high complexity test systems consisting of 14 plants. This hydrothermal system was modeled with individual plants deterministic flow.

The simulations were performed using cooperation coevolutionary using four forms of decomposition problem, namely: Geographic, temporal, and Delta Waterfall. This decision aimed to analyze how best decomposition.

As a result we reached the conclusion that the best way was to Geographic breakdown which resulted in an improvement of more than 11% of the result compared to the result using only AG (without cooperation coevolutionary).

## **SUMÁRIO**

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Aspectos Gerais.....	1
1.1.1. Sistema Elétrico Brasileiro.....	2
1.2. Motivação .....	3
1.3. Objetivo .....	6
1.4. Organização do Documento .....	7
<b>CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE E CONHECIMENTOS BÁSICOS.....</b>	<b>9</b>
2.1. Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos .....	9
2.1.1. Usinas Térmicas .....	9
2.1.2. Usinas Hidrelétricas.....	10
2.1.3. Coordenação Hidrotérmica .....	12
2.2. Otimização Natural .....	17
2.2.1. Recozimento Simulado .....	17
2.2.2. Enxame de Partículas.....	19
2.2.3. Algoritmo Genético .....	21
2.2.3.1. Operador Genético Seleção.....	23
2.2.3.2. Operador Genético Cruzamento.....	24
2.2.3.3. Operador Genético Mutação .....	25
2.3. Comentários e conclusões .....	26
<b>CAPÍTULO 3 - TÉCNICAS PARA OTIMIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO .....</b>	<b>27</b>
3.1. Técnicas de Redução Dimensional .....	27
3.2. Busca Local Híbrida – Memetic.....	27
3.3. Cooperação Co-evolutiva .....	29
3.4. Técnicas de Decomposição do Problema .....	30

3.4.1. Considerando a Geografia do Problema .....	30
3.4.2. Considerando as Cascatas dos Rios.....	30
3.4.3. Considerando a relação Temporal.....	31
3.4.4. Grupamento Delta .....	31
3.4.5. Exemplo da Utilização das Técnicas de Decomposição do Problema .....	32
a) Considerando a Geografia do Problema.....	34
b) Considerando as Cascatas dos Rios .....	39
c) Considerando a relação Temporal.....	40
d) Grupamento Delta.....	41
e) Comparação entre os resultados.....	47
3.5. Comentários e conclusões .....	48
<b>CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E RESULTADOS</b>	
<b>49</b>	
4.1. Considerações Iniciais .....	49
4.1.1. Solução Base.....	49
4.1.2. Solução Otimizada .....	50
4.2. Dados do Sistema-Teste .....	50
4.3. Resultados.....	54
4.4. Comparações.....	62
4.5. Comentários e conclusões .....	69
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE A – Dados das Usinas Hidroelétricas .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE B – Gráficos das melhores simulações .....</b>	<b>78</b>

## **Sumário de Figuras**

Figura 1 – Carga de Demanda do SIN.....	1
Figura 2 – Capacidade Instalada.....	2
Figura 3 – Vazão Natural de Usinas .....	3
Figura 4 - Modelo de Hidroelétrica .....	11
Figura 5 – Fluxograma da decisão do uso de água.....	12
Figura 6 - Custo da operação.....	17
Figura 7 – Movimento da Partícula .....	20
Figura 8 – Fluxograma do AG.....	22
Figura 9 – Seleção por Roleta .....	23
Figura 10 – Esquema Algoritmo Memético .....	28
Figura 11 – Sistema-Teste Resumido .....	32
Figura 12 – Geração por Usina - Caso Base para Sistema-Teste resumido.....	34
Figura 13 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 1	35
Figura 14 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 2	36
Figura 15 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 3	36
Figura 16 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 4	37
Figura 17 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 5	38
Figura 18 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 6	38
Figura 19 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Cascata) – Passo 1.....	39
Figura 20 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Cascata) – Passo 2.....	40
Figura 21 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 1 .....	44
Figura 22 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 2 .....	44
Figura 23 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 3 .....	45
Figura 24 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 4 .....	45
Figura 25 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 5 .....	46

Figura 26 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 6 .....	47
Figura 27 – Sistema-Teste.....	51
Figura 28 – Geração por usina.....	60
Figura 29 – Armazenamento por usina .....	60
Figura 30 – Geração por usina – Subgrupo Geográfico.....	61
Figura 31 – Armazenamento por usina – Subgrupo Geográfico .....	61
Figura 32 – Geração Hidrelétrica - segundo [4].....	62
Figura 33 – Geração Hidrelétrica – Solução Base.....	63
Figura 34 – Geração Hidrelétrica – Solução Ótima.....	63
Figura 35 – Comparação entre as Gerações Hidrelétricas .....	64
Figura 36 – Geração Hidrelétrica por Usina – Considerando 24 meses .....	66
Figura 37 – Armazenamento das Usinas – Considerando 24 meses .....	66
Figura 38 – Geração Hidrelétrica por Usina – Demanda constante .....	68
Figura 39 – Comparação entre as Gerações Hidrelétricas – Demanda constante .....	68

## **Sumário de Tabelas**

Tabela 1 – Exemplo de Ordem de Mérito .....	10
Tabela 2 – Seleção por Torneio .....	24
Tabela 2 - Características das usinas Térmicas .....	33
Tabela 3 - Divisão de Grupos segundo Delta – Sistema Resumido .....	42
Tabela 4 - Características das usinas Hidráulicas .....	51
Tabela 5 - Características das usinas Térmicas .....	52
Tabela 6 – Despacho das usinas termelétricas .....	52
Tabela 7 – Carga por mês.....	53
Tabela 8 – Simulações Iniciais do Sistema Teste.....	54
Tabela 9 – Simulações do Sistema Teste por Subgrupo .....	55
Tabela 10 – Divisão do grupo para o Delta 1 .....	57
Tabela 11 – Divisão do grupo para o Delta 2.....	58
Tabela 12 – Simulações Delta 1 (2 iterações) .....	59
Tabela 13 – Simulação para 24 meses .....	65
Tabela 14 – Simulação para demanda constante .....	67

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são apresentadas a motivação e contextualização desse trabalho, introduzindo as idéias que nortearam as pesquisas envolvidas na produção do mesmo.

## 1.1. Aspectos Gerais

A demanda de energia elétrica aumenta a cada ano. Algumas curvas de demandas do Sistema Interligado Nacional (SIN) podem ser observadas na Figura 1 [1].

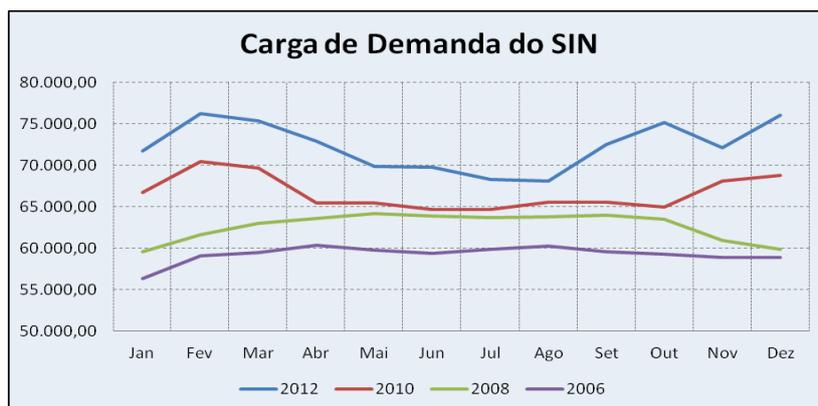


Figura 1 – Carga de Demanda do SIN

Esse aumento da demanda gera a necessidade de ampliação das áreas de Geração, Transmissão e Distribuição do Sistema Elétrico Brasileiro. No entanto, essa ampliação é complexa devido ao alto custo financeiro e social envolvido, além das restrições ambientais a novas construções.

Esse cenário demonstra a necessidade de otimização dos recursos existentes. Essa otimização é realizada através do Planejamento da Operação do Sistema Hidrotérmico, no qual o principal objetivo é minimizar o custo (em R\$), preservando os recursos naturais.

Sabendo-se que a base do sistema elétrico nacional é hidroelétrica, a forma de minimizar custos é através da maximização do uso das hidroelétricas e minimização do uso das termelétricas. No entanto, esse estudo é extremamente complexo devido ao número de restrições e variáveis do problema, como a dificuldade em prever a vazão das usinas, as perdas envolvidas e o aumento da demanda.

### 1.1.1. Sistema Elétrico Brasileiro

O Sistema Elétrico Brasileiro, segundo [2], tem cerca de 113,33 GW de capacidade instalada. Essa capacidade é dividida de acordo com a Figura 2:

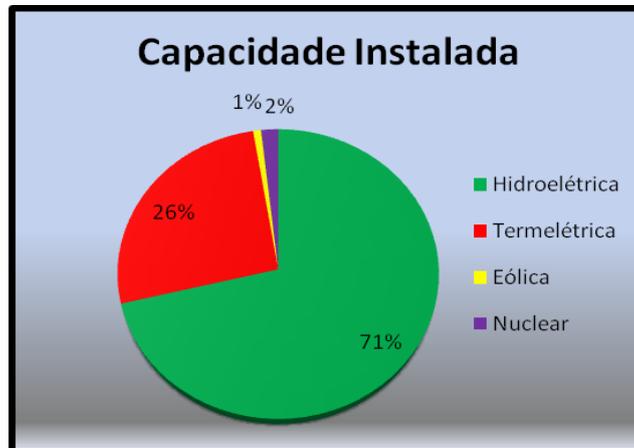


Figura 2 – Capacidade Instalada

Conforme já dito na Secção 1.1 e observado na Figura 2, a base da Geração Brasileira é hidroelétrica. Essa decisão deve-se à abundância dos recursos hídricos presentes no país.

As principais usinas do país foram construídas entre os anos de 1950 a 1980, com a exceção de Belo Monte que está em processo de construção com sua implementação prevista para 2015 [3].

Segundo [3], apenas 25% do potencial hidrelétrico foi explorado, o que significa que o país ainda tem potencial para continuar investindo no sistema hidroelétrico.

O Sistema Elétrico Brasileiro é dividido no Sistema Interligado Nacional (SIN) e Sistemas Isolados.

O SIN tem como objetivo interligar a operação entre seus agentes, permitindo que o sistema aproveite de maneira conjunta os seus recursos. Essa operação conjunta gera minimização dos custos globais de produção.

Os Sistemas Isolados são predominantemente térmicos e encontram-se, na sua maioria, em regiões do Norte. Esse sistema contempla menos de 5% da capacidade de produção de eletricidade do país.

Já o SIN representa mais de 95% da capacidade de produção da eletricidade do país e encontra-se dividido em quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte.

## 1.2. Motivação

O problema de Coordenação Hidrotérmica consiste na determinação da geração de energia elétrica a partir dos recursos disponível de forma a atender a demanda prevista, minimizando os custos de produção e considerando as restrições do problema.

Uma das principais variáveis no problema de coordenação é a vazão das usinas. Essa vazão não é facilmente previsível, pois é difícil definir uma tendência no comportamento dos seus dados [4]. Segue Figura 3 com exemplo de três usinas aleatórias.

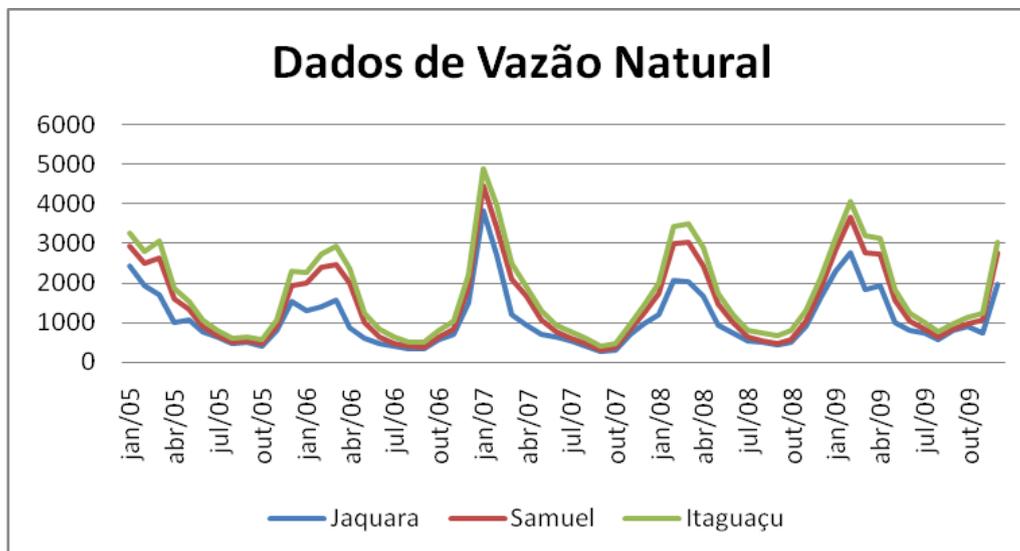


Figura 3 – Vazão Natural de Usinas

Além dessa dificuldade, têm-se diversas outras como a dimensionalidade do problema (alto número de variáveis), as perdas envolvidas, a navegabilidade dos rios. Esses são alguns dos fatores que tornam a Coordenação Hidrotérmica um problema extremamente complexo e gera impossibilidade de analisar todos os cenários possíveis.

Estas questões levam à necessidade de solucionar o problema de otimização da Coordenação Hidrotérmica sem a modelagem do sistema, ou seja, tentar obter a melhor solução possível com o mínimo de informações possíveis.

Outro ponto a ser levantado no problema de Coordenação Hidrotérmica é a interação entre os dados de vazão das usinas. Essas interações têm principalmente relação temporal e geográfica e estão explicadas a seguir.

- ✓ Interação Geográfica: Compreende as interações entre as variáveis de uma mesma usina, devido à capacidade de armazenamento das águas nas usinas. Esse armazenamento é função da capacidade do reservatório da usinas e das afluições do sistema em que ela se encontra. Essa característica gera uma interligação entre as decisões tomadas agora e as decisões futuros do sistema. O que faz com que todas as decisões de uma mesma usina se afetem.
- ✓ Interação Temporal: Compreende as interações entre as variáveis correspondentes a um mesmo intervalo de tempo. Um mesmo rio pode apresentar diversas usinas hidrelétricas, o que gera um acoplamento operativo entre essas usinas. A decisão de quanto será produzido na primeira usina afeta de maneira direta as demais usinas da cascata, a que faz com que as decisões atuais de uma usina da cascata afete as decisões futuras das demais usinas dessa cascata.

Atualmente, no setor elétrico brasileiro, o programa mais utilizado no estudo de Coordenação Hidrotérmica é o NEWAVE [5] de propriedade do CEPREL que utiliza sistemas equivalentes simplificados para representar o sistema real a ser estudado. Além disso, esses programas utilizam diversos estudos probabilísticos para a determinação de dados como demanda e vazões das usinas.

Esse programa demanda uma capacidade computacional muito grande, e que cresce proporcionalmente com a quantidade de usinas a serem estudadas. Isso se deve ao número de variáveis envolvidas.

Por essas dificuldades e pelas diversas incertezas envolvidas no problema, a Coordenação Hidrotérmica vem sendo debate em diversos trabalhos e estudos ao longo dos últimos anos.

Em paralelo a esse estudo, a técnica chamada “*Algoritmo Genético*” (AG) vem sendo debatida e tem como vantagem a possibilidade de trabalhar-se com o espaço de solução de problema (não é necessário modelar o problema em si e sim analisar dentro das possíveis soluções do problema qual a melhor solução) e lida com “*n*” soluções, ao invés de apenas uma.

Essas vantagens do AG tornam esse método de análise interessante para o problema de Coordenação Hidrotérmica. Ou seja, o AG pode ser considerado como um substituto para os métodos atuais de análise.

A utilização de AG para a Coordenação Hidrotérmica já vem sendo estudada e debatida na literatura, com resultados positivos, que demonstram que essa ferramenta se acopla bem ao problema em questão [6].

Entretanto, o AG também tem suas limitações. Nesse caso, uma das limitações mais analisadas na literatura é a quantidade de variáveis. Quanto maior o número de variáveis, pior o AG reage e mais facilmente o resultado encontrado é um solução sub-ótima do problema.

No caso de Coordenação Hidrotérmica, o número de variáveis é muito grande e aumenta de acordo com o número de usinas e do tempo a ser estudado. Como exemplo tem-se os dados abaixo, baseados em uma modelagem que utiliza como variável de controle as vazões defluentes mensais das usinas:

- ✓ Uma usina com um ano de estudo – 12 variáveis;
- ✓ Uma usina com dois anos de estudo –  $2 \times 12 = 24$  variáveis;
- ✓ Duas usinas com dois anos de estudo –  $2 \times 2 \times 12 = 48$  variáveis.

Então, é preciso se repensar na forma de utilização do AG no problema de Coordenação Hidrotérmica. Na literatura atual, uma opção muito usual é a utilização de Cooperação Coevolutiva em conjunto com o AG.

A Cooperação Coevolutiva é uma técnica que visa simplificar o problema, através da divisão do mesmo em diversos subproblemas, sendo que em cada subproblema devem-se unir as variáveis com maior valor de interação.

Pretende-se dividir um problema de “ $n$ ” variáveis em problemas de dimensão menor, e nesses subproblemas, aplica-se o AG para buscar melhor cada subproblema independentemente do outro. Após essa melhora, os subproblemas irão interagir entre si para encontrar uma melhor solução global.

As vantagens dessa técnica são a redução computacional e a facilidade em se trabalhar em espaços de solução menor. Por outro lado, a desvantagem é agrupar o problema de forma a manter no mesmo grupo as variáveis que interagem entre si.

Essa dificuldade deve-se ao fato do problema de coordenação hidrotérmico ter diversas formas de agrupamento como o agrupamento geográfico e temporal (já explicitados anteriormente).

Com esse estudo, espera-se aprimorar as técnicas de solução do problema de Coordenação Hidrotérmica já existentes na literatura, para técnicas mais simples com problemas de dimensionalidade menores e que geram soluções mais próximas da solução ótima do problema. Nesse ponto, este trabalho pretende analisar as formas de integração existentes no problema e chegar a conclusões quanto à melhoria gerada pela divisão do problema em subproblemas de menor dimensionalidade. Além disso, pretende-se testar outras formas de interações presentes na literatura como a fórmula Delta que será contextualizada nos capítulos a seguir.

### **1.3. Objetivo**

O objetivo do trabalho é aprimorar a utilização do AG já presente na literatura através da utilização conjunta deste algoritmo com a Cooperação Coevolutiva. Além disso,

deseja-se analisar a melhor forma de dividir o problema de Coordenação em diversos problemas.

Isso tende a minimizar o efeito da grande dimensionalidade do problema. Espera-se, com essa redução dimensional, encontrar melhores soluções através do AG.

Por exemplo, considerando um sistema de quatro usinas e um estudo de dois anos de operação, o número de variáveis a serem considerados seria de 96 ( $12 \times 2 \times 4$ ) variáveis, já se dividirmos em quatro grupos com número de variáveis iguais, o número de variáveis por grupo seria de 24 ( $96/4$ ) variáveis.

Por outro lado, a grande dificuldade existente é encontrar a melhor maneira de dividir o problema, respeitando a interação entre as variáveis. Essa dificuldade de dividir o grupo em subgrupos já foi observada quando se demonstrou que o problema tem tanto acoplamento espacial quanto temporal.

Considerando-se essa dificuldade em destaque, este trabalho pretende estudar um Sistema Teste, baseado em [7], e testar diferentes formas de divisão para saber qual a melhor. Dentre essas formas, serão utilizadas as empíricas (como considerando a geografia e a temporalidade do problema), além de outras soluções como a fórmula Delta (melhor conceituada nos itens seguinte).

#### **1.4. Organização do Documento**

No Capítulo 2 serão apresentados os embasamentos teóricos para desenvolvimento do trabalho. Dar-se-á destaque em Coordenação Hidrotérmico e na definição de Algoritmo Genéticos (AG) como forma de otimização natural a ser utilizado. Esse capítulo espera apresentar a metodologia e a linha de pensamento a ser utilizada nos demais capítulos.

Como principais contribuições do capítulo 2 têm-se:

- a) Modelagem do sistema hidrotérmico a ser utilizada;
- b) Vantagens e desvantagens da escolha do AG.

No Capítulo 3 serão apresentadas as linhas de pesquisa que serão acopladas ao AG para melhoria dos resultados do mesmo e as formas de decomposição do problema (com exemplos) que serão utilizadas no trabalho.

Como destaques do capítulo 3 têm-se:

- a) Definição da utilização da Cooperação Coevolutiva como linha de pesquisa a ser acoplada ao AG;
- b) Apresentação das formas de decomposição do problema com exemplificação das mesmas.

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados das simulações efetuadas, com suas devidas comparações com a literatura estudada, além da apresentação do Sistema Teste.

Dentre os principais resultados do Capítulo 4 destaca-se:

- a) Resultados das simulações realizadas;
- b) Comparação entre as diversas formas de Decomposição do Problema;
- c) Comparação entre os resultados obtidos e a literatura estudada.

No Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões do trabalho, analisando-se a importância do mesmo, a melhoria dos resultados obtidos e os possíveis trabalhos futuros a serem desenvolvidos no tema.

# CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE E CONHECIMENTOS BÁSICOS

Nesse capítulo serão apresentadas as bases do conhecimento para a elaboração desse trabalho. As bases a serem apresentadas nesse capítulo estão divididas em dois tópicos: (i) características das usinas térmicas e hidrelétrica e suas modelagens e a coordenação dessas duas formas de usinas, chamada de Coordenação Hidrotérmica; e (ii) principais formas de otimização natural. Espera-se com isso definir a técnica a ser utilizada no problema de Coordenação Hidrotérmica estudado.

## 2.1. Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos

Essa seção abordará as principais características das usinas térmicas e hidrelétricas. Espera-se, com isso, apresentar a modelagem dos sistemas a serem aplicada na dissertação.

### 2.1.1. Usinas Térmicas

Baseia-se na conversão de energia mecânica em energia térmica através da combustão, que por sua vez se converte em energia elétrica.

Este tipo de geração é dividido em usinas convencionais e usinas nucleares. Considerando as usinas convencionais, essas podem ser divididas em usinas com turbina a vapor e usinas a gás.

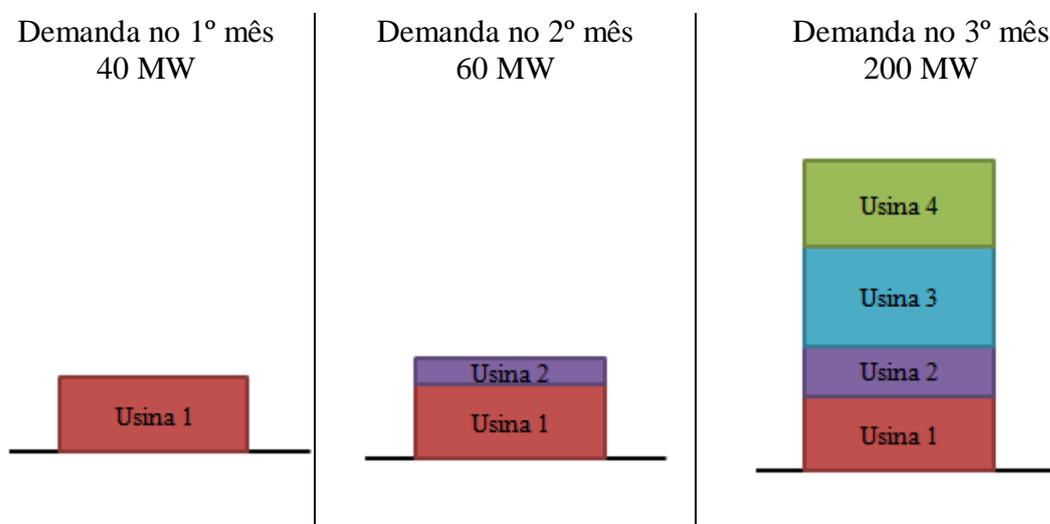
Quanto à modelagem de usinas térmicas, é muito comum a aplicação da função de custo quadrática ( $y=ax^2+bx+c$ ), onde os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  dependem das características de cada usina. Sendo o eixo  $x$  igual a geração demandada e o eixo  $y$  igual ao custo dessa geração.

Contudo, neste trabalho será utilizada uma função linear ( $y=ax+b$ ), já que o problema de despacho térmico será tratado com base em ordem de mérito, facilitando assim os cálculos. Essa forma de modelagem é muito comum no Brasil. Sendo o eixo  $x$  igual a geração demandada e o eixo  $y$  igual ao custo dessa geração.

Por ordem de mérito, entende-se o processo de pré-despacho térmico no qual as usinas são programadas de acordo com o Custo Variável Unitário (CVU), ou seja, a usina com menor custo será despachada primeiro até toda a sua capacidade ter sido utilizada; depois será despachada a segunda usina e assim sucessivamente.

Tabela 1 – Exemplo de Ordem de Mérito

Usinas	CVU (R\$/MWh)	Potência (MW)
1	10	50
2	20	20
3	30	100
4	40	70



Como pode ser visto na Tabela acima, no primeiro mês a demanda era de apenas 40 MW e despachou-se apenas a Usina 1. No segundo mês a demanda foi de 60 MW, superior a demanda da Usina 1, por isso despachou-se as Usinas 1 e 2. Já, no terceiro mês a demanda foi de 200 MW e por isso, necessitou-se despachar as 4 usinas.

### 2.1.2. Usinas Hidrelétricas

Segundo [8], a usina hidrelétrica é um conjunto de obras e equipamentos cujo objetivo é a geração de energia elétrica, através do potencial hidráulico existente em um rio. A geração hidrelétrica está ligada à vazão da água (em um determinado período de tempo) e à altura da queda d'água. Essa geração é realizada através da transformação de potência hidráulica em potência mecânica que por sua vez se transforma em potência

elétrica. Para análise da modelagem da usina hidrelétrica, segue Figura 4 com esquema de uma usina [9]:

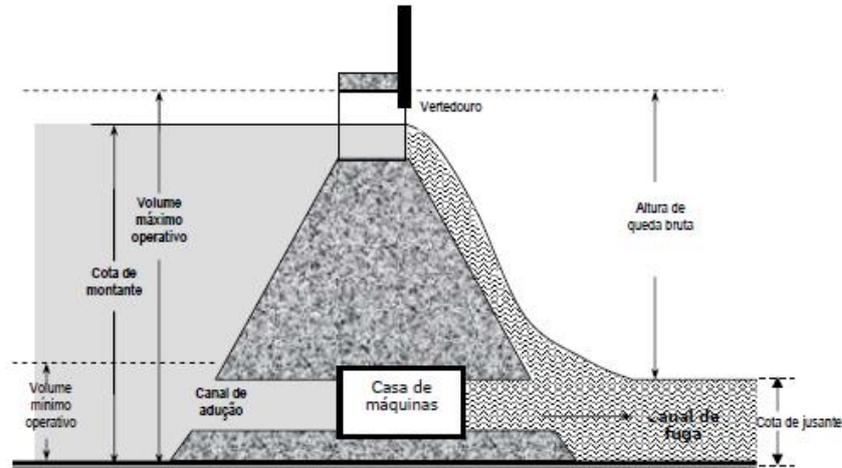


Figura 4 - Modelo de Hidroelétrica

Baseando-se na Figura 4, têm-se as seguintes variáveis:  $x_{i,t}$  : volume armazenado no reservatório da usina  $i$  no final do estágio (intervalo de tempo)  $t$ ;  $q_{i,t}$  : vazão turbinada pela usina  $i$  durante o estágio  $t$ ;  $v_{i,t}$  : vazão vertida pela usina  $i$  durante o estágio  $t$ . De onde, conclui-se que:

$$u_{i,t} = q_{i,t} + v_{i,t} \quad (1)$$

onde  $u_{i,t}$  é a vazão defluente da usina  $i$  durante o estágio  $t$ . Sabendo-se que  $h_{i,t}$  representa a altura de queda líquida da usina  $i$  durante o estágio  $t$ , pode calcular  $h_{i,t}$  a partir de:

$$h_{i,t} = \varphi(x_{i,t}) - \Theta(u_{i,t}) - pc_{i,t} \quad (2)$$

onde  $\varphi(x_{i,t})$ : cota montante, em função do volume médio de água armazenada, do canal de fuga da usina  $i$ ;  $\Theta(u_{i,t})$ : polinômio da cota jusante, em função da vazão defluente, do canal de fuga da usina  $i$ ;  $pc_{i,t}$ : perda de carga hidráulica da usina  $i$  durante o estágio  $t$ .

O volume  $x$  equivale à quantidade de água armazenada no reservatório em um determinado instante, o qual é limitado pelos volumes mínimo  $x_{\min}$  e máximo  $x_{\max}$  permitido para o funcionamento da usina em condições normais de operação. O volume útil da usina é calculado pela diferença entre estes valores.

A vazão turbinada  $q$  representa a vazão que foi efetivamente utilizada na transformação da energia hidráulica em energia elétrica. Esta vazão é limitada pelo turbinamento máximo  $q_{\max}$  da usina.

A cota montante  $\varphi_i(x)$  é a altura do nível d'água montante do reservatório, sendo função do volume médio de água armazenado no estágio de interesse. A cota jusante  $\Theta_i(u)$  é a altura do nível d'água a jusante do reservatório sendo expressa em função da defluência.

A perda de carga  $p_c$  representa a perda de carga hidráulica, em metros, que a água sofre pela passagem no conduto forçado, desde o reservatório até as turbinas, devido ao atrito entre a água e as paredes da tubulação. Este valor não foi considerado no trabalho, devido à dificuldade na obtenção desses dados.

### 2.1.3. Coordenação Hidrotérmica

O Planejamento da Coordenação Hidrotérmica pode ser modelado através de um problema de minimização do Custo Operacional. Nesta modelagem, uma das maiores dificuldades é determinar o valor das vazões naturais afluentes dos reservatórios estudados, já que a quantidade de chuva (base dessa variável) é um valor altamente incerto.

A importância da previsão deste valor encontra-se em [10], onde o autor expressa a importância da minimização do risco de déficit e, por outro lado, evitar o desperdício de energia hidrelétrica gerada por vertimento de água turbinável. Essa importância pode ser melhor compreendida no diagrama apresentado na Figura 5:

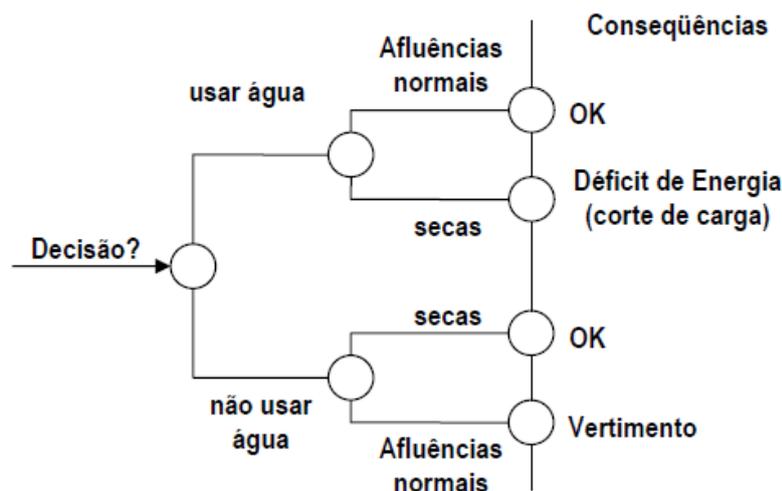


Figura 5 – Fluxograma da decisão do uso de água

Neste trabalho, o valor de vazão natural considerado foi calculado a partir das médias dos dados reais divulgados por [1]. Além disso, para evitar que o planejamento da operação gerasse vertimento, foram acrescentadas penalidades à modelagem.

O valor de Custo Operacional deve ser considerado igual ao Custo Complementar Térmico do Sistema. Isso ocorre, porque no caso das usinas hidrelétricas o incremento do preço devido ao aumento da carga gerado é muito pequeno frente ao custo total do sistema, ou seja, pode-se considerar o preço da geração hidrelétrica constante em relação à carga gerada.

Com relação à análise do problema existem na literatura diversas abordagens. Algumas delas são apresentadas abaixo:

➤ **Decomposição Heurística:** Esse método divide o problema em dois e simplifica as variáveis de forma que os problemas possam ser resolvidos numericamente e de forma independente. As maiores vantagens desse método são a rapidez da resposta e a simplicidade da solução, e a desvantagem é a necessidade de diversas simplificações o que gera uma solução pouco realista e na maioria dos casos muito custosa [11].

➤ **Decomposição de Benders:** Esse método baseia-se em dividir o problema principal em dois problemas, um mestre e um subproblema [12]. O problema mestre é uma relaxação do problema original, já o subproblema é uma versão do problema original considerando os valores encontrados na solução do problema original. Essa decomposição é feita de maneira iterativa até encontrar uma solução adequada. As maiores vantagens desse método são a rapidez em encontrar uma solução e o fato dessa solução ser próxima da solução ótima; já sua desvantagem é a dificuldade em encontrar uma solução para o problema mestre devido à complexidade do mesmo.

➤ **Programação Dinâmica:** Esse método é obtido através da divisão do problema em várias etapas, em que as variáveis do problema são divididas entre essas etapas. A solução do problema é encontrada a partir da junção das diversas soluções encontradas nos subproblemas. A maior vantagem desse método é a possibilidade de modelar com maior precisão as características do problema e a desvantagem é

que esta solução perde capacidade com problemas com grande número de variáveis [13].

➤ **Relaxação Lagrangeana:** Esse método consiste, de acordo com [14], em remover algumas das restrições da formulação original, embutindo-as como desigualdades na função objetivo. A ideia é penalizar a função objetivo quando as restrições removidas forem violadas. O “peso” é controlado por coeficientes chamados multiplicadores lagrangeanos. A maior vantagem é o fato de a solução ser iterativa, o que possibilita encontrar uma boa solução, e a desvantagem é que a convergência é lenta e muito sensível a mudança.

➤ **Programação Linear:** Esse método consiste em dividir o problema em duas partes, sendo elas (i) uma equação para descrever a função objetivo e (ii) equações e inequações que descrevem as restrições do problema [15]. A maior vantagem desse método é que as restrições são tratadas de maneira separada e por isso pode-se incluir e excluir restrições, e a desvantagem é que só funciona para problemas lineares ou problemas linearizados.

➤ **Otimização Natural:** Esse método consiste na criação de algoritmos heurísticos capazes de simular fenômenos biológicos, como o comportamento dos animais na natureza e a evolução das espécies. Esses algoritmos avaliam a função objetivo diversas vezes, tentando reproduzir a aleatoriedade com a qual os processos ocorrem na natureza. Suas principais vantagens são a robustez da solução, simplicidade na implementação e a possibilidade de trabalhar com funções objetivo não lineares. Já a sua maior desvantagem é a necessidade de alto poder computacional [16].

Devido à não linearidade do problema e à grande dimensionalidade do mesmo, optou-se pela utilização dos **métodos de Otimização Natural**.

Quanto à modelagem, o problema será estudado através de discretização mensal, ou seja, serão calculados valores de geração e custo de operações mensais e serão utilizadas como variáveis de decisão do problema os valores de vazão defluente das usinas com reservatório.

Apresenta-se abaixo a formulação final do problema, representando a minimização do Custo da Geração Térmica complementar e todas as restrições envolvidas no sistema:

$$\min \sum_{i=1}^T \left[ \lambda_t \sum_{j=1}^J \psi_j(g_{j,t}) \right] \quad (3)$$

Sujeito a:

$$D_t = G_t + P_t \quad (4)$$

$$G_t = \sum_{j=1}^J g_{j,t} \quad (5)$$

$$g_j^{\min} \leq g_{j,t} \leq g_j^{\max} \quad (6)$$

$$P_t = \sum_{i=1}^I p_{i,t} \quad (7)$$

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + \left( y_{i,t} + \sum_{k \in \Omega_i} u_{k,t} - u_{i,t} \right) \cdot \frac{\Delta t_t}{10^6} \quad (8)$$

$$h_{i,t} = \phi(x_{i,t}^{med}) - \theta(u_{i,t}) \quad (9)$$

$$x_{i,t}^{med} = \frac{x_{i,t-1} + x_{i,t}}{2} \quad (10)$$

$$p_{i,t} = k_i h_{i,t} q_{i,t} \quad (11)$$

$$u_{i,t} = q_{i,t} + v_{i,t} \quad (12)$$

$$x_{i,t}^{\min} \leq x_{i,t} \leq x_{i,t}^{\max} \quad (13)$$

$$u_{i,t}^{\min} \leq u_{i,t} \leq u_{i,t}^{\max} \quad (14)$$

$$q_{i,t}^{\min} \leq q_{i,t} \leq q_{i,t}^{\max}(h_{i,t}) \quad (15)$$

$$v_{i,t} \geq 0 \quad (16)$$

$$\lambda_t = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (17)$$

onde:

T= número de intervalos de tempo;

I = número de usinas hidrelétricas;

$\lambda_t$  = fator de desconto para o intervalo t;

J= número de usinas termelétricas do sistema;

$\psi_j$  = função de custo da usina termelétrica j; [R\$]

$g_{i,t}$  = geração de energia da usina termelétrica i durante o intervalo t; [ $MW_{med}$ ]

$D_t$  = demanda a ser atendida durante o período t; [ $MW_{med}$ ]

$G_t$  = geração de energia termelétrica total durante o intervalo t; [ $MW_{med}$ ]

$P_T$  = geração de energia hidrelétrica total durante o intervalo t; [ $MW_{med}$ ]

$g_j^{min}$  = geração de energia termelétrica mínima da usina j; [ $MW_{med}$ ]

$g_j^{max}$  = geração de energia termelétrica máxima da usina j; [ $MW_{med}$ ]

$p_{i,t}$  = geração da usina hidrelétrica i durante o intervalo t; [ $MW_{med}$ ]

$x_{i,t}$  = volume armazenado no reservatório da usina i no final do intervalo t; [ $hm^3$ ]

$y_{i,t}$  = vazão incremental (lateral) afluyente à usina i durante o intervalo t; [ $hm^3$ ]

$\Omega_i$  = conjunto de usinas imediatamente a montante da usina i;

$u_{i,t}$  = vazão defluente da usina i durante o intervalo t; [ $m^3/s$ ]

$\Delta t$  = duração do intervalo t; [s]

$h_{i,t}$  = Altura de queda líquida média da usina i no intervalo t; [m]

$\Phi(x)$  = polinômio da cota montante do reservatório da usina i; [m]

$\theta(u)$  = polinômio da cota jusante do canal de fuga da usina i; [m]

$x_{i,t}^{med}$  = volume médio no reservatório da usina i ao durante o período t; [ $hm^3$ ]

$k_i$  = produtibilidade específica da usina i;  $\left[ \frac{MW_{med}}{\frac{m^3}{s}(m)} \right]$

$q_{i,t}$  = vazão turbinada da usina i durante o intervalo t; [ $m^3/s$ ]

$v_{i,t}$  = vazão vertida pela usina i no intervalo t; [ $m^3/s$ ]

$x_{i,t}^{min}$  = volume mínimo armazenado na usina i ao final do intervalo t; [ $hm^3$ ]

$x_{i,t}^{max}$  = volume máximo armazenado na usina i ao final do intervalo t; [ $hm^3$ ]

As equações acima utilizam vazões determinísticas a usinas individualizadas, sem representação da rede de transmissão.

Espera-se com o uso da modelagem acima encontrar o ponto de custo de operação ótimo. Esse ponto é representado pelo local onde há o equilíbrio entre o custo imediato e o custo futuro, conforme apresentado na Figura 6 [9]. No qual o eixo x representa o volume armazenado:

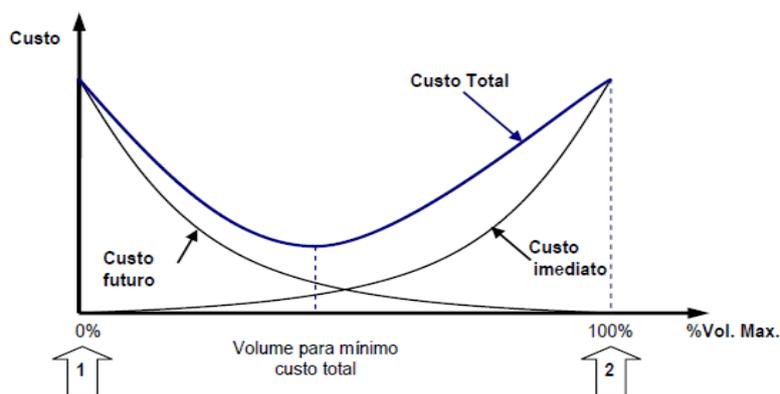


Figura 6 - Custo da operação

## 2.2. Otimização Natural

Nesta Seção será abordado os principais tipos de Otimização Natural considerados na literatura. Serão apresentadas as principais vantagens e desvantagens de cada forma de otimização, de modo a definir a otimização a ser usada na dissertação.

### 2.2.1. Recozimento Simulado

O Recozimento Simulado tem sua origem no processo metalúrgico para obtenção de estados de baixa energia em um sólido.

Esse processo se divide em duas etapas: na primeira, a temperatura é aumentada para permitir a mobilidade das moléculas; já na segunda etapa, a temperatura é lentamente reduzida até as moléculas se agruparem em uma forma de baixa energia (correspondente a uma estrutura cristalina).

A técnica de Recozimento Simulado, segundo [17], é um algoritmo de busca local, sendo que os novos elementos da vizinhança são escolhidos de forma semi-aleatória.

Durante as iterações do processo, novas soluções são encontradas, sendo elas aceitas ou não. No caso da nova solução ser melhor que anterior, a mesma é aceita; já no caso da solução ser pior, ela pode ser aceita ou não, de acordo com o critério de Metropolis [18].

Este critério é representado pela função de probabilidade apresentada abaixo:

$$P(E) = \exp(E_2 - E_1) / c.k \quad (18)$$

onde:

$P(E)$  = Probabilidade de uma solução inferior ser aceita;

$c$  = Parâmetro de controle (valor inicialmente alto que decai ao longo do processo);

$k$  = Constante de Boltzman;

$E_1$  = Valor da melhor solução da função objetivo encontrada até o momento;

$E_2$  = Novo valor da função objetivo encontrado.

A probabilidade  $P(E)$  é calculada e comparada com um número ( $r$ ) aleatório e contínuo, uniformemente distribuído entre 0 e 1. Caso o valor de  $P(E)$  seja maior que “ $r$ ” a nova solução é aceita, caso contrário a mesma é ignorada. O valor “ $c$ ” é um parâmetro de controle que permite regular se as soluções serão aceitas pelo critério estabelecido acima ou não. Inicialmente o valor de “ $c$ ” é alto, então as novas soluções serão aceitas mais facilmente; com o avanço do processo, o valor de “ $c$ ” decai, sendo mais difícil aceitar soluções inferiores às anteriormente encontradas.

O critério de parada do algoritmo é atingido quando a função objetivo é atendida. Segundo [19], o algoritmo base para o processo de Recozimento Simulado pode ser expresso da seguinte forma:

( $x$  é uma solução qualquer);

( $x'$  é a solução vizinha de  $x$ );

( $T$  é a temperatura);

### **Início**

**Enquanto** temperatura ( $T$ ) elevada **faça**

Gera  $x'$  de  $x$ ;

Avaliar a variação de energia;

$$\Delta E = f(x') - f(x)$$

**Se**  $\Delta E > 0$  então  $x \leftarrow x'$

**Se não**

Gerar  $r \in \text{Unif}[0,1]$

**Se**  $r < P(E)$

**Então**  $x \leftarrow x'$

Reduzir a temperatura T

Testar critério de parada

**Fim**

Uma das principais vantagens dessa técnica é sua propriedade de aceitar soluções piores que a solução corrente, o que possibilita escapar de ótimo local; esta propriedade decai à medida que a solução ótima vai se aproximando. Já como principal desvantagem tem-se o fato desta técnica ter “pouca inteligência”, pois utiliza como parâmetro apenas a variação da função objetivo.

### **2.2.2. Enxame de Partículas**

O Enxame de Partículas tem sua origem em 1995 quando foi proposto em [20]. Este método baseia-se na relação entre as espécies, onde os indivíduos interagem entre si e com o meio ambiente, realizando, em conjunto, atividades que não teriam competência de realizar individualmente.

Esta relação é melhor definida em [21], onde o autor observa que o comportamento de um grupo de animais é influenciado tanto pela experiência individual quanto pela acumulada pelo resto do grupo. Essa análise dos animais é similar à base de estudo do Enxame de Partículas, onde cada possível solução corresponde a um ponto do espaço de busca, chamado partícula. Estas partículas têm dois dados associados, sendo o primeiro o grau de adequação à solução e o segundo a direção na qual essa partícula caminha (chamado velocidade).

A velocidade da partícula é calculada a cada iteração, considerando como dados: (i) a melhor posição da partícula (pMelhor – também chamado de memória da partícula), (ii) a melhor possível encontrada pelo grupo (iMelhor – também chamado de “cooperação”) e (iii) a tendência da partícula em permanecer na sua direção atual (inércia).

Como pode ser observado na Figura 7, retirada de [22], essas três variáveis definem a nova direção da partícula que, similar ao que ocorre na natureza, é função da composição da experiência do grupo e da experiência de cada indivíduo.

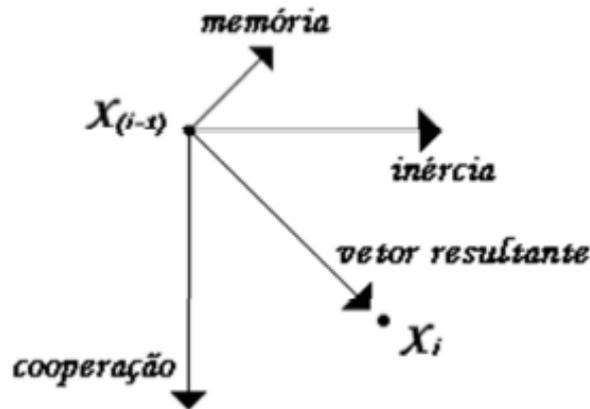


Figura 7 – Movimento da Partícula

O algoritmo base para o processo de Enxame de Partículas pode, segundo [22], ser expresso da seguinte forma:

**Início**

**Inicializar aleatoriamente**

N partículas;

Vetores velocidade de cada partícula;

**Avaliar** Função objetivo para cada partícula;

**Enquanto** não atender à condição de parada

Atualizar os valores de iMelhor;

**Para** cada partícula (1 até N)

Atualizar o pMelhor;

Atualizar o vetor velocidade;

Efetuar o movimento da partícula;

**Fim**

Os critérios de parada do algoritmo são atingidos de acordo com o número máximo de iterações ou a diferença entre a posição dos indivíduos.

Uma das principais vantagens dessa técnica é a fácil implementação já que existem poucos parâmetros. Já como principal desvantagem tem-se a lentidão em encontrar a solução ótima da mesma.

### 2.2.3. Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) pode ser definido como um modelo computacional que imita a teoria da Seleção Natural para realizar problemas de otimização. A teoria de Seleção Natural foi desenvolvida por Darwin e diz que: *”Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”*.

Esse algoritmo baseia-se na ideia de população, a qual é representada por uma série de possíveis soluções, chamadas de indivíduos. Essa população interage entre si, gerando novos indivíduos cada vez mais aptos. Essa evolução dos indivíduos baseia-se nos passos a seguir:

- (i) **Avaliação dos indivíduos:** Avalia a aptidão dos indivíduos (através da função de adequabilidade) e classifica os indivíduos mais aptos;
- (ii) **Seleção dos indivíduos:** Seleciona os indivíduos para a reprodução, essa seleção é feita a partir da avaliação dos indivíduos – Operador Seleção;
- (iii) **Cruzamento dos indivíduos selecionados:** Realiza o cruzamento dos indivíduos selecionados, gerando assim novos indivíduos – Operador Cruzamento;
- (iv) **Mutação dos indivíduos:** Seleciona aleatoriamente alguns indivíduos que sofrerão mutação – Operador Mutação.

Segundo [23], o processo acima pode ser representado pelo fluxograma da Figura 8.

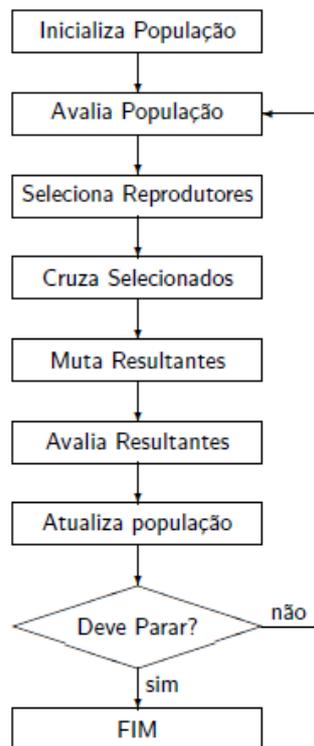


Figura 8 – Fluxograma do AG

Já o algoritmo base para o processo de AG foi retirado de [24]:

### **Início**

Iniciar  $P(t)$  – População;

Avaliar  $P(t)$ ;

**Enquanto** Critério de Parado não é atendido **fazer**

$t \leftarrow t+1$ ;

Selecione  $P(t)$  a partir de  $P(t-1)$ .

Altere  $P(t)$ ;

Avalie  $P(t)$ ;

**Fim**

**Fim**

Como critério de parada para esse método pode ser utilizado o número máximo de gerações, o número máximo de gerações sem melhora na solução, a variação da função aptidão, entre outros.

Como foi observado anteriormente, o método AG utiliza diversos operadores específicos. Esses operadores estão detalhados a seguir.

### 2.2.3.1. Operador Genético Seleção [25]

Operador responsável por selecionar os indivíduos mais aptos, de acordo com a função de adequabilidade, para esses contribuírem com a formação da nova geração.

Esses critérios definem a velocidade de convergência do AG, pois caso se escolha critério mais relaxados a convergência será lenta, por outro lado caso se aumente demais a pressão evolutiva do critério poderá ocorrer uma convergência prematura do AG. Esse ponto ótimo de convergência é muito importante, pois caso a convergência seja prematura pode-se chegar a uma solução sub-ótima (máximo local).

Esses operadores dividem-se em dois grupos base:

- **Seleção Proporcional:** Este método realiza a seleção com base no resultado da avaliação da função adequabilidade. O principal tipo é a Roleta que consiste na aplicação do conceito de proporcionalidade. Nesse modelo de solução cada indivíduo tem uma fatia da roleta, proporcional à sua adequabilidade. Logo, os indivíduos com melhor função adequabilidade têm maior probabilidade de serem sorteados (Figura 9).

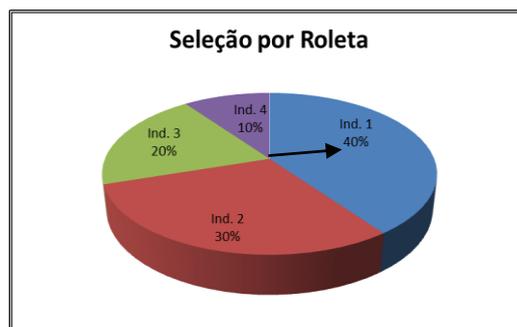


Figura 9 – Seleção por Roleta

- **Seleção de Ordenação:** Emprega-se este critério de seleção quando a diferença de aptidão entre os indivíduos é reduzida, possibilitando o AG a ser mais tendencioso na escolha dos novos indivíduos que vão contribuir para a próxima geração. O principal tipo é o Torneio que consiste na escolha aleatória de um grupo de indivíduos (cujo tamanho é determinado pelo usuário), onde o mais apto deles é selecionado. O

tamanho do torneio define a rapidez da convergência, pois quanto maior o torneio maior a probabilidade de apenas indivíduos aptos serem escolhidos. Apresenta-se abaixo ilustração da seleção por torneio:

Tabela 2 – Seleção por Torneio

Indivíduo	Aptidão	Torneios (Tam. = 2)
Ind. 1	0,4	Ind. 1 x Ind. 2 = Ind. 1
Ind. 2	0,3	Ind. 1 x Ind. 3 = Ind. 1
Ind. 3	0,2	Ind. 3 x Ind. 4 = Ind. 3
Ind. 4	0,1	Ind. 2 x Ind. 4 = Ind. 2

Outro critério a ser definido relativo a este operador é a opção de Elitismo que permite que os “j” melhores indivíduos da seleção anterior permaneçam na futura seleção. Essa característica deve ser considerada pelo programador que deve definir o número “n” de indivíduos a ser preservado.

### 2.2.3.2. Operador Genético Cruzamento [25]

Também conhecido como operador recombinação é o operador responsável pela criação de novos indivíduos, a partir dos indivíduos selecionados pelo operador seleção.

Os elementos utilizados na codificação de cada indivíduo (pais) são passados ao indivíduo da próxima geração (filhos). Essa contribuição é realizada através de critérios previamente definidos.

Os modelos de contribuição mais comumente utilizados são: de um ponto, de dois pontos, uniforme e intermediário.

- **Cruzamento de um ponto:** Os genes dos pais são recombinados a partir de um ponto de corte. Por exemplo: Pai 1 = [1 2 3 4] e Pai 2 = [a b c d], considerando o corte após a terceira característica, os filhos seriam [1 2 3 d] e [a b c 4];
- **Cruzamento de dois pontos:** Os genes dos pais são “cortados” em dois pontos e recombinados. Por exemplo: Pai 1 = [1 2 3 4] e Pai 2 = [a b c d], considerando os cortes após a primeira e terceira característica, os filhos seriam [1 b c 4] e [a 2 3 d];
- **Uniforme:** Os genes dos pais são “misturados” de acordo com uma máscara definida aleatoriamente. Por exemplo: Pai 1 = [1 2 3 4] e Pai 2 = [a b c d], considerando a máscara como [0 1 0 1], os filhos seriam [1 b 3 d] e [a 2 c 4];

- **Intermediário:** Os genes dos filhos são as médias ponderadas dos genes dos pais, essa média pode ser definida por um valor específico (“ $r$ ”) ou por um vetor.

### 2.2.3.3. Operador Genético Mutação [25]

É o operador responsável pela diversificação populacional. Essa diversificação ocorre através de alterações de um ou mais genes dos indivíduos com uma probabilidade denominada Taxa de Mutação.

Esse operador tem como função evitar a convergência prematura, ao mesmo tempo em que permite uma melhor exploração da área viável. Essa capacidade de exploração do espaço torna-se muito importante nas gerações mais avançadas, pois diversifica as soluções que já se encontram muito próximas, minimizando os riscos da solução convergir para um ponto de máximo local.

Na definição dos parâmetros do AG deve-se equilibrar os operadores mutação e cruzamento: caso o operador cruzamento seja demasiadamente alto, isto pode levar o problema a apresentar uma convergência prematura, já no caso do operador mutação ser elevado, isso pode acarretar numa perda de informações relevantes para a qualidade da solução.

Algumas das principais vantagens dessa técnica são:

- a) Não é necessário modelar o problema, apenas é necessária a modelagem de uma função capaz de analisar os resultados do problema;
- b) Apresentação de um conjunto de “ $n$ ” soluções, ao invés de apenas uma;
- c) Possibilita analisar problemas não lineares.

Já como principal desvantagem, apresenta perda de qualidade de acordo com o aumento do número de dimensões [26].

Considerando os dados acima e as vantagens e desvantagens dos métodos apresentados, optou-se por utilizar a técnica de **Algoritmos Genéticos** para a solução do problema de Coordenação Hidrotérmica. Considerando a desvantagem apresentada acima, utilizar-se-á uma técnica de otimização em conjunto com o AG, para melhora dos resultados encontrados. Essa técnica será definida no capítulo a seguir.

### **2.3. Comentários e conclusões**

Esse capítulo teve como contribuição para o trabalho a introdução dos conceitos de Coordenação Hidrotérmica e Otimização Natural, uma vez que esses conhecimentos são a base para todo o exposto nessa dissertação. Como conclusões principais do capítulo têm-se:

1. A definição da modelagem do problema de coordenação hidrotérmica;
2. A abordagem dos principais problemas nesse processo de coordenação, sendo eles: a dificuldade em prever o nível dos reservatórios e o grande número de variáveis;
3. A definição da atualização do Algoritmo Genético (AG) como forma de Otimização a ser utilizada na dissertação;
4. A apresentação das principais vantagens e desvantagens do AG;
5. A necessidade de minimização da perda de qualidade através da utilização do AG acoplado com outra técnica de otimização.

# **CAPÍTULO 3 - TÉCNICAS PARA OTIMIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO**

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas para melhoramento dos resultados obtidos através da utilização do Algoritmo Genético no problema de coordenação hidrotérmica. Além disso, serão apresentadas as formas de decomposição do problema possíveis com exemplos de utilização.

## **3.1. Técnicas de Redução Dimensional**

Pode ser definida, segundo [27], como a transformação de problemas de grande dimensão em uma representação significativa do mesmo problema com uma dimensionalidade reduzida. A representação reduzida deverá ter uma dimensionalidade corresponde à dimensionalidade intrínseca dos dados. A dimensionalidade intrínseca de dados é o mínimo número de parâmetros que contemplam as propriedades do problema.

Pode-se dizer que a redução da dimensionalidade gera um algoritmo com uma melhor capacidade em utilizar o espaço das características visando promover uma melhor solução, desde que a dimensionalidade reduzida ainda represente as informações contidas nos dados.

Suas principais vantagens são o fato de diminuir o número de variáveis e melhorar a capacidade em avaliar o espaço das soluções. Já sua desvantagem é a dificuldade em reduzir as variáveis de forma a preservar todas as informações necessárias ao problema.

## **3.2. Busca Local Híbrida – Memetic**

Essa técnica considera a interação entre Busca Local e os Algoritmos Genéticos, dando origem a um novo algoritmo chamado de Algoritmo Memético ou Algoritmo Híbrido.

Os Algoritmos Meméticos, de acordo com [28], podem ser definidos como um complemento do algoritmo genético tradicional, que utiliza uma técnica de busca local para reduzir a probabilidade de convergência prematura.

A filosofia dos Algoritmos Meméticos baseia-se na soma entre a melhoria individual com a cooperação populacional. Aplica-se, em conjunto com o Algoritmo Genético, um algoritmo de busca local para melhorar as respostas encontradas.

Entende-se por Algoritmo de Busca Local um processo de otimização que leva em conta a vizinhança de cada solução inicial, sendo vizinhança o espaço próximo à solução encontrada que contenha outras soluções possíveis para o problema.

Dada uma solução coerente, percorre-se a vizinhança dessa solução procurando por outras soluções de menor valor. Caso essa solução seja encontrada, ela passa a ser a nova solução do problema.

A Figura 10 apresenta a integração entre o Algoritmo Genético e a busca local [29].

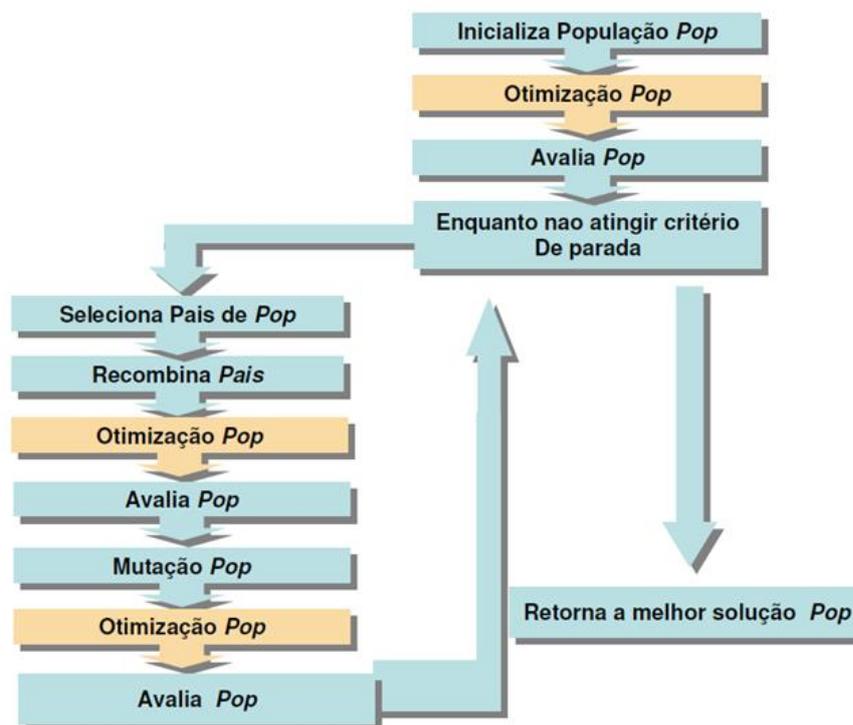


Figura 10 – Esquema Algoritmo Memético

A vantagem deste esquema é a melhor exploração do espaço, já que se preserva a relação especial (devido ao uso de Algoritmo Genético) mantendo ao mesmo tempo um conhecimento das vizinhanças (devido a busca local). Além disso, há uma maior

agilidade na otimização, já que se explora melhor o espaço em que estão as possíveis soluções.

Por outro lado, sua maior desvantagem é o problema da topologia que interfere de maneira significativa no processo de busca local. Além disso, pode-se citar a necessidade de um aumento computacional significativo devido ao tamanho da vizinhança a ser estudado quando o problema tem muitas variáveis.

### **3.3. Cooperação Co-evolutiva**

Essa técnica baseia-se na relação entre espécies chamada de Mutualismo [30], na qual dois indivíduos de espécies diferentes se beneficiam mutuamente. Um exemplo dessa relação na natureza é o caso das aves que catam parasitas na pele do gado. Neste caso, as aves são beneficiadas através de alimento, e o gado porque se livra dos parasitas.

Segundo [31], essa relação deve-se ao fato dessa técnica dividir o problema em subproblemas que primeiramente são otimizados de forma independente gerando espécies diferentes. Após essa otimização, os indivíduos de uma espécie entram em colaboração temporária com os indivíduos de outra espécie, gerando melhorias nas soluções encontradas pelas otimizações individuais.

Esse processo pode ser especificado através dos três passos apresentados em [32]:

- a) **Decomposição do problema:** Decompõe-se os vetores de dimensão inicial em vetores menores. Esses novos vetores deverão, preferencialmente, conter as variáveis que interagem entre si.
- b) **Otimização do subcomponente:** Evoluem-se os subcomponentes através de estratégias evolutivas próprias, no caso será utilizada a técnica de Algoritmo Genético no grupo em questão.
- c) **Coadaptação de subcomponentes:** Executa-se a coadaptação de forma a captar a interdependência entre os subcomponentes, ou seja, gerar a interação necessária entre os indivíduos de grupos diferentes. Essa etapa pode ser feita através de uma avaliação da função de aptidão do problema.

A vantagem principal desta técnica é a redução dimensional do problema estudado e a diversificação do espaço explorado. Já a sua desvantagem é a dificuldade de realizar a decomposição do problema de forma a manter as variáveis que interagem no mesmo grupo.

Considerando os dados acima, as vantagens e desvantagens dos métodos apresentados e a literatura estudada, optou-se por utilizar a técnica de **Cooperação Coevolutiva** para a solução do problema de Coordenação Hidrotérmica.

### **3.4. Técnicas de Decomposição do Problema**

Nesse item serão apresentadas as formas de agrupar os subgrupos para aplicação da Cooperação Co-evolutiva. Essa é a etapa de maior complexidade do problema, pois é muito difícil analisar as interações entre as variáveis e definir a divisão dos grupos.

#### **3.4.1. Considerando a Geografia do Problema**

Nesta análise os subgrupos foram divididos de maneira que em cada subgrupo ficassem agrupadas as variáveis relativas a uma usina.

Por exemplo: No caso do Sistema Teste ser composto por quatro usinas, os grupos serão:

- Grupo 1 – Usina 1;
- Grupo 2 – Usina 2;
- Grupo 3 – Usina 3;
- Grupo 4 – Usina 4.

#### **3.4.2. Considerando as Cascatas dos Rios**

Nesta análise os subgrupos foram divididos de maneira que em cada subgrupo ficassem agrupadas as variáveis relativas a todas as usinas de uma mesma cascata. Essa análise é coerente, pois para casos em que há mais de uma cascata a interação ocorre em maior intensidade para as usinas de uma mesma cascata.

Exemplo: No caso do Sistema Teste ser composto por duas cascatas com duas usinas cada, os grupos serão:

- Grupo 1 – Cascata 1 (usinas 1 e 2);

- Grupo 2 – Cascata 2 (usinas 3 e 4).

### 3.4.3. Considerando a relação Temporal

Nesta análise os subgrupos foram divididos de maneira que em cada subgrupo ficassem agrupados quatro meses consecutivos de todas as usinas de uma mesma cascata.

Exemplo: No caso do Sistema Teste ser composto por duas cascatas com duas usinas cada, os grupos serão:

- Grupo 1 – Meses de janeiro a abril das usinas da primeira cascata (usinas 1 e 2);
- Grupo 2 – Meses de maio a agosto das usinas da primeira cascata (usinas 1 e 2);
- Grupo 3 – Meses de setembro a dezembro das usinas da primeira cascata (usinas 1 e 2);
- Grupo 4 – Meses de janeiro a abril das usinas da segunda cascata (usinas 3 e 4);
- Grupo 5 – Meses de maio a agosto das usinas da segunda cascata (usinas 3 e 4);
- Grupo 6 – Meses de setembro a dezembro das usinas da segunda cascata (usinas 3 e 4).

### 3.4.4. Grupamento Delta

Nesta análise os subgrupos foram divididos de acordo com a metodologia apresentada em [33], que visa organizar os subgrupos através de uma função que, teoricamente, capta a interação entre as variáveis. Essa função é chamada de Delta, definida por [33]:

$$\delta_i = (\sum_{j=1} N_{pop} \cdot \delta_{i,j}) / N_{pop} \quad (19)$$

Sendo  $N_{pop}$  = Número de população do AG,  $\delta_{i,j}$  = Diferença entre o valor da variável do indivíduo "i" para o indivíduo "j".

A aplicação do Delta Grupo baseia-se nos passos apresentados abaixo:

1. Considerar um contator "i" igual a 1.
2. Inicializar  $\Delta$  em 0, ou seja, na primeira iteração a ordenação dos componentes do grupo é aleatória.
3. Dividir as variáveis de decisão em um número pré-definido de grupos "m".
4. Otimizar o i-ésimo componente para apenas 1 iteração através, neste caso, de Algoritmo Genético.

5. Se  $i < m$ , incrementar o contador  $i$  e retorna para o passo 4.
6. Montar o vetor  $\Delta$  usando a equação delta (equação 19).
7. Distribuir as variáveis nos grupos baseado na magnitude de delta
8. Parar caso o critério de parada seja alcançado ou retornar para o passo 3

No caso deste trabalho, optou-se por realizar a otimização do  $i$ -ésimo componente para mais de uma iteração. Variou-se a quantidade de iterações para melhor avaliação dos resultados.

### 3.4.5. Exemplo da Utilização das Técnicas de Decomposição do Problema

Para melhor exemplificar a decomposição do problema será simulado um caso teste, com o sistema resumido apresentado na Figura 11 baseado em [7]:



Figura 11 – Sistema-Teste Resumido

Para essa simulação, os dados de usinas térmicas utilizados foram os mesmos utilizados no sistema original:

Tabela 2 - Características das usinas Térmicas

N	Usina	Pot. Instalada (MW)	CVU (R\$/MWh)
1	Termopernambuco	638	60,00
2	Fortaleza	347	66,74
3	Fafen	151	71,29
4	Termo Ceará	220	82,72
5	Term Bahia	186	87,12
6	Camaçari	347	130,50
-	Total	1.889	N/A
	Déficit	Infinita	855,31

O valor de carga utilizado foi constante em 8.000MW/mês.

O objetivo é encontrar a simulação com o menor valor de custo (em R\$). Essa simulação será o ponto de mínimo da função objetivo do problema (especificado no Capítulo 2).

Para essa simulação utilizou-se as seguintes parâmetros para o AG, essa definição deve-se a simulações prévias com diversas combinações de parâmetros que possibilitaram a escolha da melhor possível:

- Seleção: Torneio de tamanho 4;
- Cruzamento: Uniforme;
- Critério de Parada: 2.000 gerações ou 50 gerações sem melhora;
- População: 200 indivíduos;
- Elite: 1 indivíduo;
- Range Inicial: 300 a 5.000;
- Mutação: Gaussiana.

A partir desse sistema, chegou-se a uma Solução Base, através da otimização do AG sem a decomposição em grupos. Esse resultado foi obtido após um total de dez simulações e o seu gráfico de geração está apresentado na Figura 12. Nesse gráfico o eixo x representa o tempo em meses (de janeiro a dezembro) e o eixo y representa a geração em MW:

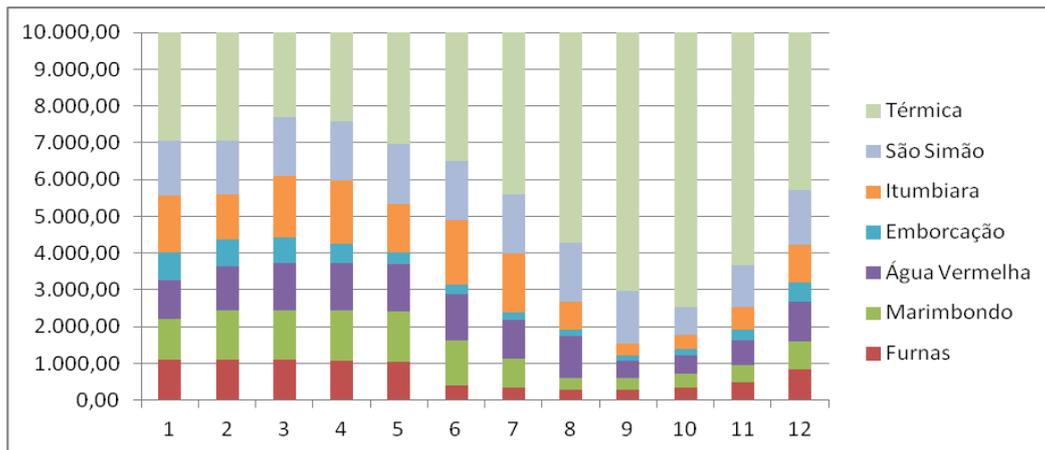


Figura 12 – Geração por Usina - Caso Base para Sistema-Teste resumido

O consumo de Hidrelétrica, utilizado na simulação apresentada acima, foi de 67.632 MW no ano estudado. Representando 70% da energia gerada. Os dados de vazão defluente, encontrados na solução base, foram utilizados como base das simulações por subgrupo.

O processo utilizado, nesse estudo, foi dividir as variáveis em grupos (apresentados nos itens abaixo) e otimizá-los individualmente mantendo os demais valores de vazão constantes. Para melhor entendimento desse processo, demonstrar-se-á abaixo o passo-a-passo dessas simulações. Após cada passo, comparou-se a geração de energia hidrelétrica com a solução do passo anterior.

#### a) Considerando a Geografia do Problema

Nessa otimização os grupos de variáveis foram divididos de acordo com as usinas, segundo a relação abaixo:

- Grupo 1 – Furnas contendo as variáveis de 1 a 12;
- Grupo 2 – Marimbondo contendo as variáveis de 13 a 24;
- Grupo 3 – Água Vermelha contendo as variáveis de 25 a 36;
- Grupo 4 – Emborcação contendo as variáveis de 37 a 48;
- Grupo 5 – Itumbiara contendo as variáveis de 49 a 60;
- Grupo 6 – São Simão contendo as variáveis de 61 a 72.

Após essa divisão simulou-se a otimização por grupo, de acordo com os seguintes passos detalhados a seguir.

**Passo 1** – Otimização do Grupo 1 mantendo os demais valores constantes e iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva; senão o resultado se mantém igual ao original.

Apresenta-se na Figura 13, gráfico com a nova geração encontrada:

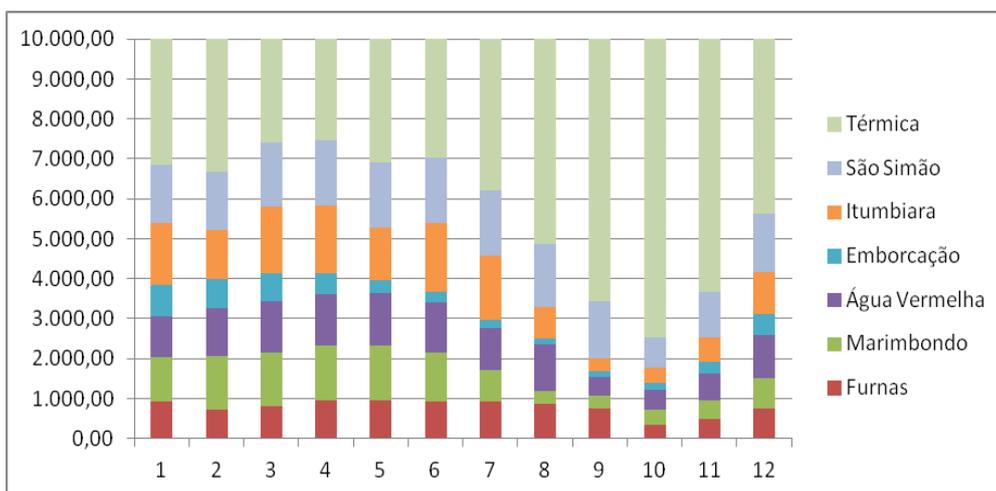


Figura 13 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 1

O uso de energia proveniente das usinas Hidrelétricas aumentou em 1,51% com relação ao inicial.

**Passo 2** – Otimização do Grupo 2 mantendo os demais valores constantes, sendo os valores do Grupo 1 iguais aos encontrados no passo 1 e os demais grupos iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva; senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 14, gráfico com a nova geração encontrada:

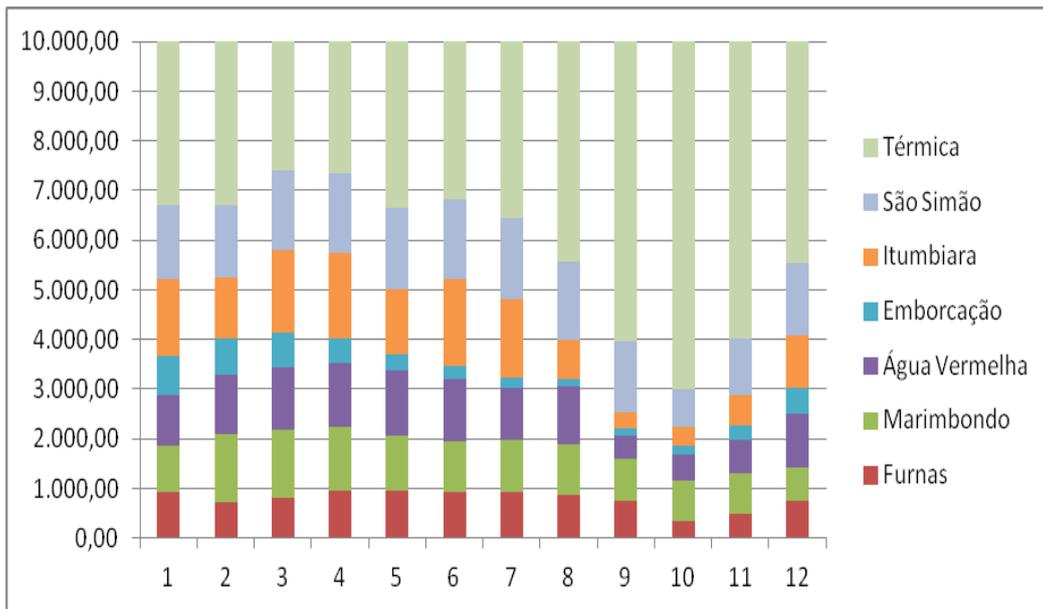


Figura 14 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 2

O uso de energia proveniente das usinas Hidrelétricas aumentou em 2,15% com relação ao passo anterior, acumulando um total de 3,63% de economia.

**Passo 3** – Otimização do Grupo 3 mantendo os demais valores constantes, sendo os valores dos Grupos 1 e 2 iguais aos encontrados no passo 2 e os demais grupos iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva; senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 15, gráfico com a nova geração encontrada:

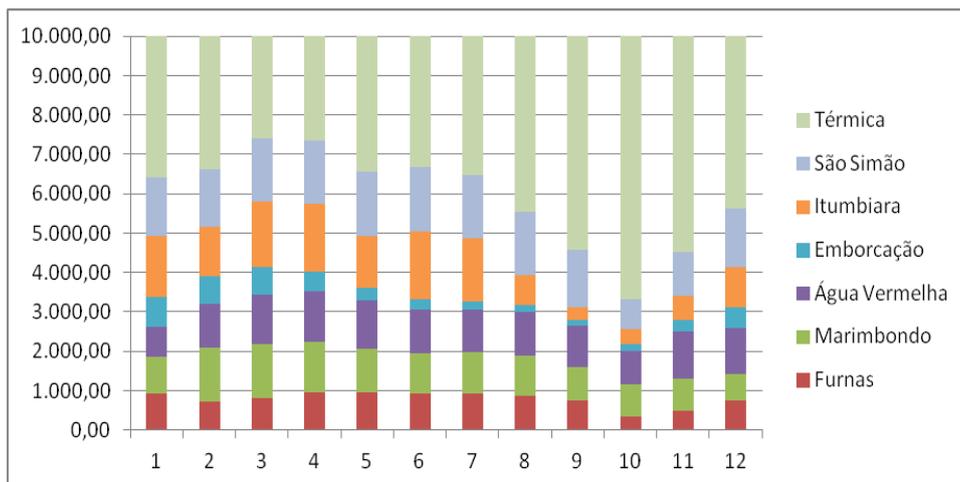


Figura 15 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 3

O uso de energia proveniente das usinas Hidrelétricas aumentou em 1,26% com relação ao passo anterior, acumulando um total de 4,84% de economia.

**Passo 4** – Otimização do Grupo 4 mantendo os demais valores constantes, sendo os valores dos Grupos 1 a 3 iguais aos encontrados no passo 3 e os demais grupos iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva; senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 16, gráfico com a nova geração encontrada:

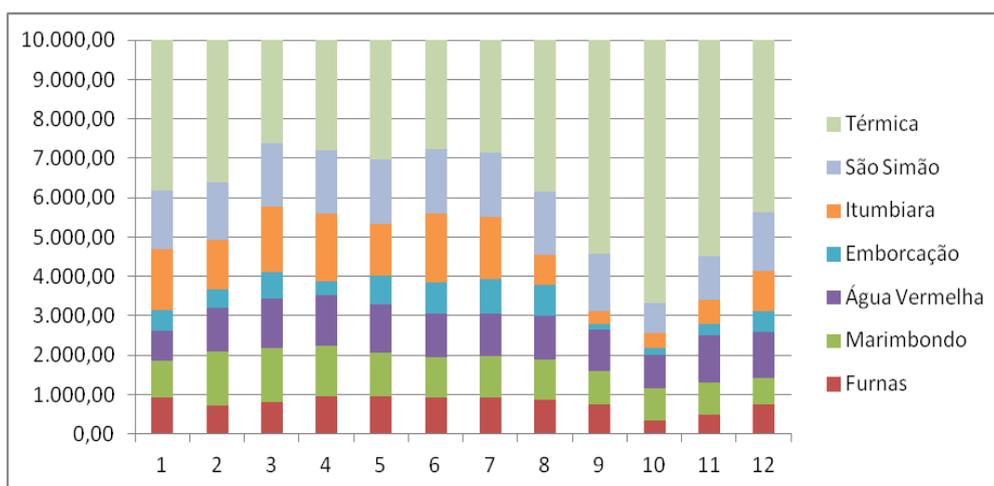


Figura 16 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 4

O uso de energia proveniente das usinas Hidrelétricas aumentou em 2,15% com relação ao passo anterior, acumulando um total 6,89% de melhoria.

**Passo 5** – Otimização do Grupo 5 mantendo os demais valores constantes, sendo os valores dos Grupos 1 a 4 iguais aos encontrados no passo 4 e os demais grupos iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva; senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 17, gráfico com a nova geração encontrada:

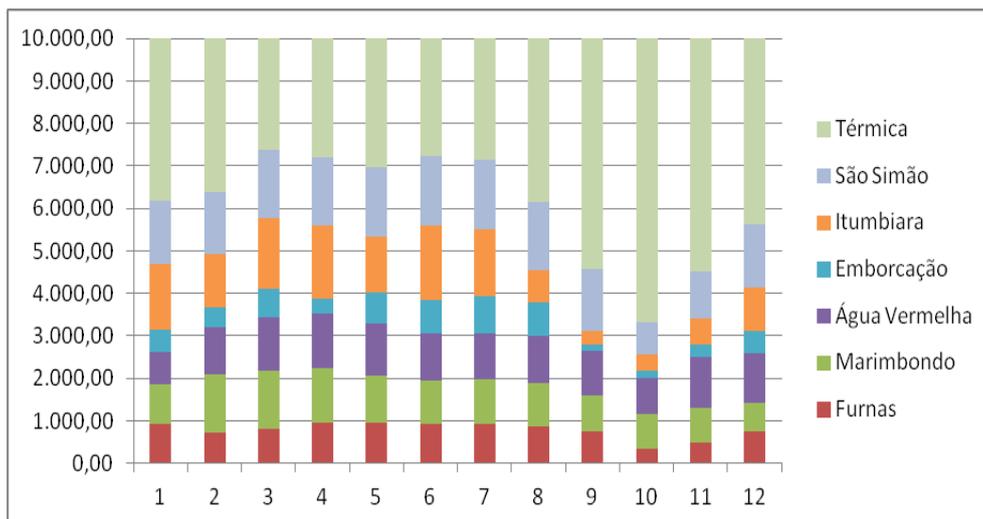


Figura 17 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 5

Não houve melhora nesse passo, o AG não encontrou nenhuma solução melhor que a original. A melhora acumulada continuou em 6,89%.

**Passo 6** – Otimização do Grupo 6 mantendo os demais valores constantes, iguais aos encontrados no passo 5. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original.

Apresenta-se na Figura 18, gráfico com a nova geração encontrada:

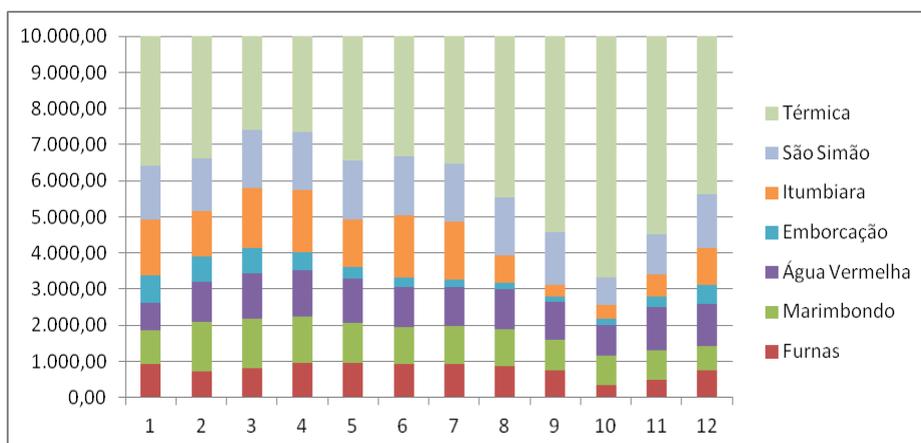


Figura 18 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Geográfico) – Passo 6

O uso de energia proveniente das usinas Hidrelétricas aumentou em 0,21% com relação ao passo anterior, acumulando um total de 7,09% de economia.

Pode-se observar com os resultados acima e com esse processo gerou uma melhoria de 7,09% no resultado obtido, resultando em uma diminuição de mais de 5.000 MW de energia térmica.

Para representar a coadaptação coevolutiva no Sistema Teste estudado nesse trabalho, os passos acima foram repetidos quatro vezes, alterando a solução base encontrada pela solução encontrada no final do passo 6.

### b) Considerando as Cascatas dos Rios

Nessa otimização os grupos de variáveis foram divididos de acordo com sua cascata de origem, segundo a relação abaixo:

- Grupo 1 – Cascata do Rio Grande contendo as usinas de Furnas, Marimbondo e São Simão com as variáveis de 1 a 36;
- Grupo 2 – Cascata do Rio Paranaíba contendo as usinas de Emborcação, Itumbiara São Simão com as variáveis de 37 a 72.

Após essa divisão simulou-se a otimização por grupo, conforme detalhado a seguir.

**Passo 1** – Otimização do Grupo 1 mantendo os demais valores constantes e iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 19, gráfico com a nova geração encontrada:

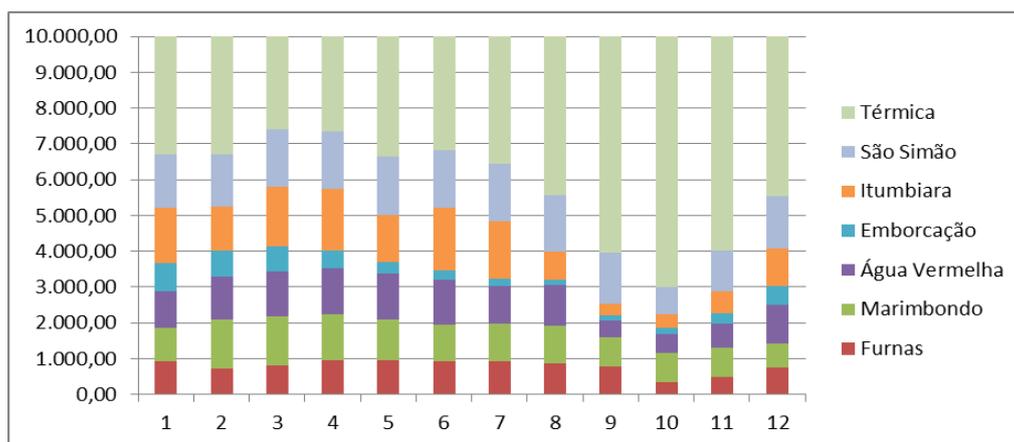


Figura 19 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Cascata) – Passo 1

O uso de energia proveniente das usinas Hidrelétricas aumentou em 3,63% em relação ao sistema-teste original.

**Passo 2** – Otimização do Grupo 2 mantendo os demais valores constantes e iguais aos encontrados no passo 1. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 20, gráfico com a nova geração encontrada:

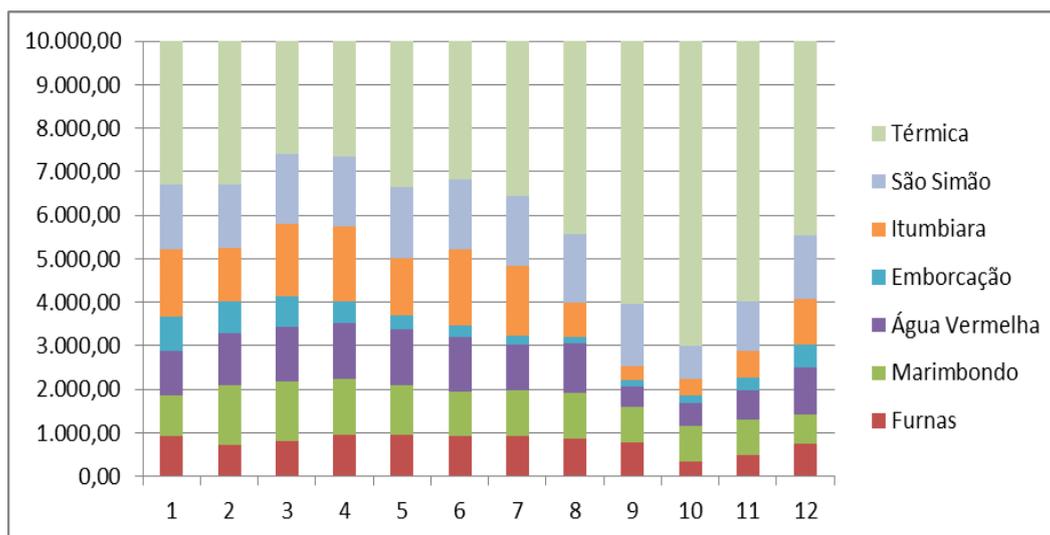


Figura 20 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Cascata) – Passo 2

Não houve melhora nesse passo, o AG não encontrou nenhuma solução melhor que a original. A melhora acumulada continuou em 3,63%.

Pode-se observar com os resultados acima e com esse processo gerou-se uma melhoria de 3,63% no resultado obtido, resultando em uma diminuição de mais de 2.500 MW de energia térmica.

Para representar a coadaptação coevolutiva no Sistema Teste estudado nesse trabalho, os passos acima foram repetidos quatro vezes, alterando a solução base encontrada pela solução encontrada no final do passo 6.

**c) Considerando a relação Temporal**

Nessa otimização os grupos de variáveis foram divididos de maneira que em cada subgrupo ficassem quatro meses consecutivos das usinas de uma mesma cascata.

- Grupo 1 – Meses de janeiro a abril das usinas da Cascata do Rio Grande contendo as variáveis de 1 a 4, 13 a 16 e 25 a 28;
- Grupo 2 – Meses de maio a agosto das usinas da Cascata do Rio Grande contendo as variáveis de 37 a 40, 49 a 52 e 61 a 64;
- Grupo 3 – Meses de setembro a dezembro das usinas da Cascata do Rio Grande contendo as variáveis de 5 a 8, 17 a 20 e 29 a 32;
- Grupo 4 – Meses de janeiro a abril das usinas da Cascata do Rio Paranaíba contendo as variáveis de 41 a 44, 53 a 56 e 65 a 68;
- Grupo 5 – Meses de maio a agosto das usinas da Cascata do Rio Paranaíba contendo as variáveis de 9 a 12, 21 a 24 e 33 a 36;
- Grupo 6 – Meses de setembro a dezembro das usinas da Cascata do Rio contendo as variáveis de 45 a 48, 57 a 60 e 69 a 72.

Após essa divisão simulou-se a otimização por grupo, de acordo com os seguintes passos abaixo. Antes de apresentar os passos, cabe ressaltar que nesse tipo de grupamento foram realizados vinte simulações, mas em nenhuma delas foi possível encontrar um resultado melhor que o resultado original, por isso não foi apresentado nenhum gráfico de geração para o grupamento considerando a relação temporal.

**Passos 1 a 6** – Otimização do Grupo mantendo os demais valores constantes, iguais aos encontrados na simulação base no caso do passo 1 ou iguais aos encontrados na simulação anterior no caso dos demais passos. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original.

#### **d) Grupamento Delta**

Nessa otimização foi considerada a fórmula do Grupamento Delta. Os grupos foram divididos através de uma linearização dos valores obtidos para delta, na qual esses valores linearizados foram categorizados de acordo com a regra abaixo:

- Grupo 1 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0 e 0,1;

- Grupo 2 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,1 e 0,2;
- Grupo 3 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,2 e 0,3;
- Grupo 4 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,3 e 0,4;
- Grupo 5 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,4 e 0,5;
- Grupo 6 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,5 e 0,6;
- Grupo 7 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,6 e 0,7;
- Grupo 8 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,7 e 0,8;
- Grupo 9 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,8 e 0,9;
- Grupo 10 – Foram cadastrados nesse grupo os valores linearizados de Delta entre 0,9 e 1.

Considerando-se a regra acima, nem todos os grupos obtiveram variáveis. Apresenta-se a Tabela 3 com a formação dos grupos:

Tabela 3 - Divisão de Grupos segundo Delta – Sistema Resumido

<b>GRUPO 1</b>					
São Simão 1º mês	São Simão 2º mês	São Simão 3º mês	São Simão 4º mês	São Simão 5º mês	São Simão 6º mês
<b>GRUPO 1</b>					
São Simão 7º mês	São Simão 8º mês	São Simão 9º mês	São Simão 10º mês	São Simão 11º mês	São Simão 12º mês
<b>GRUPO 2</b>					
Itumbiara 1º mês	Itumbiara 2º mês	Itumbiara 3º mês	Itumbiara 4º mês	Itumbiara 5º mês	Itumbiara 6º mês
<b>GRUPO 2</b>					
Itumbiara 7º mês	Itumbiara 8º mês	Itumbiara 9º mês	Itumbiara 10º mês	Itumbiara 11º mês	Itumbiara 12º mês
<b>GRUPO 6</b>					
Furnas 2º mês	Furnas 5º mês	Furnas 6º mês	Furnas 8º mês	Furnas 9º mês	Furnas 10º mês

<b>GRUPO 6</b>					
Marimbondo 1º mês	Marimbondo 2º mês	Marimbondo 3º mês	Marimbondo 4º mês	Marimbondo 5º mês	Marimbondo 6º mês
<b>GRUPO 6</b>					
Marimbondo 12º mês	Água Vermelha 1º mês	Água Vermelha 2º mês	Água Vermelha 3º mês	Água Vermelha 4º mês	Água Vermelha 5º mês
<b>GRUPO 6</b>					
Água Vermelha 6º mês	Água Vermelha 7º mês	Água Vermelha 8º mês	Água Vermelha 9º mês	Água Vermelha 10º mês	Água Vermelha 11º mês
<b>GRUPO 6</b>					
Água Vermelha 12º mês					
<b>GRUPO 7</b>					
Furnas 1º mês	Furnas 3º mês	Furnas 4º mês	Furnas 7º mês	Furnas 11º mês	Furnas 12º mês
<b>GRUPO 7</b>					
Marimbondo 7º mês	Marimbondo 8º mês	Marimbondo 9º mês	Marimbondo 10º mês	Marimbondo 11º mês	
<b>GRUPO 9</b>					
Emborcação 3º mês			Emborcação 5º mês		
<b>GRUPO 10</b>					
Emborcação 1º mês	Emborcação 2º mês	Emborcação 4º mês	Emborcação 6º mês	Emborcação 7º mês	Emborcação 8º mês
<b>GRUPO 10</b>					
Emborcação 9º mês	Emborcação 10º mês	Emborcação 11º mês	Emborcação 12º mês		

**Passo 1** – Otimização do Grupo 1 mantendo os demais valores constantes e iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 21, gráfico com a nova geração encontrada:

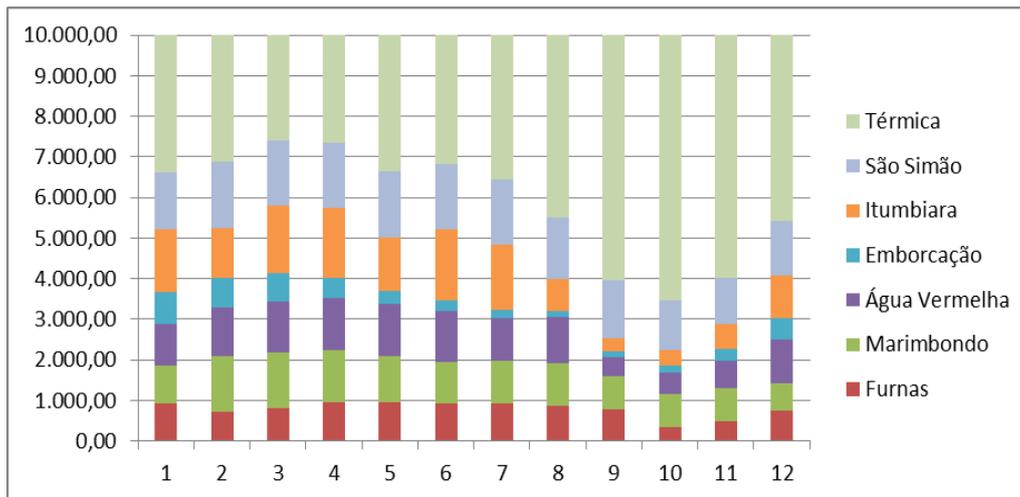


Figura 21 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 1

O uso de energia proveniente das usinas Hidrelétricas aumentou em 4,13% em relação ao sistema-teste original.

**Passo 2** – Otimização do Grupo 2 mantendo os demais valores constantes, sendo os valores do Grupo 1 igual aos encontrados no passo 1 e os demais grupos iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 22, gráfico com a nova geração encontrada:

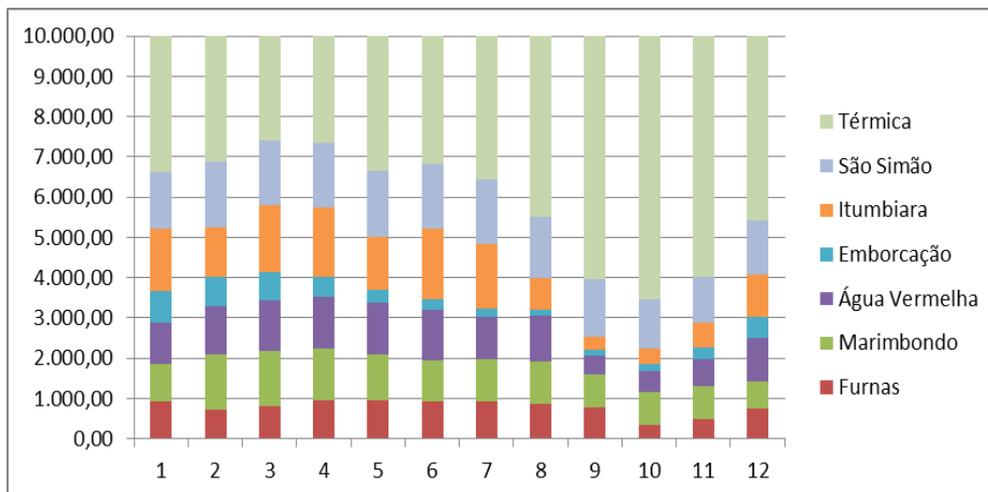


Figura 22 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 2

O uso de energia proveniente das usinas Hidrelétricas aumentou em 0,001% em relação ao sistema-teste original, acumulando um total de 4,13% de economia.

**Passo 3** – Otimização do Grupo 6 mantendo os demais valores constantes, sendo os valores dos Grupos 1 e 2 iguais aos encontrados no passo 2 e os demais grupos iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 23, gráfico com a nova geração encontrada:

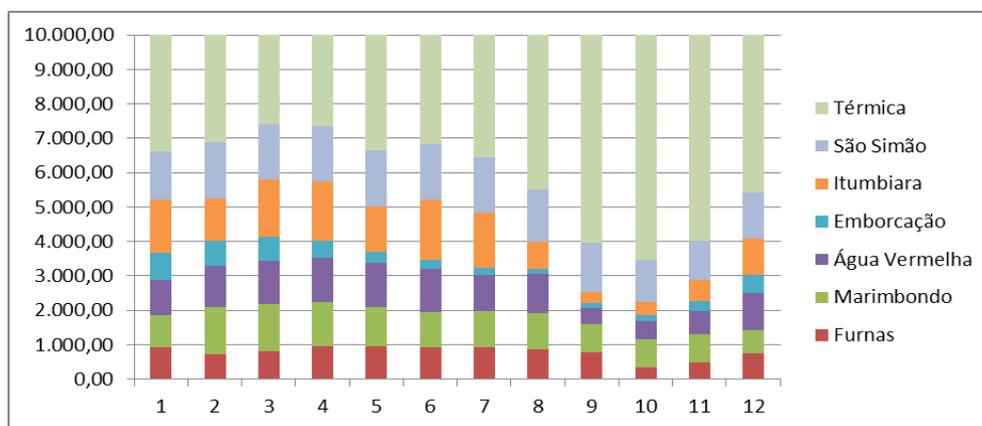


Figura 23 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 3

Não houve melhora nesse passo, mantendo a melhora acumulada de 4,13%.

**Passo 4** – Otimização do Grupo 7 mantendo os demais valores constantes, sendo os valores dos Grupos 1 a 3 iguais aos encontrados no passo 3 e os demais grupos iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 24, gráfico com a nova geração encontrada:

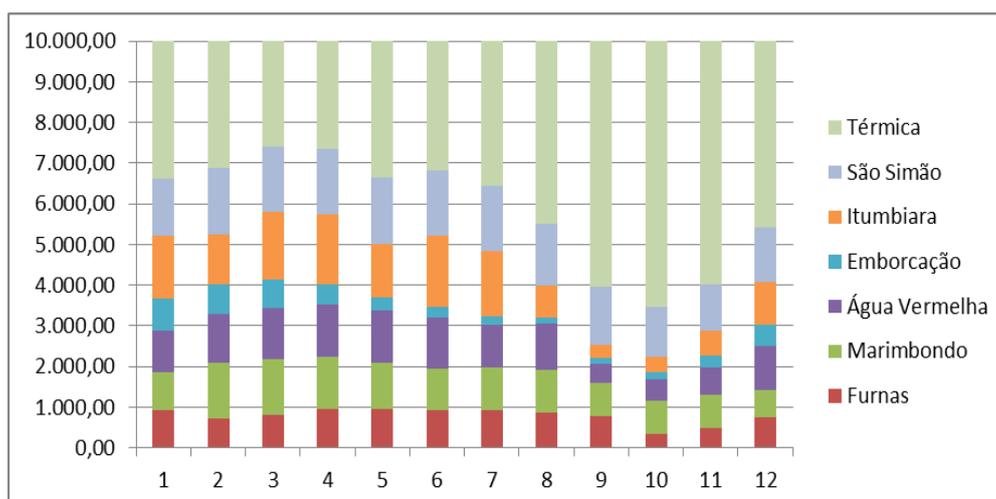


Figura 24 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 4

Não houve melhora nesse passo, mantendo a melhora acumulada de 4,13%.

**Passo 5** – Otimização do Grupo 9 mantendo os demais valores constantes, sendo os valores dos Grupos 1 a 4 iguais aos encontrados no passo 4 e os demais grupos iguais aos encontrados na simulação base. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 25, gráfico com a nova geração encontrada. Não houve melhora nesse passo, mantendo a melhora acumulada de 4,13%.

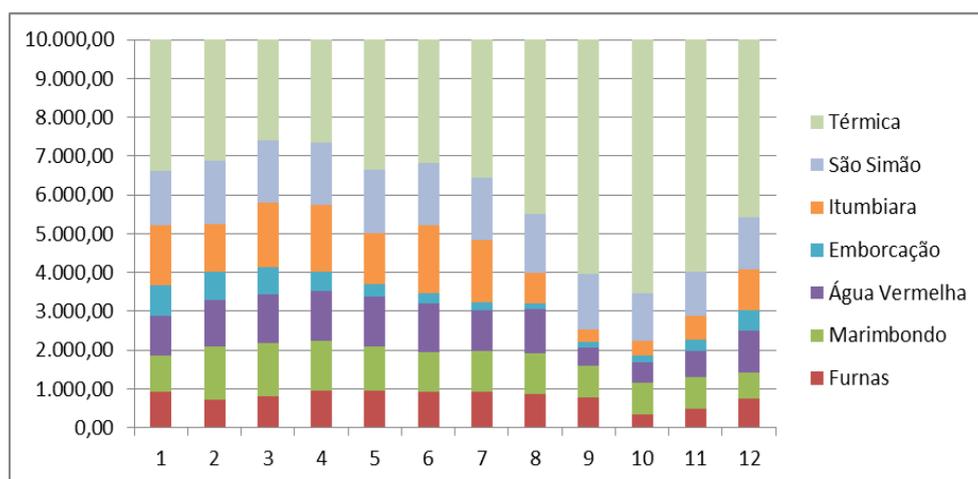


Figura 25 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 5

**Passo 6** – Otimização do Grupo 10 mantendo os demais valores constantes, iguais aos encontrados nos passos anteriores. Caso o resultado da simulação seja melhor que a encontrada na simulação base a mesma é salva senão o resultado se mantém igual ao original. Apresenta-se na Figura 26, gráfico com a nova geração encontrada. Não houve melhora nesse passo, mantendo a melhora acumulada de 4,13%.

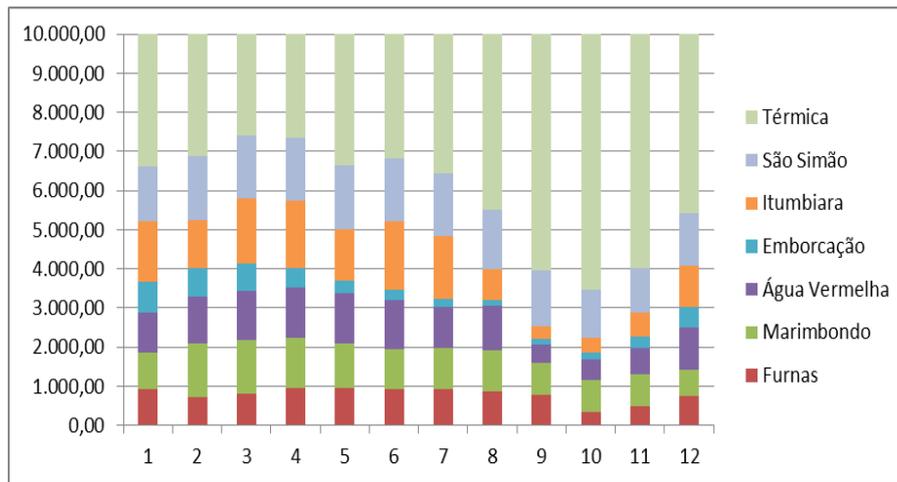


Figura 26 – Geração por Usina – Ex. Sistema-Teste resumido (Delta) – Passo 6

Pode-se observar com os resultados acima e com esse processo gerou uma melhoria de 4,13% no resultado obtido, resultando em uma diminuição de mais de 2.900 MW de energia térmica.

Para representar a coadaptação coevolutiva no Sistema Teste estudado nesse trabalho, os passos acima foram repetidos quatro vezes, alterando a solução base encontrada pela solução encontrada no final do passo 6.

#### e) Comparação entre os resultados

Considerando os dados obtidos acima, observa-se no Sistema Teste estudado que a melhor forma de otimizar esse sistema foi considerando a geografia do problema. Nessa forma de solução, a melhoria chegou a mais de 7% com uma redução de mais de 5.000 MW de geração termelétrica.

Por outro lado, a otimização por relação temporal não apresentou bom resultado, não encontrando nenhuma redução no sistema. Esse resultado demonstra que a interação temporal não representa de maneira eficiente o Sistema Teste estudado.

O Grupamento Delta demonstrou alguma coerência nos resultados, mas esses poderiam ser melhorados, com um maior número de iterações. Essa coerência ocorre porque os grupos ficaram divididos de acordo com as usinas e refletem a componente geográfica do problema.

O resultado com a otimização por cascata teve um bom resultado. Esse resultado ocorre porque a otimização em cascata é uma simplificação da relação Geográfica do Sistema Teste.

Resumidamente, os valores obtidos encontram-se abaixo:

- ✓ Grupo 1 (Relação Geográfica) – 7,09% de redução no consumo de Geração Hidrelétrica com valor de 5.000 MW.
- ✓ Grupo 2 (Cascatas dos Rios) – 3,63% de redução no consumo de Geração Hidrelétrica com valor de 2.500 MW.
- ✓ Grupo 3 (Relação Temporal) – Não houve melhoria nos resultados, ou seja, o AG não encontrou solução melhor que a solução base estudada.
- ✓ Grupo 4 (Equação Delta) - 4,13% de redução no consumo de Geração Hidrelétrica com valor de 2.900 MW.

### **3.5. Comentários e conclusões**

Esse capítulo teve como contribuição para o trabalho a introdução das principais linhas de pesquisa de otimização acopladas a AG presentes na literatura.

Além disso, o capítulo apresentou as formas de decomposição que serão utilizadas no próximo capítulo.

Outro acréscimo relevante do capítulo foi a exemplificação da técnica de Coordenação Hidrotérmica. Com isso, espera-se definir a estrutura do programa a ser desenvolvido para o Sistema Teste a ser estudado. Como conclusões principais do capítulo têm-se:

1. A definição da Técnica a ser utilizado na dissertação;
2. A análise da importância na etapa de decomposição do problema, já que esta etapa define a convergência do mesmo;
3. A definição de quais serão as formas de decomposição do problema;
4. No contexto do exemplo apresentado, observa-se o melhor resultado foi considerando a geometria do problema.

# **CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E RESULTADOS**

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações.

## **4.1. Considerações Iniciais**

Para as simulações foi empregado o MATLAB como ambiente de simulação e programação. O Sistema Teste utilizado foi retirado de [7], por ser um sistema já estudado e com alto grau de complexidade, contendo 14 usinas em diversas cascatas. Os parâmetros utilizados no Algoritmo Genético (AG) estão definidos nos itens a seguir e foram definidos baseados nos melhores resultados obtidos nas simulações preliminares do sistema. Essas simulações preliminares foram simulações com diversas combinações de operadores cruzamento e seleção, além de variações nos critérios de parada. No caso da modelagem das usinas, as variáveis de controle utilizadas foram as vazões defluentes das usinas hidrelétricas do sistema.

Como base de dados tanto para vazões incremental e/ou natural quanto para os polinômios das cotas montantes e jusantes das usinas, foram utilizados os valores divulgados por [1]. Para representar a perda devido ao vertimento de água foram acrescentadas penalidades quadráticas na função custo.

### **4.1.1. Solução Base**

Considerando o objetivo de analisar as diversas formas de otimização e tendo as premissas necessárias estabelecidas no item acima, desenvolveu-se um programa capaz de otimizar (através de AG) o problema de Coordenação Hidrotérmica estudado, de acordo com a metodologia explicitada nos Capítulos 2 e 3.

Essa primeira etapa de otimizações foi realizada sem a definição de subgrupos, e teve como objetivo a validação das metodologias e a definição da Solução Base, sendo essa utilizada nas demais etapas do trabalho.

### 4.1.2. Solução Otimizada

Após a definição da Solução Base, desenvolveu-se um programa capaz de otimizar a solução encontrada através do subgrupo escolhido. As soluções encontradas foram estudadas de acordo com: (i) a melhora em relação à solução inicial, (ii) a coerência dos dados obtidos e (iii) o desvio padrão das amostras.

As soluções encontradas estão apresentadas nas seções a seguir, junto com às análises explicitadas acima.

Quanto à divisão dos grupos, foi utilizada a metodologia apresentada no Capítulo 4.

- **Geográfico:** 14 grupos com doze variáveis cada;
- **Cascata:** 4 grupos sendo 2 com vinte quatro variáveis, 1 com trinta e seis variáveis e 1 com oitenta e quatro variáveis, respectivamente. Considerou-se as cascatas de acordo com os Rios Tocantins, Paraná, Paranapanema e Iguaçu;
- **Tempo:** 12 grupos sendo 6 grupos com oito variáveis, 3 grupos com doze variáveis e 3 grupos com vinte e oito variáveis;
- **Delta:** Número de grupos variáveis, limitados em 10. As variáveis foram organizadas através de linearização dos resultados obtidos na equação Delta.

## 4.2. Dados do Sistema-Teste

Para o estudo, como explicado no Capítulo 1, foi considerado o Sistema-Teste baseado na referência [7]. Esse sistema apresenta 14 usinas em cascatas paralelas. O diagrama esquemático das UHE está apresentado na Figura 27 [7]:

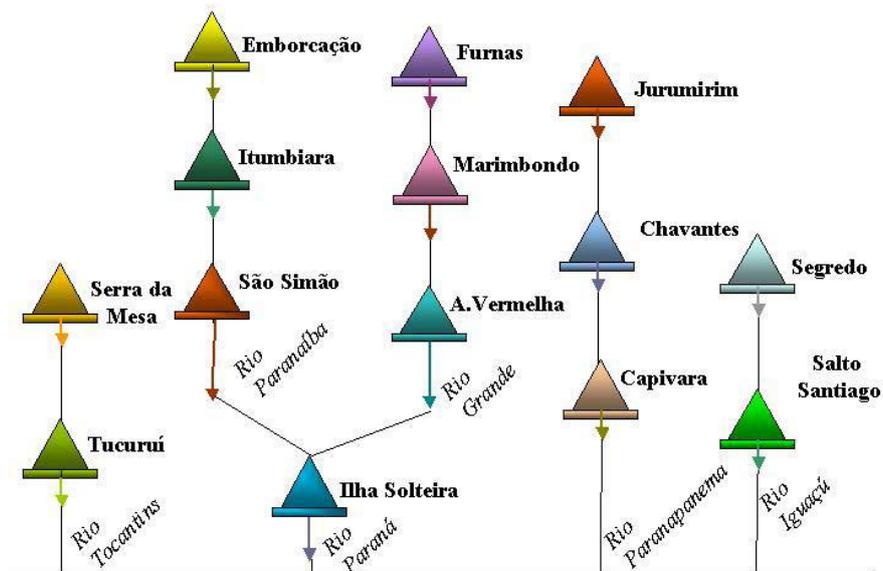


Figura 27 – Sistema-Teste

As características das usinas encontram-se na Tabela 4. Os demais dados das usinas hidrelétricas estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 4 - Características das usinas Hidráulicas

Usina	Pot. Instalada (MW)	Volume útil (hm <sup>3</sup> )
Serra da Mesa	1.200	43.250
Tucuruí	4.000	32.013
Segredo	1.260	388
Salto Santiago	1.332	4.113
Jurumirim	97,76	3.165
Chavantes	414	3.041
Capivara	608	5.725
Emborcação	1.192	13.056
Itumbiara	2.280	12.454
São Simão	1.710	5.540
Furnas	1.312	17.217
Marimbondo	1.488	5.260
Água Vermelha	1.398	5.169
Ilha Solteira	3.444	5.516

Já as usinas térmicas utilizadas foram as mesmas utilizadas em [9] e estão apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5 - Características das usinas Térmicas

N	Usina	Pot. Instalada (MW)	CVU (R\$/MWh)
1	Termopernambuco	638	60,00
2	Fortaleza	347	66,74
3	Fafen	151	71,29
4	Termoceará	220	82,72
5	Termbahia	186	87,12
6	Camaçari	347	130,50
-	Total	1.889	N/A
	Déficit	Infinita	855,31

Considerando como metodologia para despacho das usinas térmicas a Ordem de Mérito, os valores de custo horário para a geração termelétrica de acordo com o valor de MW utilizado no mês encontram-se na Tabela 6:

Tabela 6 – Despacho das usinas termelétricas

Faixa	Usinas Despachadas	Custo Horário(R\$/h)
$0 \leq G_t \leq 638$ MW	(1)	$60 \cdot G_t$
$638 < G_t \leq 985$ MW	(1) e (2)	$66,74G_t - 4300,12$
$985 < G_t \leq 1136$ MW	(1), (2) e (3)	$71,29G_t - 8781,87$
$1136 < G_t \leq 1356$ MW	(1), (2), (3) e (4)	$82,72G_t - 21766,35$
$1356 < G_t \leq 1542$ MW	(1), (2), (3), (4) e (5)	$87,12G_t - 27732,75$
$1542 < G_t \leq 1889$ MW	(1), (2), (3), (4), (5) e (6)	$130,50G_t - 94624,71$
$G_t > 1889$ MW	Todas com corte de carga	$855,31G_t - 1069398,39$

As cargas utilizadas nas simulações estão especificadas na Tabela 7. Essa carga foi calculada mantendo a relação de geração por carga apresentada no SIN:

Tabela 7 – Carga por mês

Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho
19.280	20.238	20.307	19.343	19.172	18.909
Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
19.085	19.195	19.661	19.517	19.860	20.022

Para as simulações foram utilizadas as seguintes configurações para o Algoritmo Genético, essas configurações foram as que em inúmeros testes de configuração apresentaram os melhores resultados:

- Para os estudos do Algoritmo Genético padrão (sem divisão de grupos):
  - Seleção: Torneio;
  - Cruzamento: Intermediário;
  - Critério de Parada: 2.500 gerações ou 50 gerações sem melhora;
  - População: 400 indivíduos.
  - Elite: 1 indivíduo;
  - Range Inicial: 300 a 5.000;
  - Mutação: Gaussiana.
  
- Para os estudos do Algoritmo Genético dos subgrupos:
  - Seleção: Roleta;
  - Cruzamento: Uniforme;
  - Critério de Parada: 2.000 gerações ou 50 gerações sem melhora;
  - População: 100 indivíduos. Com exceção dos grupos com mais de 50 variáveis, onde o número de indivíduos foi igual ao dobro das variáveis.
  - Elite: 1 indivíduo;
  - Range Inicial: 300 a 5.000;
  - Mutação: Gaussiana.

### 4.3. Resultados

Primeiramente o Sistema-Teste foi otimizado como um todo, sem a utilização de nenhuma divisão de subgrupos. Na Tabela 8 estão apresentados os custos de operação encontrados nas simulações realizadas em R\$, o número de simulações foi aleatório.

Tabela 8 – Simulações Iniciais do Sistema Teste

N	Resultados (R\$)
1	1,602E+10
2	1,568E+10
3	1,566E+10
4	1,586E+10
5	1,581E+10
<b>Média</b>	1,581E+10
<b>Desvio Padrão</b>	1,466E+08
<b>Mínimo</b>	<b>1,566E+10</b>

A partir dessas simulações foi escolhido o menor valor (em R\$) encontrado, **1,566 E+10**, como solução inicial para a utilização das técnicas de otimização a serem estudadas. Essa escolha deve-se ao fato dessa simulação representar o menor custo de operação, o que significa uma maior utilização da Geração Hidrelétrica.

A média e o desvio padrão apresentados acima foram calculados a partir das cinco simulações especificadas.

Os resultados das simulações por subgrupo realizadas de acordo com as premissas especificadas estão apresentados na Tabela 9. Esses resultados representam o custo de operação encontrado nas simulações, o número de simulações foi aleatório.

Tabela 9 – Simulações do Sistema Teste por Subgrupo

<b>N</b>	<b>Geográfico</b> R\$	<b>Cascata</b> R\$	<b>Tempo</b> R\$	<b>Delta (1)</b> R\$	<b>Delta (2)</b> R\$
<b>1</b>	1,412E+10	1,469E+10	1,474E+10	1,566E+10	1,566E+10
<b>2</b>	1,408E+10	1,472E+10	1,471E+10	1,566E+10	1,566E+10
<b>3</b>	1,412E+10	1,502E+10	1,478E+10	1,560E+10	1,561E+10
<b>4</b>	1,435E+10	1,486E+10	1,478E+10	1,563E+10	1,560E+10
<b>5</b>	1,415E+10	1,475E+10	1,472E+10	1,566E+10	1,566E+10
<b>6</b>	1,422E+10	1,493E+10	1,477E+10	1,560E+10	1,561E+10
<b>7</b>	1,420E+10	1,479E+10	1,477E+10	1,557E+10	1,566E+10
<b>8</b>	1,417E+10	1,513E+10	1,484E+10	1,558E+10	1,560E+10
<b>9</b>	1,409E+10	1,495E+10	1,477E+10	1,566E+10	1,566E+10
<b>10</b>	1,412E+10	1,482E+10	1,478E+10	1,560E+10	1,566E+10
<b>11</b>	1,415E+10	1,476E+10	1,481E+10	1,557E+10	1,566E+10
<b>12</b>	1,422E+10	1,478E+10	1,479E+10	1,558E+10	1,561E+10
<b>13</b>	1,420E+10	1,502E+10	1,479E+10	1,566E+10	1,566E+10
<b>14</b>	1,410E+10	1,487E+10	1,470E+10	1,566E+10	1,566E+10
<b>15</b>	1,433E+10	1,491E+10	1,472E+10	1,566E+10	1,560E+10
<b>Menor</b>	1,408E+10	1,469E+10	1,470E+10	1,557E+10	1,560E+10
<b>Média</b>	1,417E+10	1,487E+10	1,477E+10	1,562E+10	1,564E+10
<b>Desvio Padrão</b>	8,215E+07	1,254E+08	4,013E+07	3,812E+07	2,715E+07
<b>Melhoria</b>	11,2%	6,6%	6,5%	0,5%	0,4%

Analisando os resultados acima, pode-se observar que em todos os casos há uma melhora dos resultados, chegando no caso do estudo Geográfico a uma melhora de 11,2% do resultado. Observa-se que o pior resultado encontra-se no estudo do Delta com uma melhora de apenas de 0,4 (e 0,5)%.

Considerando o Desvio Padrão, observa-se que o melhor resultado encontra-se no Delta Grupo. Esse resultado deve-se a constância dos resultados obtidos em todas as simulações.

As tabelas de Delta estão diferenciadas por representar organizações diferentes de grupamento. Estes grupamentos foram definidos através dos seguintes passos:

- a) Calcular os valores de delta pela fórmula  $\delta_i = (\sum_{j=1} N_{pop} \cdot \delta_{i,j}) / N_{pop}$ ;
- b) Organizar de maneira crescente;
- c) Parametrizar os valores de 0 a 1;
- d) Dividir os valores parametrizados pelos 10 grupos, permitindo que haja grupos vazios.

No Delta 1 os limitadores foram proporcionais, ou seja, a reta de linearização foi dividida em partes iguais. Considerando essa divisão, os valores parametrizados de Delta ficaram categorizados apenas no grupo 1 (valores de 0 a 0,1), no grupo 2 (valores de 0,1 a 0,2) e no grupo 10 (valores de 0,9 a 1).

Já no Delta 2 pretendeu-se melhorar as divisões dos grupos e, para isso, os limitadores foram recalculados de forma que os valores menores que 0,1 fossem divididos em mais grupos. Para definição desses grupos foram realizados diversos estudos e optou-se pela seguinte divisão:

- Grupo 1 - Valores de 0 a 0,001;
- Grupo 2 - Valores de 0,001 a 0,01;
- Grupo 3 - Valores de 0,01 a 0,03;
- Grupo 4 - Valores de 0,03 a 0,05;
- Grupo 5 - Valores de 0,05 a 0,07;
- Grupo 6 - Valores de 0,07 a 0,09;
- Grupo 7 - Valores de 0,09 a 0,15;
- Grupo 8 - Valores de 0,15 a 0,30;
- Grupo 9 - Valores de 0,30 a 0,60;
- Grupo 10 - Valores de 0,6 a 1.

Nesse grupamento, a divisão em grupos teve uma pequena melhora, apresentando-se valores nos grupos 1, 2, 3, 5 e 10.

Analisando o resultado final do Grupamento Delta, observa-se que a organização foi positiva e seguiu uma ordem geográfica, com os dados de uma mesma usina tendendo a ficar no mesmo grupamento. Outra análise interessante é que os valores das simulações não variaram muito com a mudança dos parâmetros de delta e que em muitas análises não houve melhora nos valores encontrados.

Seguem Tabelas 10 e 11 com os valores de delta divididos pelos grupos, para a melhor solução encontrada, a numeração representa o número da variável no vetor delta:

Tabela 10 – Divisão do grupo para o Delta 1

Grupo 1	SERRA DA MESA												SEGREDO											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Grupo 1	SALTO SANTIAGO												JURUMIRIM											
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Grupo 1	CHAVANTES												CAPIVARA											
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Grupo 1	FURNAS												MARIMBONDO											
	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
Grupo 1	ÁGUA VERMELHA												EMBORCAÇÃO											
	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132
Grupo 1	ITUMBIARA												SÃO SIMÃO											
	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156
Grupo 2	ILHA SOLTEIRA																							
	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168												
Grupo 10	TUCURUÍ																							
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24												

Tabela 11 – Divisão do grupo para o Delta 2

Grupo 1	SEGREDO		JURUMIRIM																					
	28	34	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60										
Grupo 1	CHAVANTES												SÃO SIMÃO											
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156
Grupo 2	SERRA DA MESA												SEGREDO											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	25	26	27	29	30	31	32	33	35	36		
Grupo 2	SALTO SANTIAGO												CAPIVARA											
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Grupo 2	EMBORCAÇÃO																							
	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132												
Grupo 3	FURNAS												MARIMBONDO											
	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
Grupo 3	ÁGUA VERMELHA												ITUMBIARA											
	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
Grupo 5	ILHA SOLTEIRA																							
	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168												
Grupo 10	TUCURUÍ																							
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24												

Considerando os resultados obtidos utilizando a fórmula do grupamento Delta, realizaram-se mais simulações variando o número de iterações por subgrupo. Essas simulações foram realizadas com o objetivo de procurar melhores soluções utilizando a Equação Delta, mas não houve mudanças significativas nos valores obtidos (a melhora permaneceu na faixa de 0,4%). Na Tabela 12 apresenta-se os resultados (em R\$) obtidos para 2 iterações por subgrupo, com os subgrupos divididos em múltiplos de 0,1 (de acordo com o Delta 1), o número de simulações foi aleatório.

Tabela 12 – Simulações Delta 1 (2 iterações)

<b>N</b>	<b>Delta 1 (2 iterações)</b> <b>R\$</b>
<b>1</b>	1,566E+10
<b>2</b>	1,566E+10
<b>3</b>	1,563E+10
<b>4</b>	1,559E+10
<b>5</b>	1,566E+10
<b>6</b>	1,563E+10
<b>7</b>	1,566E+10
<b>8</b>	1,566E+10
<b>Menor</b>	1,559E+10
<b>Média</b>	1,564E+10
<b>Desvio Padrão</b>	2,560E+07
<b>Melhoria</b>	0,44%

Para cada melhor resultado por subgrupo encontrado nas simulações apresentadas na Tabela 9, foram desenvolvidos gráficos de geração por usina e armazenamento por usina. Todos esses gráficos estão apresentados no Apêndice B.

Como forma de ilustrar a melhor solução obtida apresentam-se nas Figuras 28 a 31, os gráficos para geração e armazenamento sem a utilização de subgrupo e com o melhor resultado obtido (aplicando subgrupo Geográfico).

Nesses gráficos de geração o eixo x representa os meses do ano (de janeiro a dezembro) e o eixo y a geração em MW. Já nos gráficos de armazenamento o eixo x representa os meses do ano (de janeiro a dezembro) e o eixo y a porcentagem do armazenamento útil que está sendo utilizada.

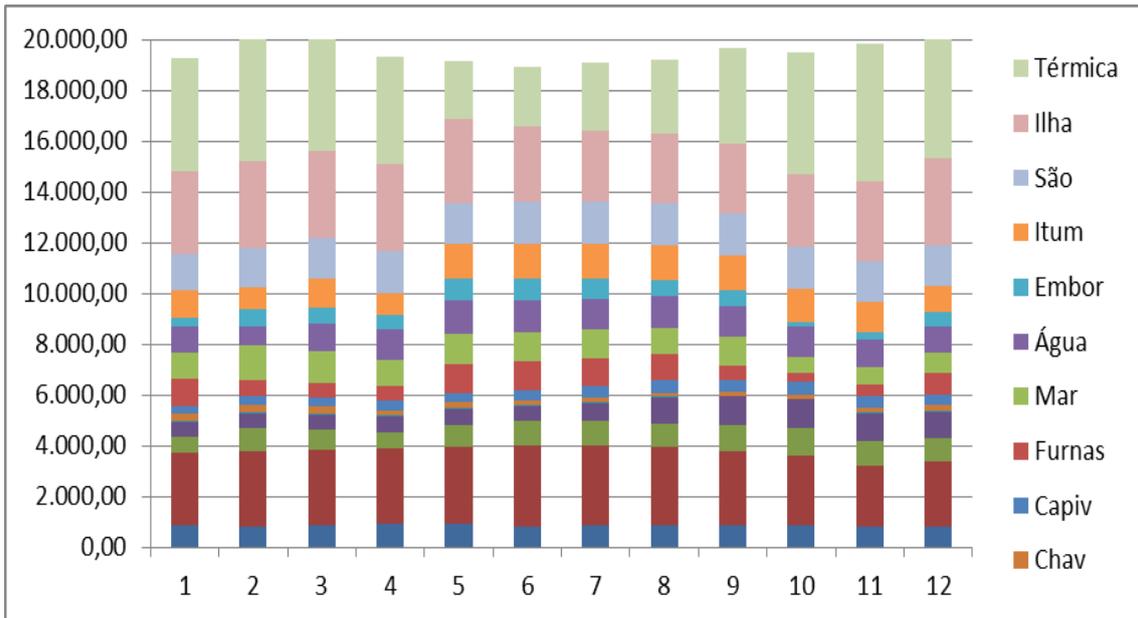


Figura 28 – Geração por usina sem a utilização de subgrupo

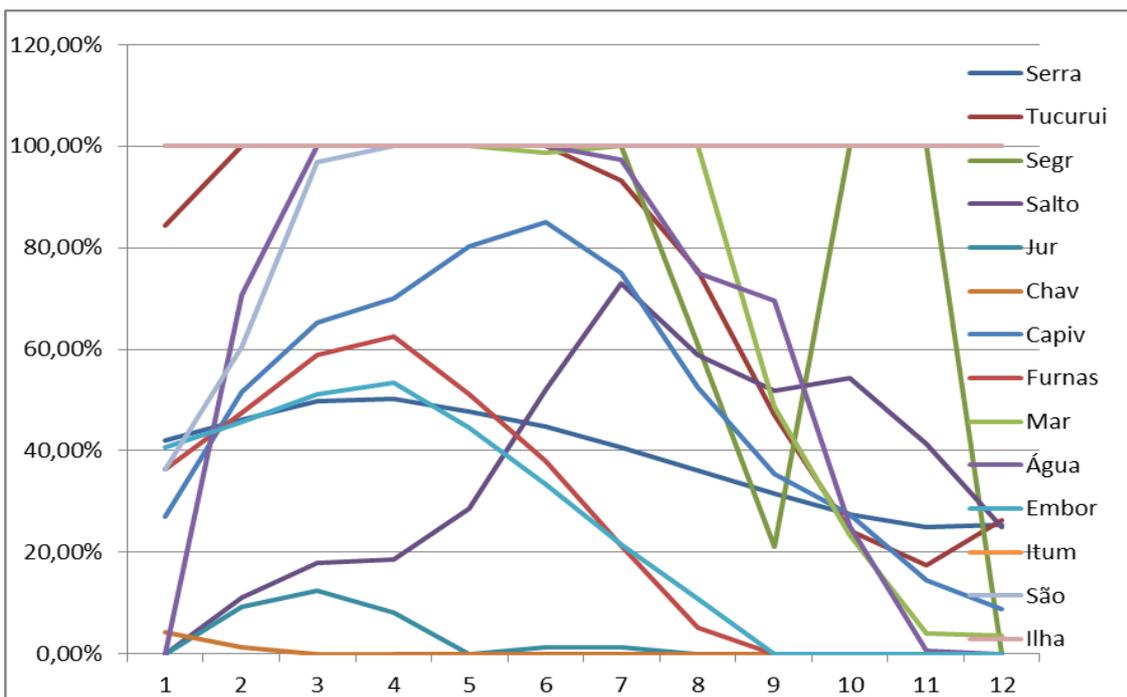


Figura 29 – Armazenamento por usina sem a utilização de subgrupo

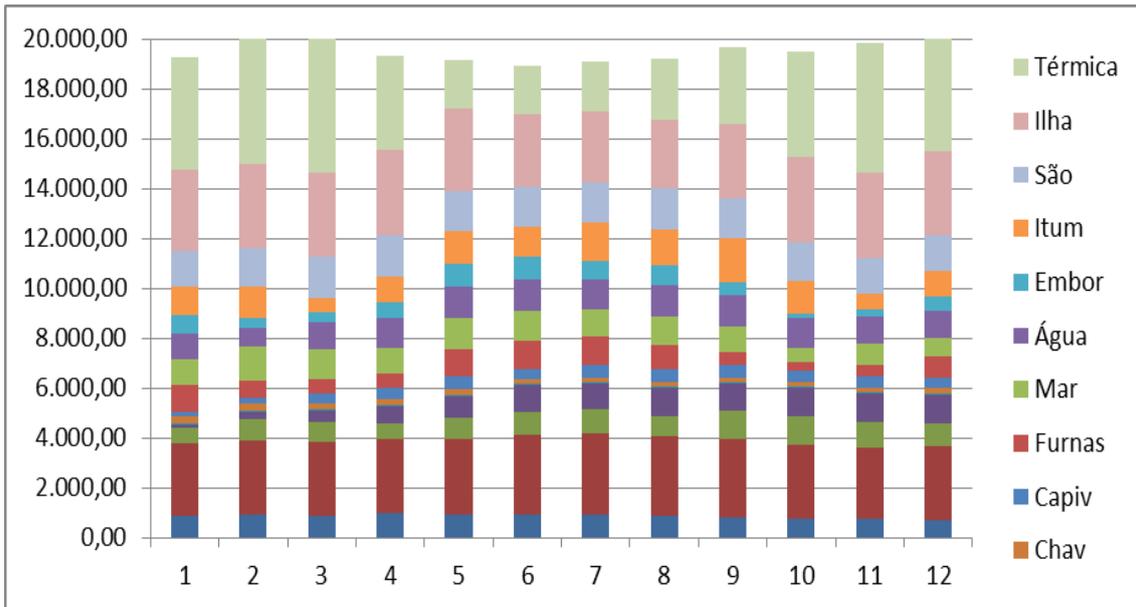


Figura 30 – Geração por usina – Subgrupo Geográfico

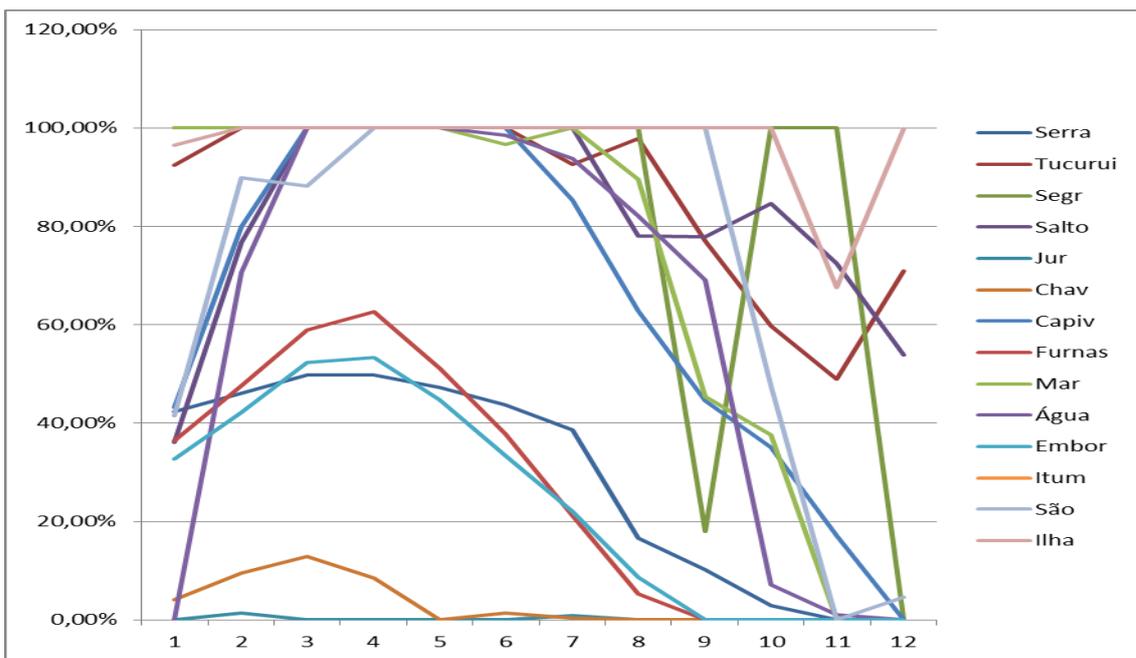


Figura 31 – Armazenamento por usina – Subgrupo Geográfico

Comparando as Figuras 28 e 30, observa-se que o consumo de geração térmica na Figura 30 é menor, principalmente nos meses intermediários (maio–5 a setembro-9). Essa redução deve-se à melhor otimização de recursos gerada. Quando se comparam as Figuras 29 e 31, observa-se essa mesma tendência expressa na redução mais rápida dos reservatórios.

#### 4.4. Comparações

Após as simulações e análises anteriores, observou-se que a melhor forma de otimizar os resultados é utilizando subgrupos divididos pela Geografia. Então, utilizar-se-á a melhor simulação com esse subgrupo para as análises comparativas com os valores de [7].

A primeira comparação relevante é quanto à diminuição do uso de termoelétrica. Em [7] foi utilizado ao longo dos 12 meses uma média de 14.000 MW de Geração Hidrelétrica, esse valor representa 64% da demanda de energia exigida nesse intervalo de tempo. Apresenta-se, na Figura 32 gráfico ilustrativo da geração em [7], onde a linha verde representa a demanda e as linhas vermelha e azul representam a geração hidrelétrica despachada em cada umas das técnicas utilizadas no trabalho.

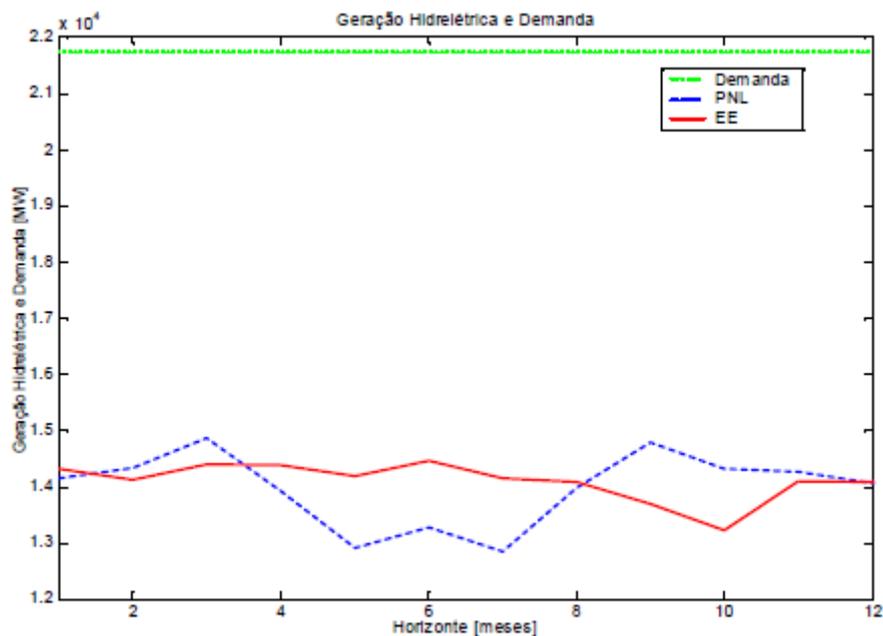


Figura 32 – Geração Hidrelétrica - segundo [4]

No estudo inicial realizado com AG, apresentado nesse trabalho, observa-se uma melhora na utilização dos recursos hidrelétricos. O valor de Geração Hidrelétrica passa a representar 80% da demanda da energia.

Analisando-se, agora, a solução ótima encontrada o valor de Geração Hidrelétrica passa a representar 81% do valor total. Apesar de a diferença ser de apenas 1% este valor em MW é de aproximadamente 2,8 mil.

Considerando o consumo hidrelétrico por mês, observa-se nas Figuras 33 e 34 abaixo o consumo de Geração Hidrelétrica na Solução Base e na Solução Ótima (melhor solução encontrada usando o Subgrupo Geográfico). Nesses gráficos o eixo x representa os meses do ano (de janeiro a dezembro) e no eixo y a geração em MW.



Figura 33 – Geração Hidrelétrica – Solução Base



Figura 34 – Geração Hidrelétrica – Solução Ótima

Outra comparação interessante é que nos primeiros meses a Solução Base é melhor que a Solução Ótima. Essa diferença ocorre porque na Solução Ótima a conservação do reservatório é realizada de forma mais coerente do que na Solução Base, como pode ser observado no gráfico da Figura 35:

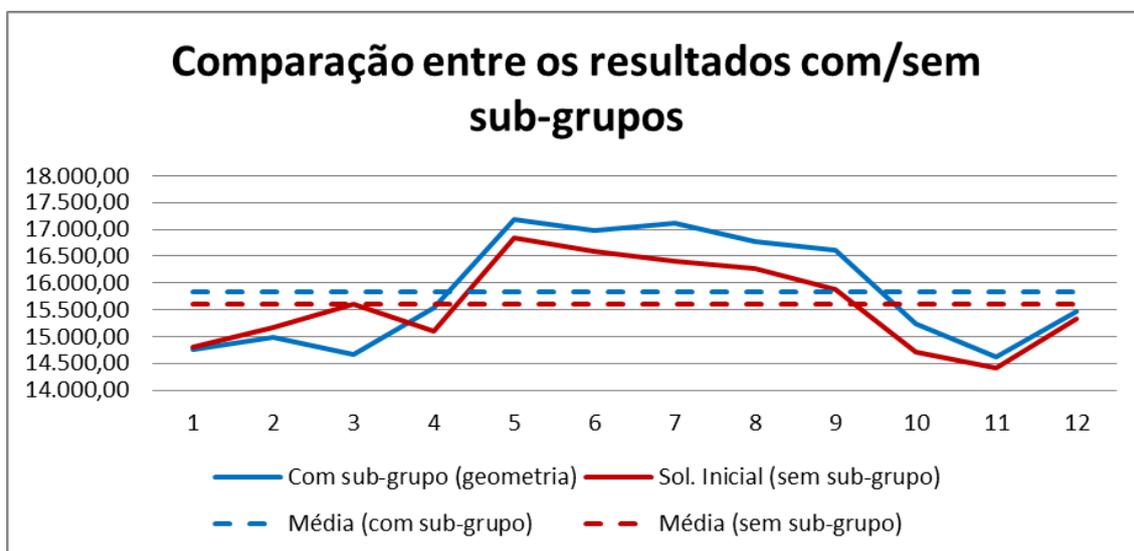


Figura 35 – Comparação entre as Gerações Hidrelétricas

Comparando-se, no âmbito dos 12 meses estudados, o consumo de energia termelétrica nas duas soluções, há uma redução de 5,8% na Solução Ótima. Outra comparação relevante ao estudo é a comparação no armazenamento das Usinas Hidrelétricas.

Observa-se que nas simulações estudadas o armazenamento dos reservatórios chega a valores muito baixos. Essa queda ocorre porque os estudos foram realizados para 12 meses, ou seja, não havia nenhuma necessidade de preservar o reservatório para os próximos anos.

Os gráficos com o Armazenamento por usina são apresentados no Apêndice C.

Para mitigar essa redução dos armazenamentos nos últimos meses, foram realizadas novas simulações considerando um intervalo de 24 meses de onde foram estudados os 12 primeiros meses. Com isso, o programa otimizará o primeiro ano considerando a necessidade de preservar água para o ano seguinte.

Para isso alterou-se toda a programação para um intervalo maior e após todos os passos acima, considerando o dobro de variável, retirou-se apenas as variáveis relativas ao primeiro ano (168 variáveis), para realizar as considerações acima.

Nesse caso a demanda do primeiro ano foi considerada igual a anterior, e no segundo ano foi considerado um pequeno incremento proporcional ao incremento apresentado no SIN.

- Para os estudos do Algoritmo Genético foram considerados as seguintes características:
  - Seleção: Roleta;
  - Cruzamento: Uniforme;
  - Critério de Parada: 2.000 gerações ou 50 gerações sem melhora;
  - População: 800 indivíduos. Com exceção dos grupos com mais de 50 variáveis, onde o número de indivíduos foi igual ao dobro das variáveis.
  - Elite: 1 indivíduo;
  - Range Inicial: 300 a 5.000;
  - Mutação: Gaussiana.

Encontram-se na Tabela 13, os valores dessas simulações, onde estão representados os custos em R\$ encontrados em cada iteração, o número de simulações foi aleatório.

Tabela 13 – Simulação para 24 meses

N	Delta 1 (24 meses) R\$
1	6,981E+17
2	6,980E+17
3	6,976E+17
4	6,980E+17
5	6,981E+17
<b>Menor</b>	6,976E+17
<b>Média</b>	6,980E+17
<b>Desvio Padrão</b>	2,178E+14

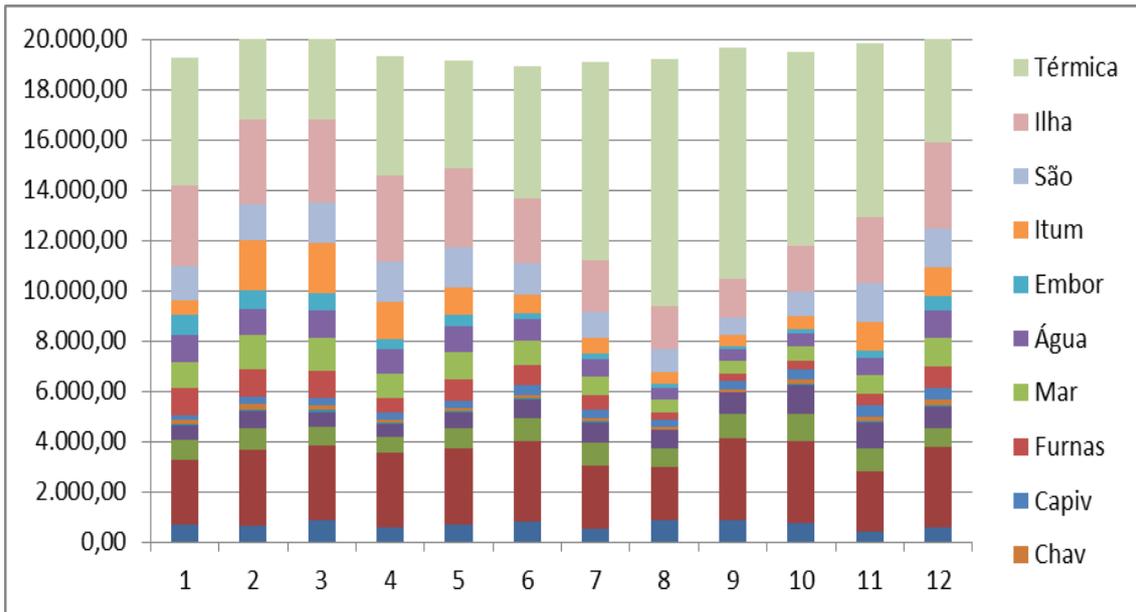


Figura 36 – Geração Hidrelétrica por Usina – Considerando 24 meses

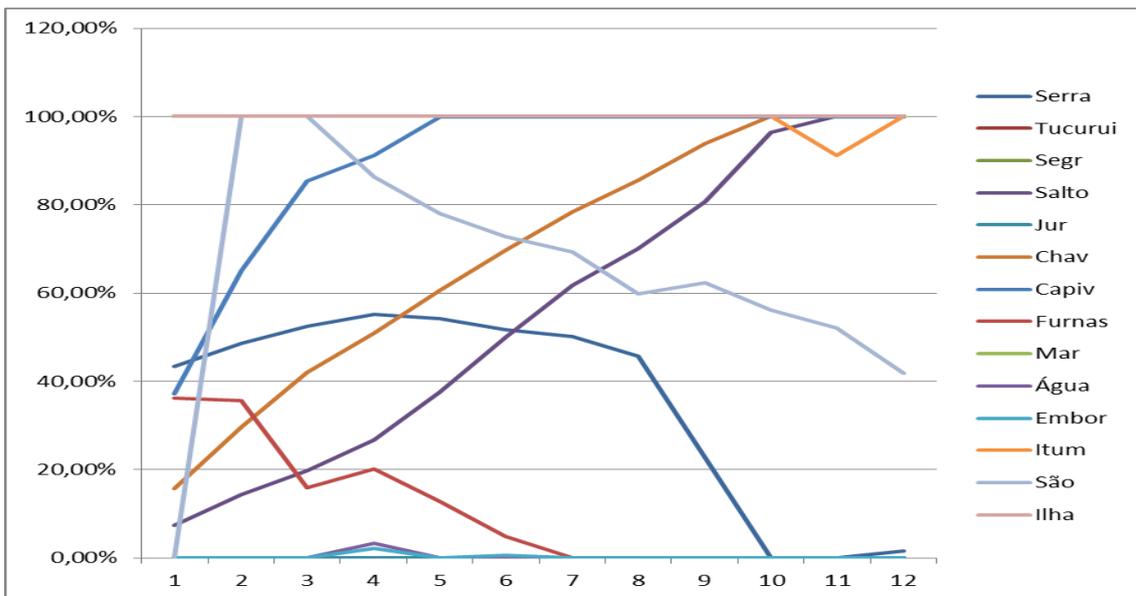


Figura 37 – Armazenamento das Usinas – Considerando 24 meses

Considerando-se as Figuras 36 e 37, observa-se uma redução no uso dos recursos hídricos, que nessas novas simulações, apresentam um valor médio de 13,5 MW, ou seja, 69% da demanda total do sistema.

Esse novo valor é próximo ao obtido na referência [7] e bem inferior ao obtido nos demais testes. Essa divergência entre os valores deve-se à necessidade de preservar os recursos hídricos para os demais meses.

Outra observação relevante é quanto à demanda considerada no estudo. Em [7], a demanda considerada foi um valor constante de 22.000 MW. Já no estudo considerou-se uma percentagem da demanda anual divulgada em [1]. Para se comparar as alterações na questão do valor, foram realizadas novas simulações (utilizando subgrupo Geográfico).

➤ Para os estudos do Algoritmo Genético foram considerados as seguintes características:

- Seleção: Roleta;
- Cruzamento: Uniforme;
- Critério de Parada: 2.000 gerações ou 50 gerações sem melhora;
- População: 800 indivíduos. Com exceção dos grupos com mais de 50 variáveis, onde o número de indivíduos foi igual ao dobro das variáveis.
- Elite: 1 indivíduo;
- Range Inicial: 300 a 5.000;
- Mutação: Gaussiana.

Os valores dessas simulações encontram-se na Tabela 12, onde estão representados os custos em R\$ encontrados em cada iteração, o número de simulações foi aleatório.

Tabela 14 – Simulação para demanda constante

N	Geográfico R\$
<b>1</b>	3,127E+10
<b>2</b>	3,130E+10
<b>3</b>	3,130E+10
<b>4</b>	3,144E+10
<b>5</b>	3,140E+10
<b>Menor</b>	3,127E+10
<b>Média</b>	3,134E+10
<b>Desvio Padrão</b>	7,362E+07

Os valores de geração para a melhor simulação encontram-se no Gráfico 38:

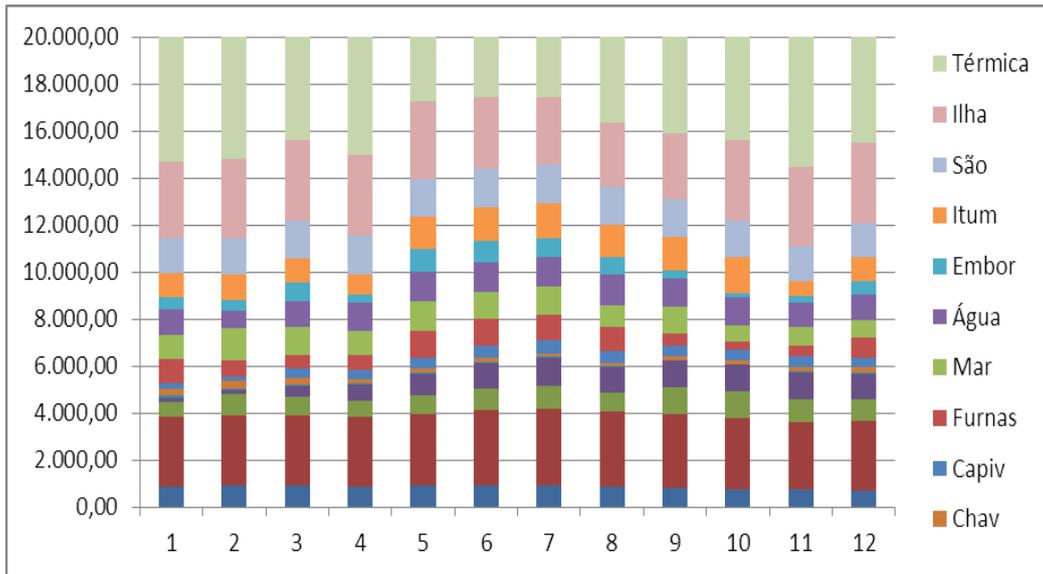


Figura 38 – Geração Hidrelétrica por Usina – Demanda constante

Como pode ser observado na Figura 39, essa alteração não afeta as análises anteriores, pois os valores considerados na comparação foram os valores de Geração Hidrelétrica e esses valores mostraram-se independentes da demanda, ou seja, o que variou foi o complemento térmico não a otimização em si.

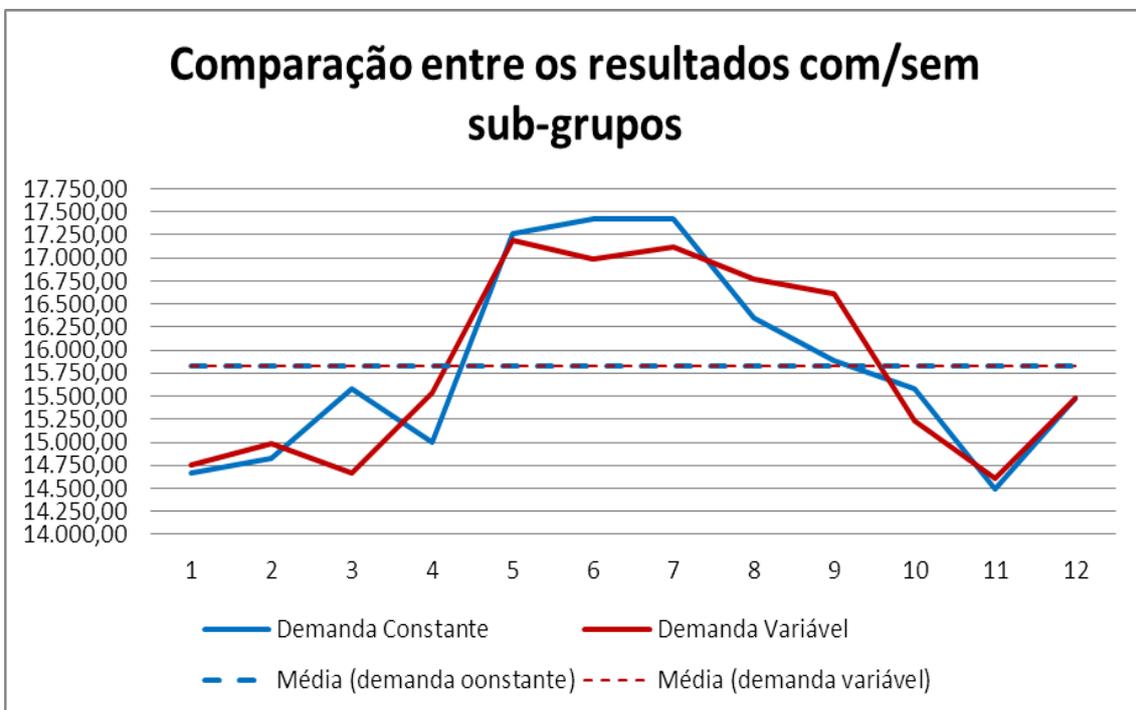


Figura 39 – Comparação entre as Gerações Hidrelétricas – Demanda constante

A variação na soma de Geração Hidrelétrica ao longo dos 12 meses estudados, nos dois casos acima, foi de 0,016% do valor.

#### **4.5. Comentários e conclusões**

Esse capítulo teve como contribuição para o trabalho a apresentação do Sistema Teste, das análises e dos resultados do trabalho, além da comparação dos resultados obtidos nesse estudo com os apresentados na literatura. Como conclusões principais do capítulo têm-se:

1. A definição dos parâmetros do AG utilizados através das análises prévias, na qual foram definidos os melhores operadores a serem utilizados;
2. A definição do Sistema Teste estudado, com a apresentação de suas principais características;
3. A comparação entre as diversas formas de decomposições escolhidas. Nesse ponto pode-se ressaltar:
  - a. A Relação Geográfica como melhor forma de decomposição, o que demonstra que a iteração entre as variáveis de uma mesma usina é a que gera maior influência no resultado;
  - b. A coerência entre os grupos com a utilização da fórmula Delta. Apesar dos resultados do Grupamento Delta não serem muito positivos, os grupos tiveram coerência na sua formação;
  - c. Observou-se que o Grupamento Delta apesar de ser uma técnica premiada e conhecida pela literatura, não é melhor que uma técnica como a Geográfica que representa de maneira mais coerente as características intrínsecas ao problema;
  - d. A relação temporal não apresenta resultados consistentes nas simulações, apresentando um Desvio Padrão superior ao das demais simulações;
4. A importância em simular um espaço de tempo superior ao analisado, para garantir que o resultado preservará o reservatório para os meses posteriores ao estudo;
5. A melhoria nos resultados obtidos em comparação com a literatura estudada [4]. Sabendo-se que os resultados encontrados foram significativamente superiores, demonstra a relevância da Cooperação Coevolutiva em união ao AG.

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo aplicar a técnica de Algoritmo Genético (AG) somado, à Cooperação Coevolutiva na otimização da Coordenação Hidrotérmica. Como principais vantagens obtidas pelo trabalho têm-se a redução do custo de operação nos estudos realizados e a definição da interação geográfica como mais significativo para o sistema teste específico.

Como dificuldade pode-se ressaltar a definição dos grupos devido à particularidade do sistema, além da modelagem do sistema e da definição dos diversos parâmetros do AG, o qual precisou ser testados muitas vezes, para se chegar aos melhores resultados possíveis.

Utilizando essa configuração, chegou-se a resultados interessantes com melhoras significativas de resultados, como apresentado abaixo:

1. A melhor forma de agrupamento (para sistemas de grande número de variáveis) é o agrupamento levando em conta a geografia da região, já que este agrupamento foi o que propiciou a maior economia de energia térmica. Essa conclusão pode ser considerada empírica, devida à ligação direta entre a decisão de consumo atual com a decisão futura.
2. O grupamento Delta não apresenta bons resultados quanto à otimização. Acredita-se que esse problema deve-se à dificuldade em definir a limitação entre os grupos a serem otimizados.
3. O grupamento Delta mostrou coerência na escolha das variáveis para os grupos, pois as variáveis (ou meses) das usinas tenderam a permanecer no mesmo grupo. Esse dado demonstra que a maior interação entre as usinas é realmente a geográfica ao invés da temporal, o que comprava a conclusão 1.
4. O grupamento por cascata pode ser considerado uma simplificação do grupamento geográfico, já que manteve diversas usinas unidas. O resultado foi mediano se comparado ao geográfico. Isso se deve ao alto número de variáveis que por ser muito alto, prejudicou as simulações.

5. O grupamento considerando integração temporal apresentou um alto desvio padrão e resultados medianos. Esse resultado demonstra que apesar de empiricamente existir uma grande relação entre as diversas usinas de uma mesma cascata no mesmo intervalo de tempo, essa relação não é tão forte quando a geográfica.

6. E principalmente, obteve-se queda significativa no uso de geração térmica quando se compara os resultados com a referência [7]. Ou seja, aplicar-se Cooperação Coevolutiva é uma técnica positiva que gera avanços aos resultados encontrados na literatura.

7. Além disso, observou-se a importância em conhecer a problemática estudada, já que mesmo o Grupamento Delta (técnica de decomposição premiada na literatura) não teve resultados tão positivos quanto às técnicas que trabalharam com as características intrínsecas ao problema.

Como trabalhos futuros propõem-se:

1. Estudar as demais técnicas de otimização;
2. Estudar outras formulações para a Equação Delta, como alterar o número de grupos e alterar o critério para a divisão dos grupos;
3. Estudar a melhoria nas vazões incrementais, já que no trabalho foi considerada uma média entre as vazões anuais conhecidas;
4. Estudar uma forma de melhorar a previsão da demanda no espaço de tempo a ser otimizado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico – Disponível em: <http://www.ons.org.br>; acessado em 2012.
- [2] EPE – Empresa de Pesquisa energética - Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>; acessado em 2012.
- [3] Eletrobras - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Disponível em: <http://www.eletrobras.com>; acessado em 2012.
- [4] BALLINI, R. Ballini; SOARES, S.; ANDRADE, M. G.; “*Previsão de vazões médias mensais usando redes neurais nebulosas*”; SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica; Versão ISSN 0103-1759; Vol. 14; N° 3; Campinas; Julho a Setembro de 2003.
- [5] Manual de Referência - Modelo NEWAVE – CEPEL
- [6] IEEEExplore – Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> - acessado em 2012.
- [7] HUMPIRI; C. J. P.; “*Estratégias Evolutivas no Planejamento Energético da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência*”; Dissertação de Mestrado; Programa de Engenharia Elétrica e de Computação; Departamento de Engenharia de Sistemas; Universidade Estadual de Campinas; Julho de 2005.
- [8] Eletrobras Furnas – Sistemas Eletrobras Furnas de Geração e Transmissão - Disponível em: <http://www.furnas.com.br>; acessado em 2012.
- [9] AMENDOLA; A. F.; “*Meta-Heurísticas de Otimização Aplicadas à Coordenação Hidrotérmica*”; Dissertação de Mestrado; Programa de Engenharia Elétrica; Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia; Universidade Federal do Rio de Janeiro; Junho de 2000.
- [10] PAREDES, R. W. J.; “*Desenvolvimento de uma Metodologia para a Coordenação Hidrotérmica de Longo Prazo para Mercado Elétrico Competitivo*”; Dissertação de Mestrado; Programa de Engenharia Elétrica; Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFMA; Fevereiro de 2007.
- [11] ZOUMAS, C. E.; BAKIRTZIS, A.G.; THEOCHARIS, J. B.; PETRIDIS V.; “*A Genetic Algorithm Solution Approach to the Hydrothermal Coordination Problem*”; IEEE Transactions on Power Systems; vol. 19; no 3; pp. 1356-1364; Aug. 2004.

- [12] ROCHA, A. G.; MORABITO, R.; COSTA, A. M. “*Aplicação do Método de Decomposição de Benders para o Problema de Carregamento de Paletes do Produtor*”; Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento; Rio de Janeiro; v.3; n.1; p. 44-57; janeiro a abril de 2011.
- [13] WOOD, A e WOLLENBERG B; “*Power Generation, Operation and Control*”; John Willey & Sons; 2nd; ed. 1996.
- [14] FISHER, M. L.; The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems, Management Science, 1981.
- [15] PIEKUTOWSKI, M. R.; LITWINOWICZ, T. e FROWD R. J.; “*Optimal Short-term Scheduling for a Large-scale Cascaded Hydro System*”; IEEE Transactions on Power Systems; vol. 2; pp. 805-811; May 1994.
- [16] VENTER; G. and Sobieszczanski-Sobieski; J.; “*Particle Swarm Optimization*”; Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures; Structural Dynamics and Materials Conference; Denver; CO; Vol. AIAA-2002-1235; April 22-25 2002.
- [17] RODRIGUES, F.L.; “*Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais*”; Tese de Doutorado; Universidade Federal de Viçosa; Minas Gerais; 2001.
- [18] METROPOLIS, N; ROSENBLUTH, A.; TELLER A; e TELLER, F.; “*Equation of state calculations by fast computing machines*”; Journal of Chemical Physics; volume 21; pp. 1087-1092; 1953.
- [19] PEREIRA, G. L.; “*Aplicação da Técnica de Recozimento Simulado em Problemas de Planejamento Florestal Multiobjetivo*”; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal do Estado de Minas Gerais; Março de 2004.
- [20] EBERHART, R. C., KENNEDY, J. A.; “*New Optimizer Using Particles Swarm Theory*”; Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science; IEEE Service Center; Piscataway; NJ; 39-43; Japan; 1995.
- [21] MEDEIROS, J. A. C. C.; “*Exame de Partículas como Otimização em Problemas Complexos de Engenharia Nuclear*”; Tese de Doutorado; Universidade Federal do Rio de Janeiro; Rio de Janeiro; 2005.
- [22] LAFETÁ, T. F. Q; “*Exame de Partículas Aplicado ao Problema Geral de Dimensionamento de Lotes*”; Monografia de Graduação; Universidade Federal de Lavras; Minas Gerais; 2010.

- [23] LUCAS, D. C.; “*Algoritmo Genético: Uma introdução*”; Apostila da disciplina de Ferramentas de Inteligência Artificial; UFRGS; Março 2002.
- [24] MICHALEWICZ, Z. “*Genetics Algorithms plus Data Structures equal Evolution Programs*”; 3 ed.; New York: Springer-Verlag Berlin Hildelberg; 1996.
- [25] Manual do Toolbox de Algoritmo Genético do MATLAB – 1ª Versão – Janeiro de 2004.
- [26] MERZ; P. e FREISLEBEN; B.; “*On the Effectiveness of Evolutionary Search in High-Dimensional NK-Landscapes*”; 1998 IEEE World Congress in Computational Intelligence, pp. 741-745.
- [27] MAATEN; L.; POSTMA; E. e HERIK; J.; “*Dimensionality Reduction: A Comparative Review*”; MICC; Maastricht University; The Netherlands; October 26; 2009.
- [28] GARG, P.; International Journal of Network Security & its Applications (IJNSA), Vol.1, n ° 1, abril de 2009, Índia.
- [29] POZO, A., FREDO, A. e BRITO, R. C.; “*Algoritmos Meméticos*”; Universidade Federal do Paraná; Tópicos em Inteligência Artificial.
- [30] RICKLEFS, R. E. “*A economia da Natureza*”. Ed. Guanabara Koogan, 5ª Ed.- Rio de Janeiro, 2009.
- [31] RUSSEL, S. e NORVIG, P.; “*Inteligência Artificial*”; Elsevier-Campus; 2004
- [32] YANG, Z. e TANG, K.; “*Multilevel Cooperative Coevolution for Large Scale Optimization*”; CEC 2008, Evolutionary Computing; pp. 1663-1670; Hong Kong; China.
- [33] OMIDVAR, M. Nabi; LI, X. e YAO, X; “*Cooperative Co-evolution with Delta Grouping for Large Scale Non-separable Function Optimization*”; IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC); 2010, pp.1-8, Jul. 2010.

## APÊNDICE A – Dados das Usinas Hidroelétricas

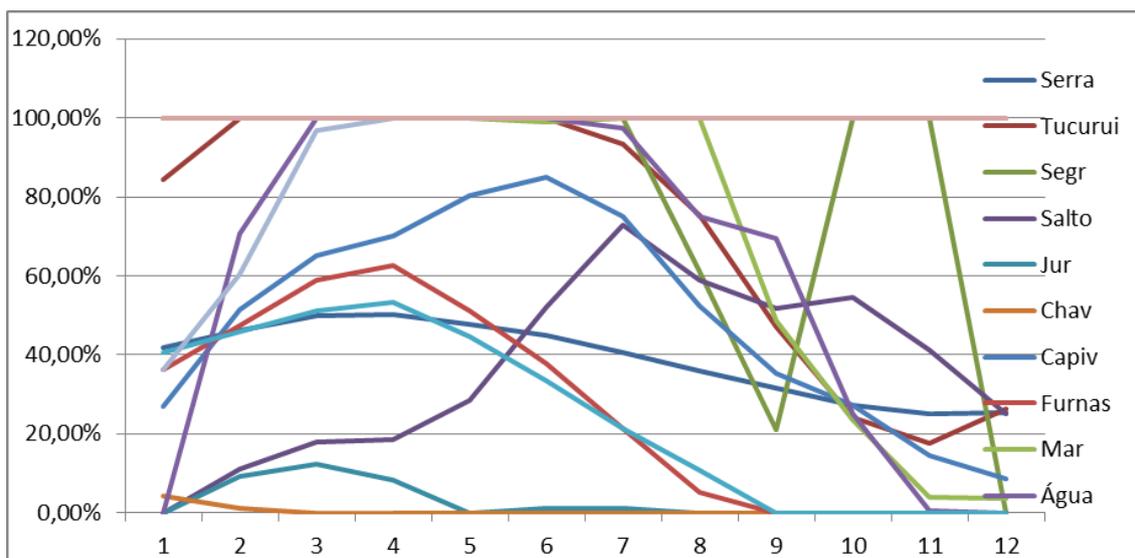
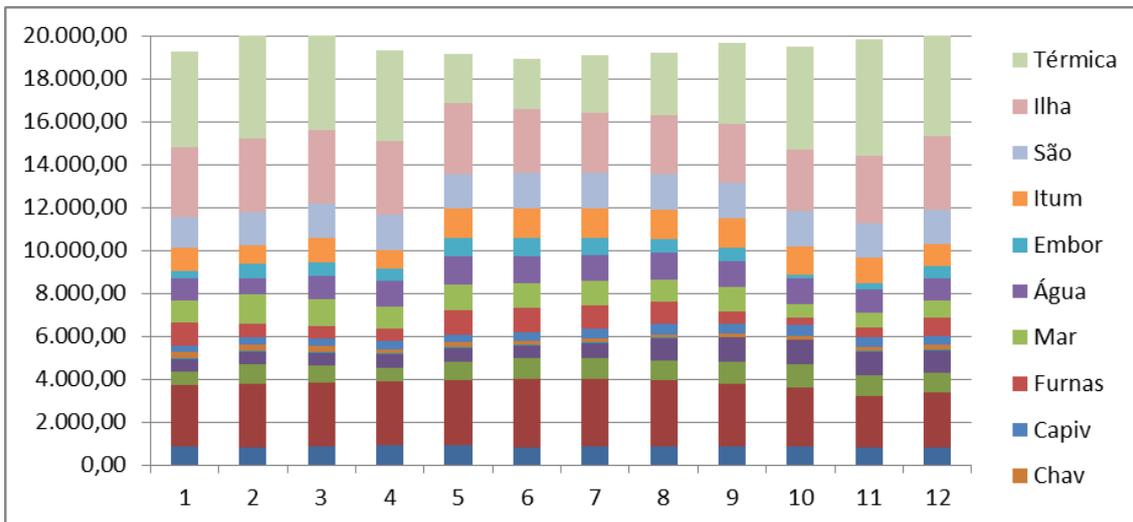
Usina	Volume [hm <sup>3</sup> ]			Defluência Mínima [hm <sup>3</sup> ]	Turbinamento Máximo [m <sup>3</sup> /s]	Produtividade Específica
	Máximo	Mínimo	Útil			
<b>Água Vermelha</b>	11.025	5.856	5.169	501	2.492	0,008437
<b>Capivara</b>	10.540	4.816	5.725	500	1.322	0,008382
<b>Chavantes</b>	8.795	5.754	3.041	160	631	0,009025
<b>Emborcação</b>	17.725	4.669	13.056	100	894	0,008829
<b>Furnas</b>	22.950	5.733	17.217	196	1.516	0,008621
<b>Ilha Solteira</b>	21.062	15.546	5.516	1.300	8.422	0,008779
<b>Itumbiara</b>	17.027	4.573	12.454	254	2.748	0,008854
<b>Jurumirim</b>	7.008	3.843	3.165	147	349	0,008731
<b>Marimbondo</b>	5.887	627	5.260	441	2.638	0,008829
<b>Salto Santiago</b>	6.775	2.662	4.113	115	1.262	0,009025
<b>São Simão</b>	12.540	7.000	5.540	343	2.278	0,008633
<b>Segredo</b>	2.950	2.562	388	94	1.082	0,008535
<b>Serra da Mesa</b>	54.400	11.150	43.250	98	1.034	0,008829
<b>Tucuruí</b>	45.500	13.487	32.013	2.000	5.963	0,008829

Usina	Coeficiente de Polinômios				
	COTA MONTANTE				
	a0	a1	a2	a3	a4
<b>Água Vermelha</b>	351	5,50E-03	-3,35E-07	9,47E-12	0
<b>Capivara</b>	302	5,18E-03	-2,73E-07	6,96E-12	0
<b>Chavantes</b>	442	4,85E-03	-1,35E-07	0	0
<b>Emborcação</b>	568	1,45E-02	-1,20E-06	5,83E-11	-1,12E-15
<b>Furnas</b>	735	3,50E-03	-1,97E-07	6,92E-12	-9,77E-17
<b>Ilha Solteira</b>	294	3,60E-03	-1,85E-07	5,88E-12	-7,50E-17
<b>Itumbiara</b>	471	7,28E-03	-5,61E-07	2,60E-11	-4,85E-16
<b>Jurumirim</b>	546	4,00E-03	-1,27E-07	0	0
<b>Marimbondo</b>	418	1,12E-02	-2,29E-06	2,91E-10	-1,48E-14
<b>Salto Santiago</b>	448	1,82E-02	-2,87E-06	3,00E-10	-1,27E-14
<b>São Simão</b>	358	8,62E-03	-8,84E-07	5,29E-11	-1,24E-15
<b>Segredo</b>	553	2,47E-02	-2,10E-06	0	0
<b>Serra da Mesa</b>	391	2,77E-03	-4,36E-08	2,90E-13	0
<b>Tucuruí</b>	30	2,18E-03	-5,54E-08	8,29E-13	-4,94E-18

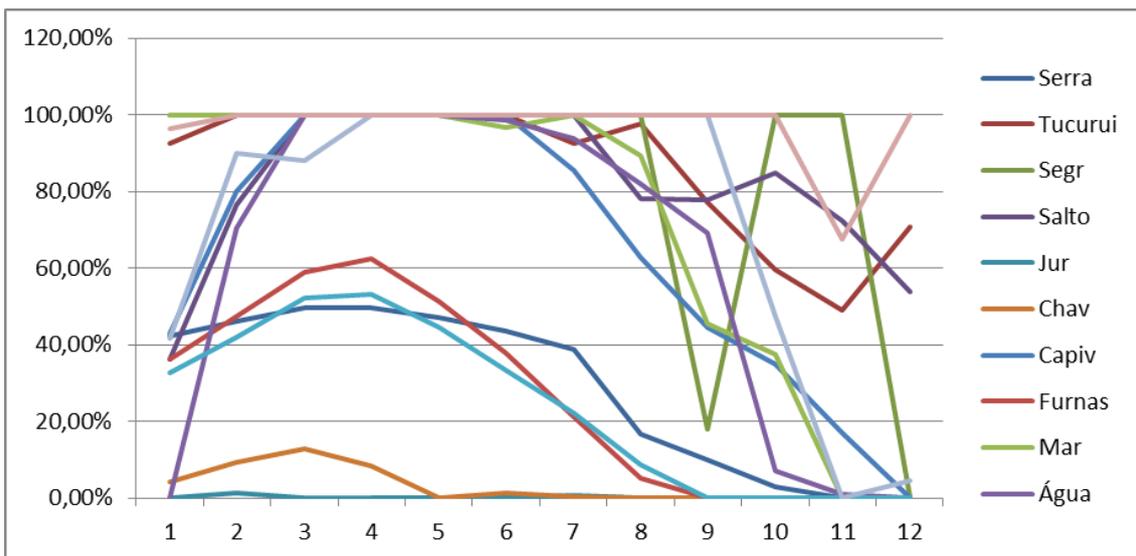
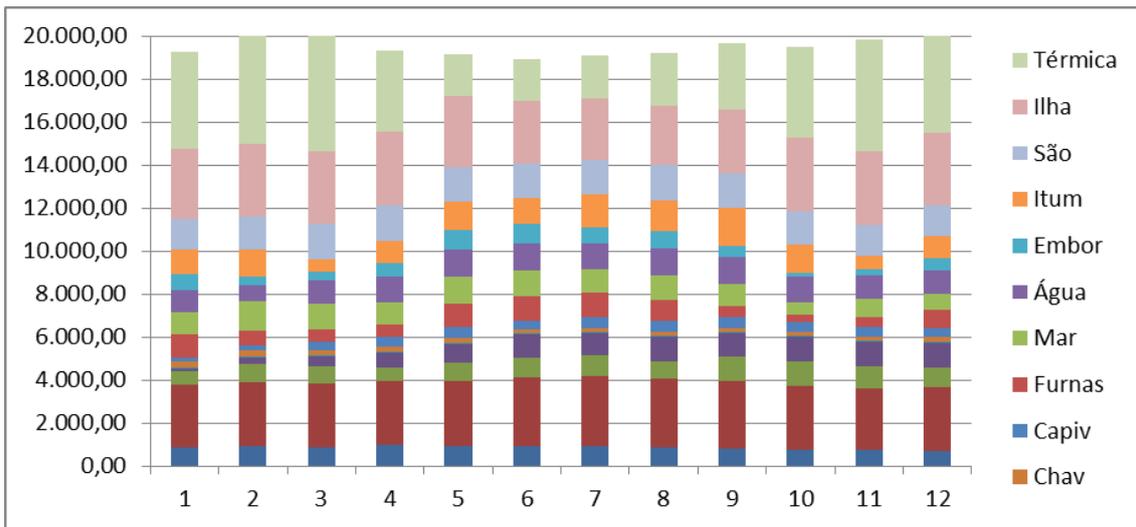
Usina	Coeficiente de Polinômios				
	COTA JUSANTE				
	a0	a1	a2	a3	a4
<b>Água Vermelha</b>	322,6487	8,06E-04	-7,39E-09	5,31E-13	-4,31E-17
<b>Capivara</b>	283,748	1,08E-03	-3,19E-08	0	0
<b>Chavantes</b>	397,4	2,98E-03	-2,78E-07	0	0
<b>Emborcação</b>	519,775	4,00E-03	-1,10E-06	2,34E-10	-1,76E-14
<b>Furnas</b>	671,633	1,02E-03	-1,80E-07	2,51E-11	0
<b>Ilha Solteira</b>	279,9539	4,27E-05	4,25E-08	-3,10E-12	6,56E-17
<b>Itumbiara</b>	433	1,60E-03	-8,18E-08	3,17E-12	0
<b>Jurumirim</b>	531,395	3,36E-03	-4,42E-07	0	0
<b>Marimbondo</b>	381,093	1,41E-03	-2,01E-08	1,06E-13	0
<b>Salto Santiago</b>	394,416	2,11E-03	-7,92E-08	2,35E-12	-2,71E-17
<b>São Simão</b>	315,585	2,35E-03	-1,38E-07	5,23E-12	-7,86E-17
<b>Segredo</b>	490,0388	6,08E-05	2,92E-07	-2,32E-11	4,56E-16
<b>Serra da Mesa</b>	332,798	1,34E-03	8,82E-08	-1,63E-11	0
<b>Tucuruí</b>	2,674	7,41E-04	-2,22E-08	4,08E-13	-2,87E-18

## APÊNDICE B – Gráficos das melhores simulações

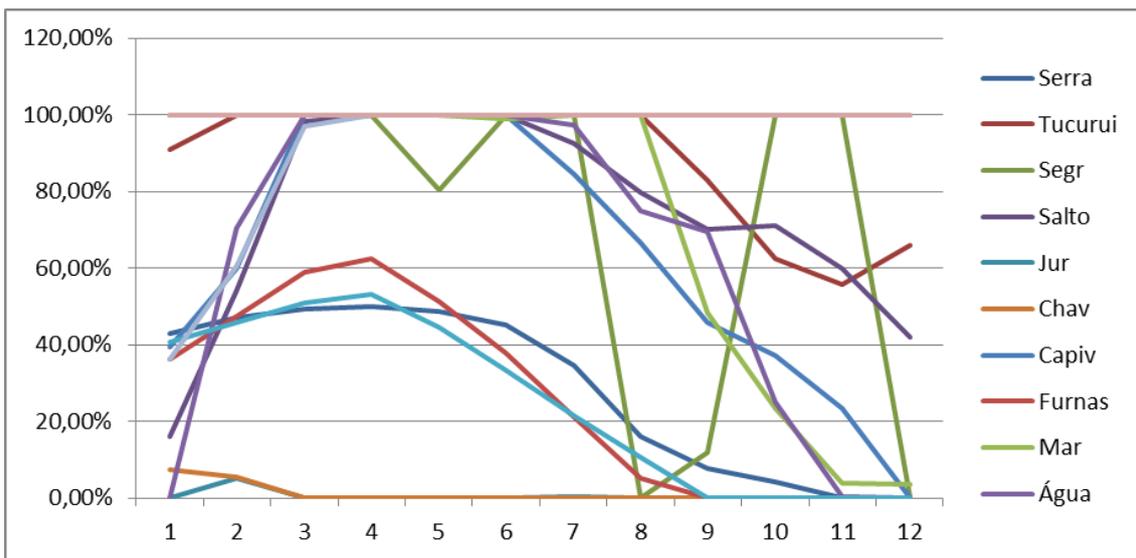
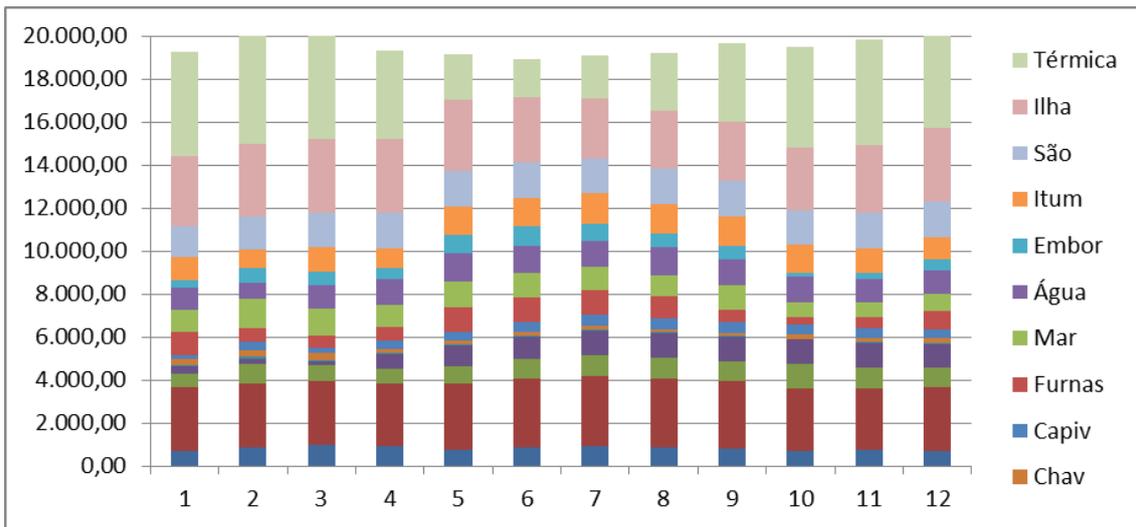
### B.1 Solução Base



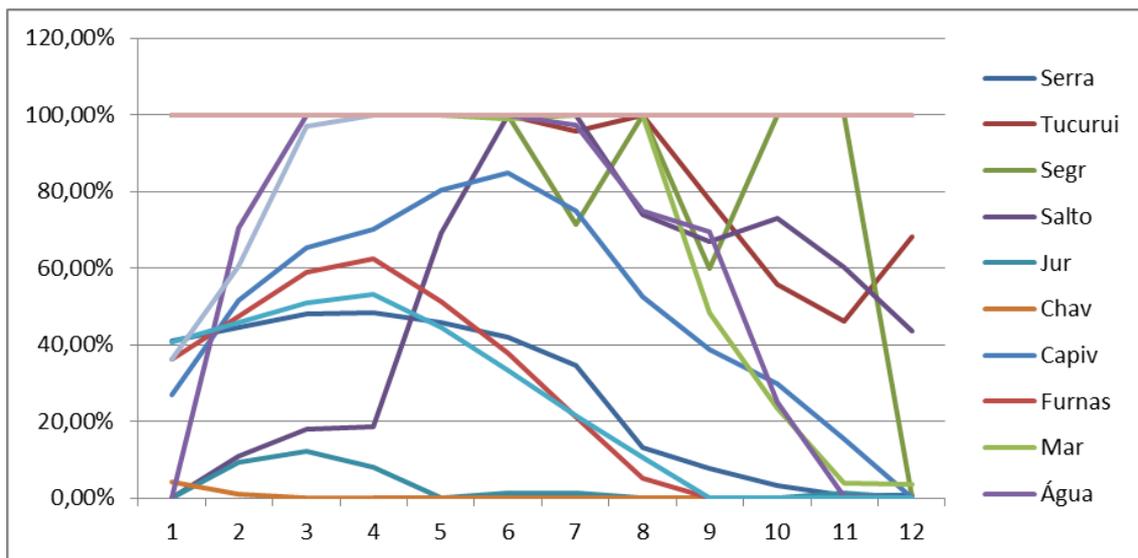
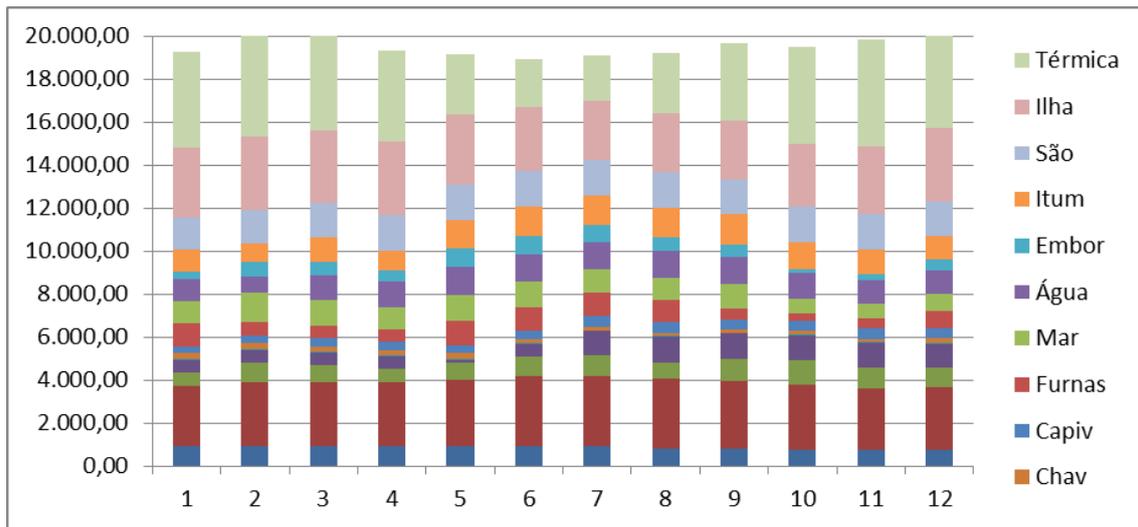
## B.2 Solução Ótima – Geográfico



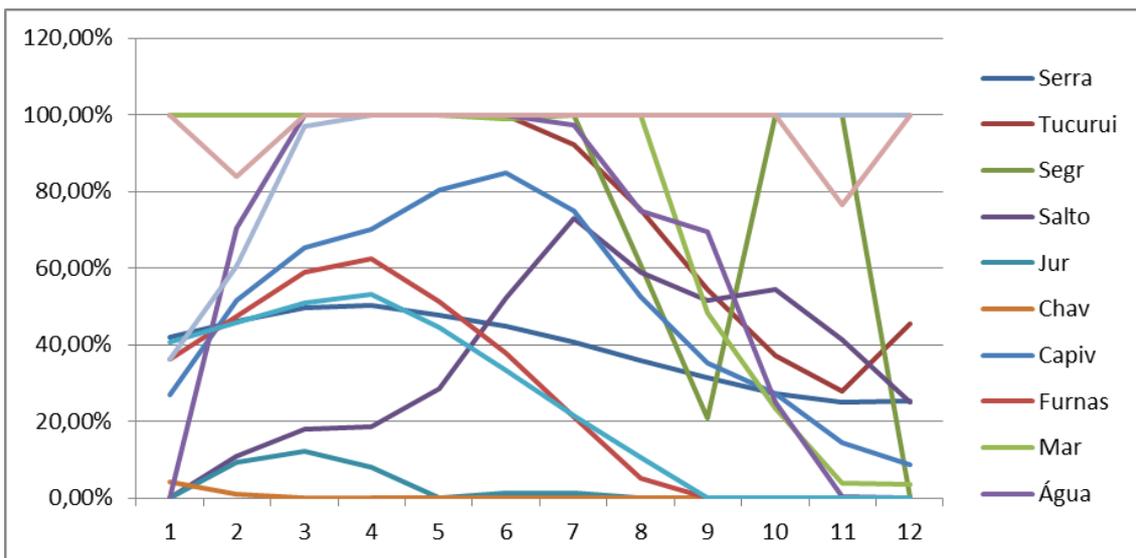
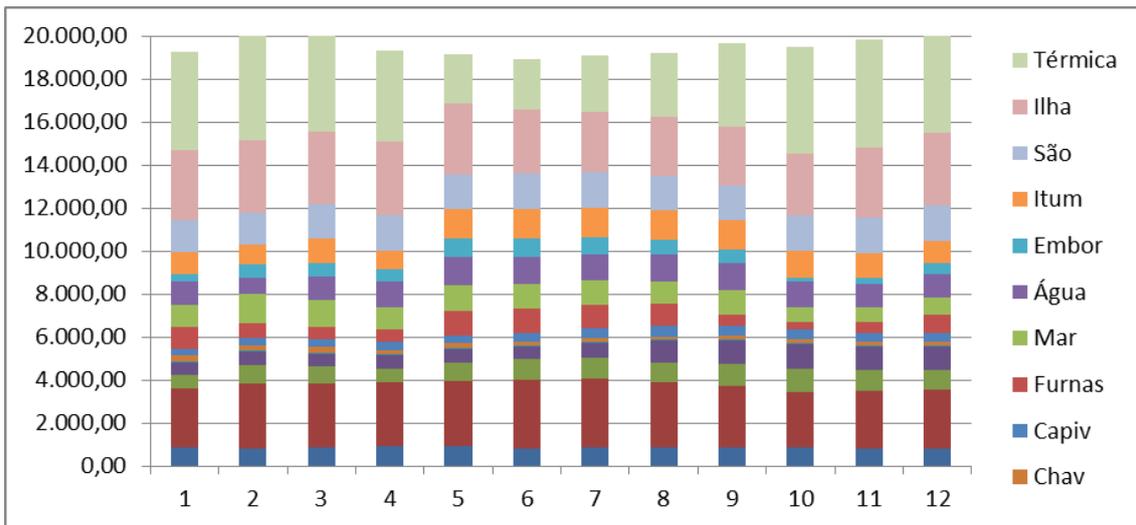
### B.3 Solução Ótima – Cascata



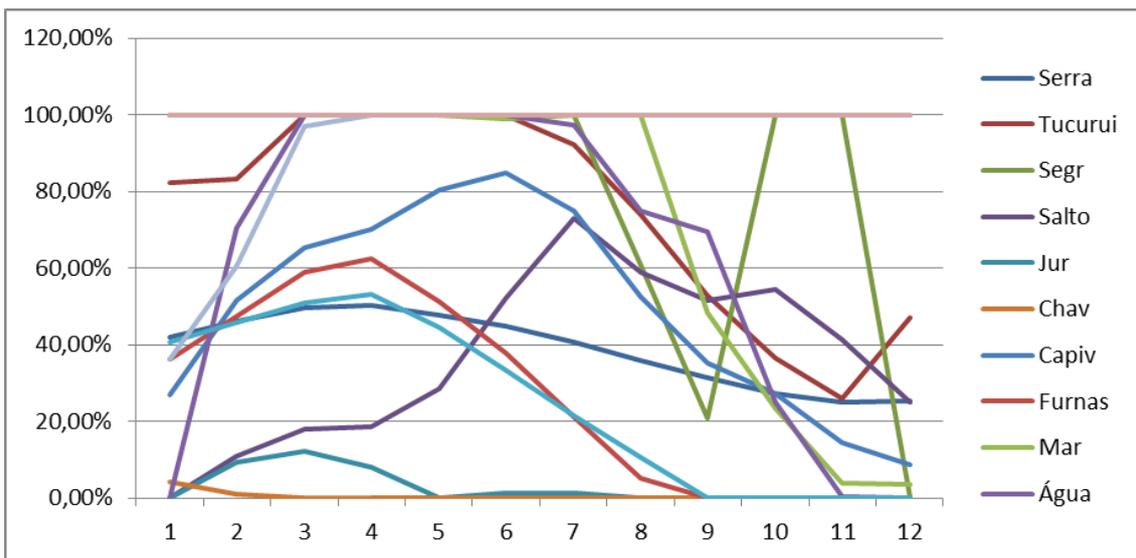
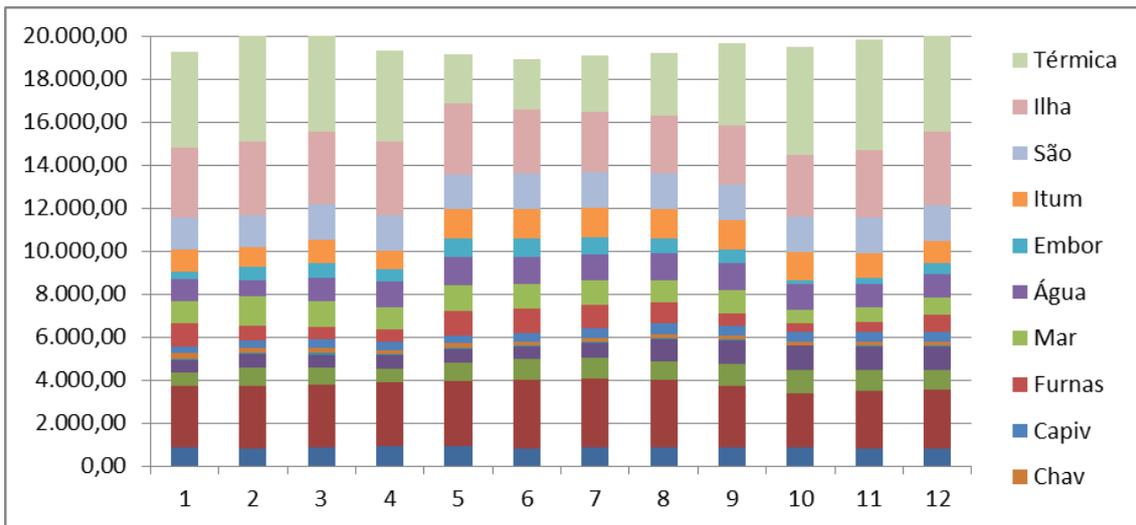
## B.4 Solução Ótima – Tempo



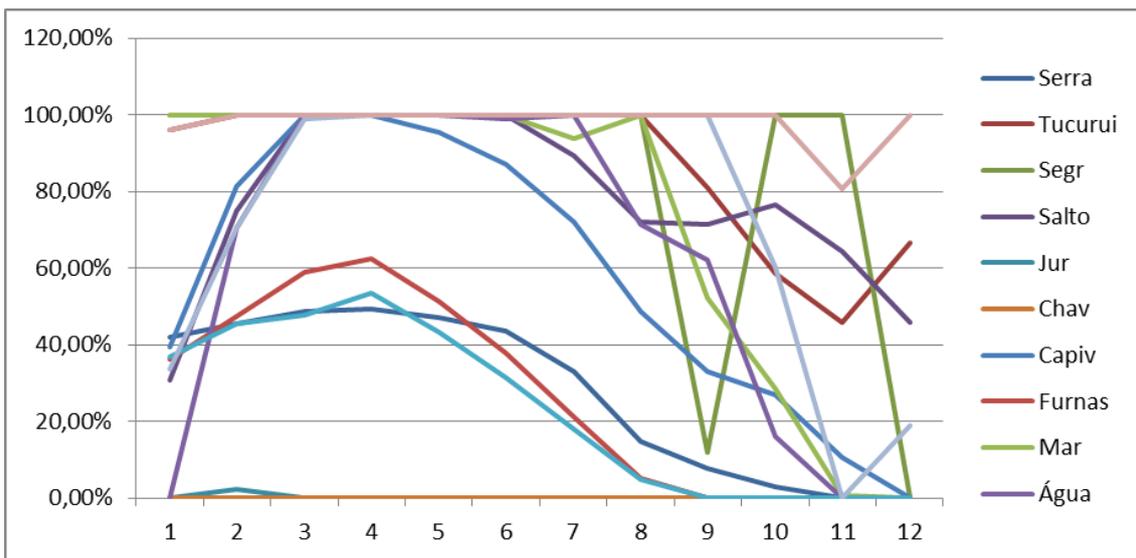
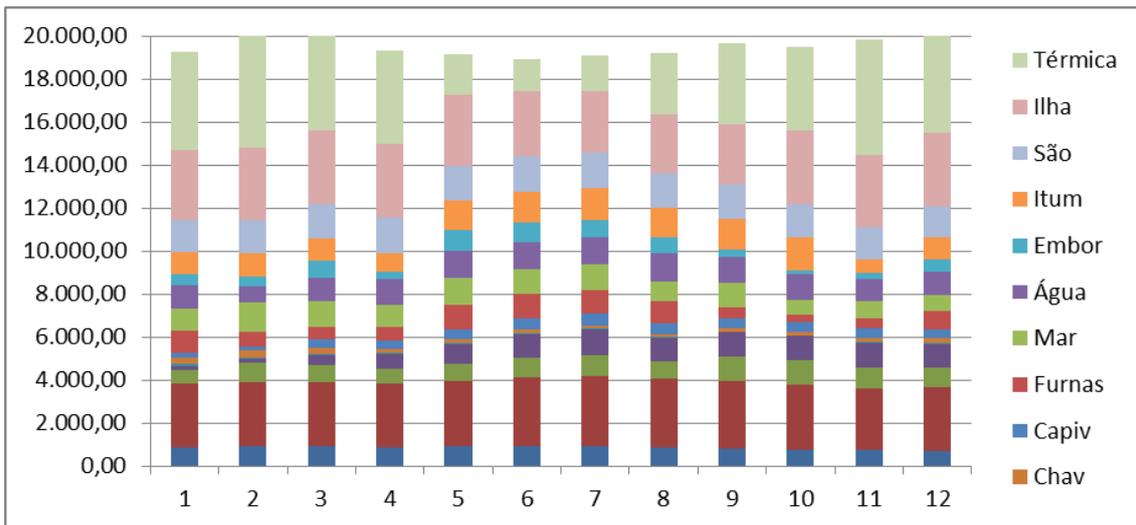
## B.5 Solução Ótima – Delta 1



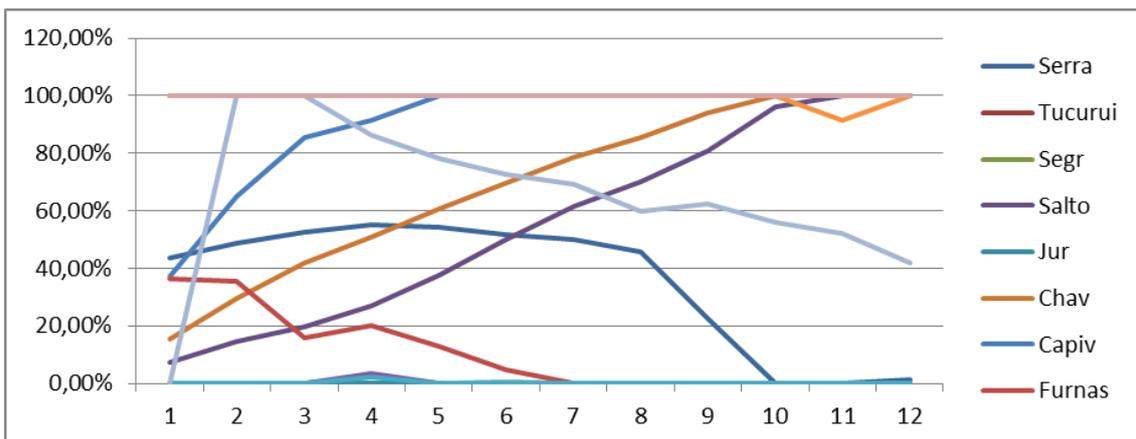
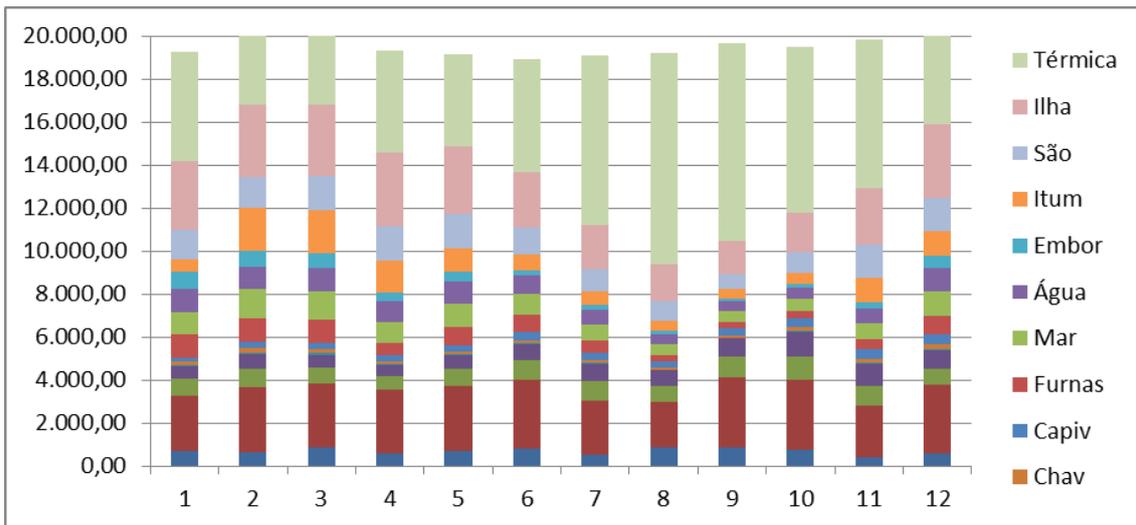
## B.6 Solução Ótima – Delta 2



## B.7 Solução Ótima – Demanda Constante



### B.8 Solução Ótima – Considerando 24 meses



## APÊNDICE C – Armazenamento por Usina (mês a mês)

