



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/02  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AO PROBLEMA DE COORDENAÇÃO HIDROTÉRMICA**

**Antonio Carlos S. de Lima  
COPPE/UFRJ**

**Anna Carolina R H Silva  
ELETROBRA**

**RESUMO**

Este informe técnico apresenta a utilização de Algoritmo Genético (AG) em conjunto com Cooperação Coevolutiva (CC) na resolução de problema de coordenação hidrotérmica, esse problema foi formulado como uma minimização dos custos da geração.

Para análise desse problema utilizou-se um Sistema Teste de alta complexidade composto de 14 usinas. As simulações utilizando CC foram realizadas utilizando diversas formas de Decomposição do Problema, visando encontrar o melhor resultado possível, e comparadas com as otimizações utilizando apenas AG.

Concluiu-se que a utilização de CC gerou melhorias nos resultados de até 11% em comparação com os resultados utilizando apenas AG.

**PALAVRAS-CHAVE**

Coordenação Hidrotérmica, Algoritmo Genético, Otimização, Cooperação Coevolutiva, Geração.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

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, que por ser de difícil previsibilidade torna-se uma dificuldade na modelagem do problema. Outras dificuldades encontradas são a dimensionalidade do problema e as perdas envolvidas.

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.

Devido a essas particularidades, entende-se que a utilização de Algoritmo Genético (AG) seria válida, pois possibilita trabalhar no espaço da solução sem modelar o problema. Por outro lado, o AG apresenta queda na qualidade das respostas para problemas com grande número de variáveis (caso do problema de coordenação hidrotérmica).

Então, para minimizar essa perda de resultado utilizou-se a Cooperação Coevolutiva, que divide o problema em subgrupos o que possibilita a melhor utilização do AG.

O objetivo desse informe 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.

## 2.0 - 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 deve-se a necessidade em equilibrar a demanda atual com a demanda futura, ou seja, manter economia para o futuro, sem prejudicar o presente.

Neste informe, o valor de vazão natural considerado foi calculado a partir das médias dos dados reais divulgados pelo ONS. 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.

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.

## 3.0 - 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.

Algumas das principais vantagens dessa técnica são: (i) não é necessário modelar o problema, apenas é necessária a modelagem de uma função capaz de analisar os resultados do problema; (ii) apresentação de um conjunto de "n" soluções, ao invés de apenas uma e (iii) possibilita analisar problemas não lineares.

Já como principal desvantagem, apresenta perda de qualidade de acordo com o aumento do número de dimensões [1].

## 4.0 - COOPERAÇÃO COEVOLUTIVA

A técnica de cooperação coevolutiva baseia-se na relação entre espécies chamada de Mutualismo, na qual dois indivíduos de espécies diferentes se beneficiam mutuamente.

As principais etapas desse processo encontram-se no texto abaixo [2]:

- 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 etapa de Decomposição do Problema apresenta a maior complexidade do processo, pois é necessário a manter as variáveis que interagem entre si no mesmo grupo. Sendo assim, optou-se por estudar diversas formas de opções. Inclusive, espera-se com isso comparar o conhecimento empírico do problema com técnicas puramente matemáticas.

São apresentadas abaixo, as formas de decomposição estudadas:

#### 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 mesma 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 e
- Grupo 4 – Usina 4.

#### 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.

Por 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) e
- Grupo 2 – Cascata 2 (usinas 3 e 4).

#### 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.

Por 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) e
- Grupo 6 – Meses de setembro a dezembro das usinas da segunda cascata (usinas 3 e 4).

#### 4.4 Grupamento Delta

Nesta análise os subgrupos foram divididos de acordo com a metodologia teórica [3], que visa organizar os subgrupos através de uma função que, teoricamente, capta a interação entre as variáveis. Essa função é chamada de Delta e definida como:

$$\bar{\delta}_i = (\sum_{j=1} N_{pop} \cdot \delta_{i,j}) / N_{pop} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:  $N_{pop}$  = Número de população do AG,

$\delta_{i,j}$  = Diferença entre o valor da variável do indivíduo "i" para o indivíduo "j".

### 5.0 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para as simulações foi empregado o MATLAB como ambiente de simulação e programação. O Sistema Teste utilizado foi retirado de [4], 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 pelo ONS. Para representar a perda devido ao vertimento de água foram acrescidas penalidades quadráticas na função custo.

Inicialmente, o sistema foi otimizado utilizando somente Algoritmo Genético (sem a definição de subgrupos). O objetivo dessa simulação era encontrar a Solução Base que seria utilizada nas demais etapas de otimização.

A partir da solução base, otimizou-se novamente o sistema considerando os subgrupos escolhidos (de acordo com a premissa do Item 4). 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.

Os grupos foram divididos de acordo com os grupos, conforme dados abaixo:

- 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 e
- Delta: Número de grupos variáveis, limitados em 10. As variáveis foram organizadas através de linearização dos resultados obtidos na equação Delta.

O Sistema teste utilizada contempla 14 usinas termelétricas e está apresentado na Figura 1.

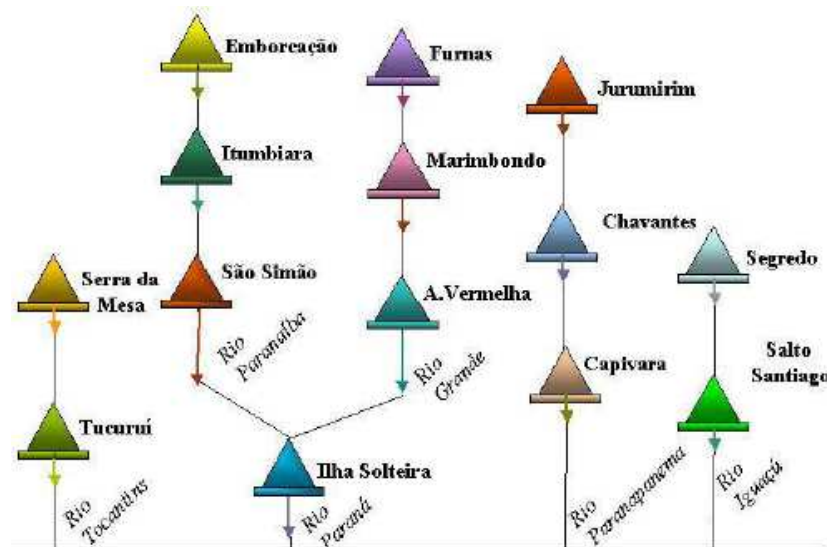


Figura 1 – Sistema Teste

Já as usinas térmicas consideradas foram as de Termopernambuco, Fortaleza, Fafen, Termoceará, Termbahia, Camaçari e foi considerado um custo para o Déficit de energia.

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 e
- 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 e
- Mutação: Gaussiana.

## 6.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Primeiramente o Sistema-Teste foi otimizado como um todo, sem a utilização de nenhuma divisão de subgrupos. O número de simulações foi aleatório e o melhor resultado de custo (mínimo encontrado) em R\$/milhões obtido foi de: **1,566E+10**. Esse valor representa a simulação na qual a geração hidrelétrica foi mais utilizada e foi considerado como Solução Base.

A Tabela 2 apresenta os melhores resultados das simulações por subgrupo realizadas. Essas simulações utilizaram como premissa a Solução Base. Os resultados representam o custo de operação encontrado nas simulações, o número de simulações foi aleatório.

Tabela 2 – Melhor resultado das simulações

Geográfico	Cascata	Tempo	Delta 1	Delta 2
1,408E+10	1,469E+10	1,470E+10	1,557E+10	1,560E+10

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%.

As tabelas de Delta estão diferenciadas por representar organizações diferentes de grupamento. Estes grupamentos foram definidos através dos seguintes passos: (i) calcular os valores de delta; (ii) organizar de maneira crescente; (iii) parametrizar os valores de 0 a 1 e (iv) 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 nos grupos 1, 2 e 10.

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. 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.

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%).

É importante comparar o consumo de geração hidrelétrica na Solução Base com a melhor solução encontrada (sub-grupo geográfico). Essa comparação pode ser vista na Figura 2, onde se representa o consumo de hidrelétrica por mês nas duas soluções.

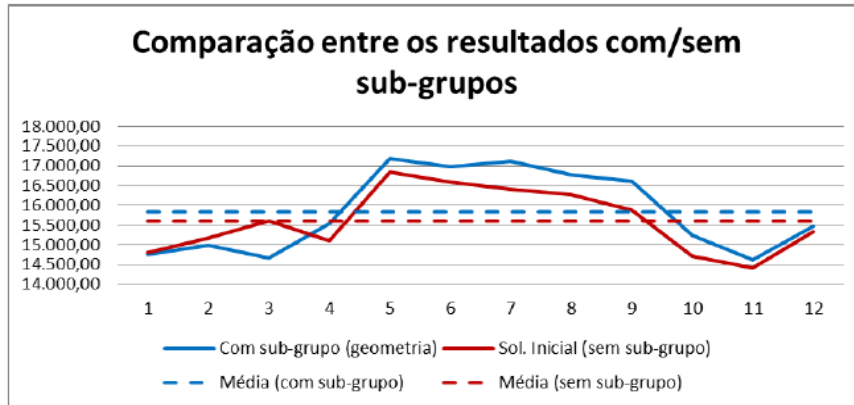


Figura 2 – Comparação do consumo de hidrelétrica

É interessante notar 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.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Este informe teve como objetivo aplicar a técnica de Algoritmo Genético (AG) somado, à Cooperação Coevolutiva na otimização da Coordenação Hidrotérmica. Como principais vantagens obtidas pelo informe 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 inúmeras vezes.

Quanto à comparação entre as formas de decomposição do problema, chegaram-se as seguintes considerações:

- A relação geográfica foi a que obteve melhores resultados, o que demonstra que a iteração entre as variáveis de uma mesma usina é a que gera maior influência no resultado;
- Observou-se que o grupamento Delta apesar de ser uma técnica premiada e conhecida pela literatura, não obteve bons resultados. Por outro lado, houve coerência na formação dos grupos (as variáveis de uma usina tenderam a ficar no mesmo grupo);
- A relação temporal não apresenta resultados consistentes nas simulações, apresentando o maior valor de desvio padrão.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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.
- (2) YANG, Z. e TANG, K.; "Multilevel Cooperative Coevolution for Large Scale Optimization"; CEC 2008, Evolutionary Computing; pp. 1663-1670; Hong Kong; China.
- (3) 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.

(4) 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.

#### 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Antonio Carlos Siqueira de Lima, formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1995), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1997) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1999). Atualmente é professor associado da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Anna Carolina da Rocha Henriques da Silva, nascida no Rio de Janeiro no ano de 1986. Formada em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2007), mestrado em Sistemas de Potência pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2013). Trabalho na Marte Engenharia de 2008 a 2009, onde atuou na área de Linhas de Transmissão. Trabalha desde 2009 na área de transmissão da Eletrobras.