

# ESTUDO SOBRE O EMPREGO DE COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA AO PROBLEMA DE DESPACHO ÓTIMO EM USINAS HIDRELÉTRICAS

**Carolina Gil Marcelino<sup>1</sup>, Daniel Junio Reis e Pereira<sup>1</sup>,  
Rafael José Teixeira Araújo<sup>1</sup>, Paulo Eduardo Maciel de Almeida<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>LSI /Laboratório de Sistemas Inteligentes  
PPGMMC /Programa de Pós Graduação em Modelagem Matemática e Computacional  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)  
Av. Amazonas, 7675, CEP 30510-000, Belo Horizonte (MG), Brasil

{carolina, danielpereira, pema}@lsi.cefetmg.br, araujo.rafael@yahoo.com.br

**Resumo.** *Em produção de energia tem-se o conceito de despacho elétrico, que pode ser definido como o controle da operação de geração de energia elétrica em uma usina. Uma programação de despacho ótimo de unidades de geração hidrelétrica faz com que uma maior quantidade de energia possa ser gerada com o mínimo de água possível. Este trabalho apresenta o estudo de uma solução de otimização para o sistema gerador hidrelétrico de uma usina, usando técnicas de computação evolutiva. A modelagem e a validação das técnicas serão realizadas com experimentos práticos de simulação, a partir de dados reais de uma usina. No decorrer do texto são descritas as equações e modelos para simulação do sistema e os resultados dos experimentos realizados são analisados.*

## 1 Introdução

A geração hidrelétrica é a responsável pelo abastecimento da maior parte da demanda de energia no Brasil (Tolmasquim, 2011). Uma usina hidrelétrica aproveita o potencial de um determinado reservatório para a geração e está sujeita, em determinados períodos, a uma variação da quantidade de água disponível para a geração de energia. Um sistema de geração de energia deve utilizar de modo eficiente os insumos necessários para a produção, sobretudo em sistemas de médio e grande porte, nos quais os ganhos são mais perceptíveis. A operação de uma usina hidrelétrica deve, além de atender a uma determinada demanda, considerar as restrições de seus recursos, ou seja, deve determinar uma produtividade ótima que respeite as limitações, economizando matéria prima e reduzindo custos. A Figura 1 mostra uma usina hidrelétrica brasileira de grande porte.



Fonte: Extraído de Itaipu (2012)  
FIGURA 1 - USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU

O ponto inicial deste trabalho é apresentar o estudo de uma modelagem matemática proposta em trabalhos correlacionados, bem como o emprego de computação evolutiva para solução do problema de despacho ótimo no curto prazo. Como estudo de caso, é apresentada uma usina de médio porte instalada no território brasileiro. A metodologia de pesquisa se baseou na revisão da literatura, na análise de dados da usina estudada, na estipulação de parâmetros de inicialização do sistema de potência elétrica, na implementação de algoritmos evolutivos e na execução do experimento de despacho horário. O experimento se baseia na comparação entre a demanda solicitada e o resultado entregue pelo algoritmo. Por exemplo, se a demanda que atende a geração da usina no horário de 13:00hs é 320MW, o algoritmo deverá escalonar a mesma para o número de unidades geradoras disponíveis de forma a encontrar o ponto ótimo de cada uma delas. Ao final será observado se a soma da geração de cada unidade atingiu a demanda total de maneira eficiente, identificando se houve economia de recursos hídricos.

O texto está organizado como se segue: a seção 2 descreve o problema de despacho ótimo e o estado da arte, a seção 3 apresenta o modelo matemático, a seção 4 aborda Computação Evolutiva, a seção 5 o estudo de caso e os experimentos realizados e por fim a seção 6 apresenta as conclusões a respeito do estudo realizado.

## **2 O problema de Despacho Ótimo**

O Problema caracteriza-se em otimizar a produtividade de energia elétrica, ou seja, gerar maior potência com o mínimo de recurso hídrico necessário. A apuração da eficiência pode ser modelada, por exemplo, por meio de uma função objetivo. De acordo com Konar (2005) normalmente busca-se maximizar ou minimizar os valores destas funções usando algoritmos de otimização, sempre respeitando restrições impostas pelo problema. Porém, as funções objetivo em um sistema de otimização devem ser modeladas buscando-se representar o sistema que será otimizado. Muitas vezes isto se torna um trabalho difícil, dependendo da complexidade deste sistema.

A existência ou não de restrições define uma classificação do problema de otimização, ou seja, são pesquisados tanto problemas irrestritos quanto problemas com restrições. Em produção de energia tem-se o conceito de despacho elétrico, que pode ser definido como o controle da operação de geração de energia elétrica em uma usina. Garantir a geração de potência com a utilização mínima de recursos hídricos, levando em conta as restrições operativas de uma usina hidrelétrica, e de todo sistema de potência conectado é caracterizado como despacho ótimo de geração.

### **2.1 Estado da Arte**

Diversos trabalhos sobre despacho ótimo de geração em usinas, tanto termoeletricas, quanto hidrelétricas podem ser encontrados na literatura. Dentre esses, alguns podem ser destacados por sua relevância e modo com que o problema foi tratado.

Villasanti (2004) realizou o despacho de unidades geradoras utilizando duas técnicas evolucionárias: *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA) e Algoritmo Genético modificado. A função objetivo é composta por duas parcelas: maximização da

eficiência na função geração e minimização de partida e parada, possuindo como restrições o número máximo e mínimo de unidades geradoras disponíveis e a demanda solicitada para cada intervalo de tempo. Foi realizado teste em uma usina composta por nove conjuntos geradores idênticos, com melhoria da eficiência global em relação ao realizado no despacho real. Finardi (2005) propôs uma modelagem matemática para resolver o problema despacho de unidades geradoras hidrelétricas. A modelagem utiliza uma meta de quantidade de água a ser descarregado por cada usina hidrelétrica do sistema de energia. Os resultados deste trabalho mostram que a modelagem adotada cumpriu a meta de otimização desejada.

Baños (2010) realizou uma revisão das técnicas até então efetuadas para otimização aplicada à geração de energia renovável e sustentável. Como solução de despacho ótimo, os artigos por ele visitados apresentam as técnicas: Algoritmos Genéticos e *Particle Swarm Optimization*. Em seu trabalho Araújo (2010) fez uso da modelagem matemática elaborada descrita em Finardi (2005). Com a aplicação de técnicas de inteligência computacional foi possível obter uma solução factível para o problema de otimização. Na busca de encontrar o melhor algoritmo para satisfazer a solução, foram implementados diversos algoritmos. O Algoritmo Genético apresentou o melhor resultado, conseguindo atender a demanda de forma eficiente. Pezzini (2011) enuncia em seu artigo técnicas de otimização para melhorar a eficiência energética em sistemas de energia. As técnicas citadas são: Algoritmos de busca, Algoritmos Evolucionários, *Simulated Annealing*, Busca Tabu, *Ant Colony Optimization*, *Particle Swarm Optimization*, Algoritmos Genéticos, Redes Neurais e Técnicas de Programação Evolucionária. Entre elas, Algoritmos Genéticos são recomendados para minimização de perdas e maximização de eficiência.

No entanto é conclusivo que nenhuma técnica é ideal para o tratamento de problemas complexos como controle de tensão e despacho ótimo e que, na maioria das vezes, o usual é a combinação de várias técnicas a fim de se chegar ao objetivo final.

### 3. Modelagem Matemática

O modelo matemático abordado neste trabalho é descrito nesta seção. Tal modelo foi proposto por Finardi (2005) e utilizado por Araujo (2010). A Tabela 1 descreve a notação de cada parâmetro do modelo.

TABELA 1- NOTAÇÃO DA MODELAGEM UTILIZADA

$g$	Constante de conversão cujo valor é $9,81 \cdot 10^{-3}$ (kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$J$	Índice da unidade de geração
$T$	Índice do estágio de tempo
$\eta_{tJ}$	Eficiência da turbina $j$ no estágio $t$ (%)
$\eta_{gJ}$	Eficiência do gerador da unidade $j$ no estágio $t$ (%)
$hl_{tJ}$	Nethead: Queda líquida da unidade $j$ no estágio $t$
$q_{jt}$	Vazão de água da unidade $j$ no estágio $t$ (m <sup>3</sup> / s)
$ph_{tJ}$	Função de produção da unidade $j$ no estágio $t$ (MW)
$v_{rt}$	Armazenamento do reservatório $r$ no estágio $t$ (h m <sup>3</sup> )
$Q_{rt}$	Vazão de água do reservatório $r$ no estágio $t$ (m <sup>3</sup> / s)

$s_{rt}$	Derramamento do reservatório r no estágio t ( $m^3 / s$ )
$fb_{rt}$	Nível do reservatório r no estágio t (m)
$tl_{rt}$	Nível jusante do reservatório r no estágio t (m)
$pl_{jt}$	Perdas da tomada d'água da unidade j no estágio t (m)
$\eta_{jt}$	Eficiência global da unidade j no estágio t
$R$	Índice do reservatório
$J(r)$	Número de unidades do reservatório r
$K$	Índice da zona de operação
$ph^{min Max}_{jkt}$	Limites da potência gerada da unidade j no estágio t
$z_{jk}$	Variável de decisão discreta da unidade j no estágio t a zona k
$\Phi_j$	Conjunto de zonas de operação da unidade j
$rh_{rt}$	Reserva de energia da planta que pertence ao reservatório r no estágio t (MW)
$a_0 \dots a_4$	Coefficientes obtidos empiricamente para calcular o nível do reservatório. Este dado tem complexidade de ser estimado
$b_0 \dots b_4$	Coefficientes obtidos empiricamente para calcular a função de elevação do nível jusante
$C_j$	Constante que depende das características da tomada d'água da unidade, representada em ( $s^3 / m^5$ )
$\rho_{0j} \dots \rho_{5j}$	Coefficientes obtidos do diagrama de colina por meio da técnica de regressão não linear multivariável
$ph_{jk}^{min}$	Limites operativos da unidade j para a zona de operação k
$ph_{jk}^{max}$	Limites operativos da unidade j para a zona de operação k

De acordo com a notação, a função que descreve a saída de uma unidade hidrelétrica em MW é dada por (1),

$$ph_{jt} = g\eta_{jt}hl_{jt}q_{jt}. \quad (1)$$

A queda líquida ( $hl_{jt}$ ) pode ser calculada por meio de (2),

$$hl_{jt} = fb_{rt}(v_{rt}, v_{rt+1}) - tl_{rt}(Q_{rt}, S_{rt}) - pl_{jt}(Q_{rt}, q_{jt}) \quad (2)$$

Na Equação 02,  $fb_{rt}(v_{rt}, v_{rt+1})$  é a função de elevação do nível do reservatório que pode ser descrita em termos do seu armazenamento (em  $m^3$ ). Durante um estágio,  $fb_{rt}$  pode ser computado utilizando os volumes associados com o começo e fim de cada estágio. Esta função pode ser modelada utilizando (3),

$$fb_{rt}(\hat{X}_{rt}) = a_0 + a_1\hat{X}_{rt} + \dots + a_4\hat{X}_{rt}^4. \quad (3)$$

$a_0, a_1, \dots, a_4$  são coeficientes obtidos empiricamente e  $\hat{X}_{rt}$  representa o volume médio no estágio t. A função de elevação do nível jusante, que é dependente do total de vazão de água ( $d_{rt}$ ) liberada pela planta hidráulica é dada por (4),

$$tl_{rt}(d_{rt}) = b_0 + b_1d_{rt} + b_2d_{rt}^2 + \dots + b_4d_{rt}^4. \quad (4)$$

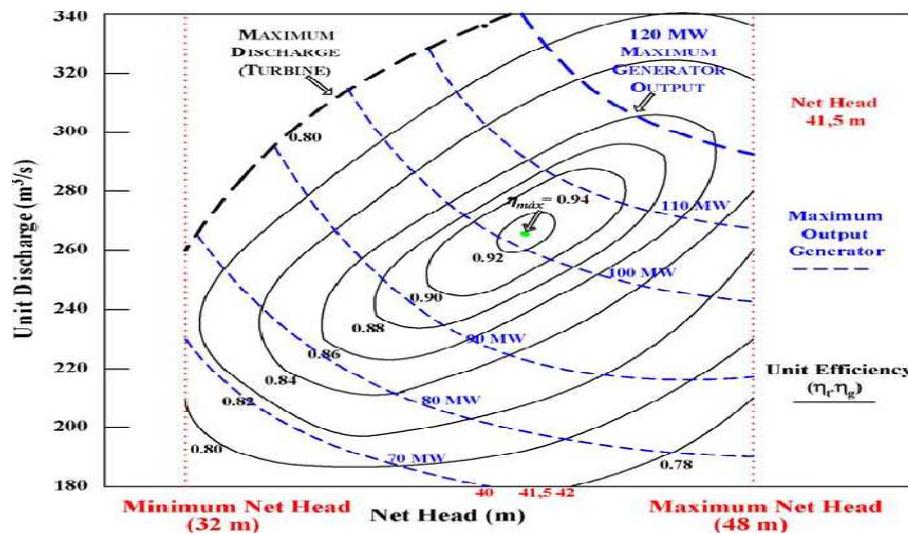
Os parâmetros  $b_0, \dots, b_4$  são coeficientes obtidos empiricamente. Já  $pl_{jt}(q_{jt})$ , que representa as perdas na tomada d'água é descrito de acordo com (5),

$$pl_{jt}(q_{jt}) = c_jq_{jt}^2. \quad (5)$$

A constante  $c_j$  depende das características da tomada d'água da unidade, representada em  $s^2/m^5$ . Embora Finardi (2005) tenha afirmado que a eficiência global de uma unidade de produção hidrelétrica pode ser computada como o produto das eficiências do gerador e turbina, esta abordagem não leva em consideração as perdas líquidas e o derramamento de água na turbina. A modelagem da eficiência de uma unidade de produção é descrita pela função quadrática (6),

$$\eta_{jt} = \rho_{0j} + \rho_{1j}q_{jt} + \rho_{2j}hl_{jt} + \rho_{3j}q_{jt}hl_{jt} + \rho_{4j}q_{jt}^2 + \rho_{5j}hl_{jt}^2. \quad (6)$$

Os parâmetros  $\rho_{0j}, \dots, \rho_{5j}$  são coeficientes obtidos do diagrama de colina por meio da técnica de regressão não-linear multivariável. Os coeficientes utilizados por Finardi (2005) foram retirados da curva de colina apresentada na Figura 2.



Fonte: Extraído Finardi (2005)  
 FIGURA 2 - CURVA DE COLINA - USINA ITAIPU

Os coeficientes retirados da curva de colina são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 - COEFICIENTES DE PRODUÇÃO

Production function coefficients			
	Unit 1	Unit 2	Unit 3
$p_{0j}$	0.1190	0.1384	0.2103
$p_{1j}$	0.0016	0.0018	0.0015
$p_{2j}$	$-2.124 \times 10^{-6}$	$-2.523 \times 10^{-6}$	$-2.011 \times 10^{-6}$
$p_{3j}$	$-2.428 \times 10^{-10}$	$-2.439 \times 10^{-10}$	$-3.415 \times 10^{-10}$
$p_{4j}$	$2.999 \times 10^{-13}$	$3.101 \times 10^{-13}$	$3.000 \times 10^{-13}$
$p_{5j}$	$2.189 \times 10^{-18}$	$2.295 \times 10^{-18}$	$2.315 \times 10^{-18}$
$p_{6j}$	$9.515 \times 10^{-23}$	$5.544 \times 10^{-23}$	$7.099 \times 10^{-23}$

Fonte: Finardi (2005)

Como as equações de cálculo de eficiência da turbina dependem diretamente da vazão e das quedas líquidas, a função de produção é simplificada como um polinômio de sétimo grau, levando em consideração somente esta variável e coeficientes associados aos seus termos apresentada em (7),

$$ph_j(q_j) = \rho_{0j}q_j + \rho_{1j}q_j^2 + \dots + \rho_{6j}q_j^7. \quad (7)$$

Estes coeficientes  $\rho_{0j} \dots \rho_{6j}$  são parâmetros dependentes de características operativas e são calculados por meio do diagrama de colina. De acordo com a modelagem, o objetivo da otimização seria maximizar as funções de produção, levando em conta todas as unidades geradoras conforme (8),

$$\text{Maximize } F = \sum_{j=1}^{J(r)} ph_j(q_j). \quad (8)$$

O balanço de vazão de água entre as unidades é estabelecido por meio da restrição apresentada a seguir. O parâmetro  $Q$  representa a vazão objetivo geral da planta hidrelétrica (9),

$$\sum_{j=1}^{J(r)} q_j = Q \quad (9)$$

As restrições de zonas operativas de produção de cada unidade de geração são apresentadas a seguir.

$$ph_{jk}^{\min} \sum_{k=1}^{\phi_j} Z_{jk} \leq ph_j(q)_j \leq ph_{jk}^{\max} \sum_{k=1}^{\phi_j} Z_{jk}$$

A restrição abaixo informa que cada unidade de geração possui somente uma zona de operação.

$$Z_{jk} \in \{0,1\}, \sum_{k=1}^{\phi_j} Z_{jk} \leq 1$$

Com base na modelagem de produção de potência apresentada em (7) e pela equação de somatório de vazão descrita em (8), Araujo (2010) propôs a seguinte função objetivo para eficiência de produção hidrelétrica,

$$\text{max}F = \frac{\sum_{j=1}^{J(r)} ph_j(q_j)}{\sum_{j=1}^{J(r)} q_j} \quad (10)$$

Sujeito a (11),

$$\sum_{j=1}^{J(r)} ph_j(q_j) = D \quad (11)$$

$$q_j \min \leq q_j \leq q_j \max$$

A função objetivo determina o quanto de energia a usina é capaz de produzir com um determinado volume de água. Maximizar a função significa produzir maior potência utilizando menor vazão de água. O numerador é a função de produção, à medida que o valor cresce a função objetivo aumenta seu valor. O denominador quando reduzido também aumenta o valor da razão de produtividade. A razão está sujeita a restrições de demanda operativa, ou seja, a soma de toda a produção das unidades geradoras deve ser igual ao valor de demanda solicitada a usina.

A produção deve respeitar os limites operativos das unidades geradoras apresentados pelas restrições da função objetivo. Tal modelo ainda será adaptado para a inclusão de perdas hidráulicas inerentes aos condutos forçados. Isto se faz necessário para se encontrar uma melhor eficiência produtiva.

#### 4. Computação Evolutiva

Computação Evolutiva, cujas pesquisas se iniciaram na década de 1950, trata de sistemas para resolução de problemas que utilizam modelos computacionais baseados na teoria da evolução natural (Back, 1996). Segundo Carvalho (2003), o agrupamento de tais sistemas podem ser caracterizados por:

- Algoritmos Genéticos (AG);
- Estratégias de evolução (EE);
- Programação Genética (PG).

Este trabalho aborda o uso de Algoritmos Genéticos como solução do problema proposto, pois o mesmo não é simples de se resolver com técnicas convencionais, pois as mesmas se baseiam em suposições irrealistas de linearidade e convexidade, o que não se enquadra para solução de um problema não-linear. Um AG é uma metaheurística de busca utilizada na ciência da computação para achar soluções aproximadas em problemas de otimização e busca. Algoritmos genéticos são uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e cruzamento (Goldberg, 1999). AG são implementados como uma simulação de computador em que uma população de representações abstratas de solução é selecionada em busca de soluções melhores. A evolução geralmente se inicia a partir de um conjunto de soluções criada aleatoriamente e é realizada por meio de gerações. A cada geração, a adaptação de cada solução na população é avaliada.

Alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração, e recombinados ou mutados para formar uma nova população. A nova população é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo. Este ciclo é executado até que se encontre soluções candidatas, que atendam o resultado esperado pela função objetivo implementada, o que é exemplificado pela Figura 3.

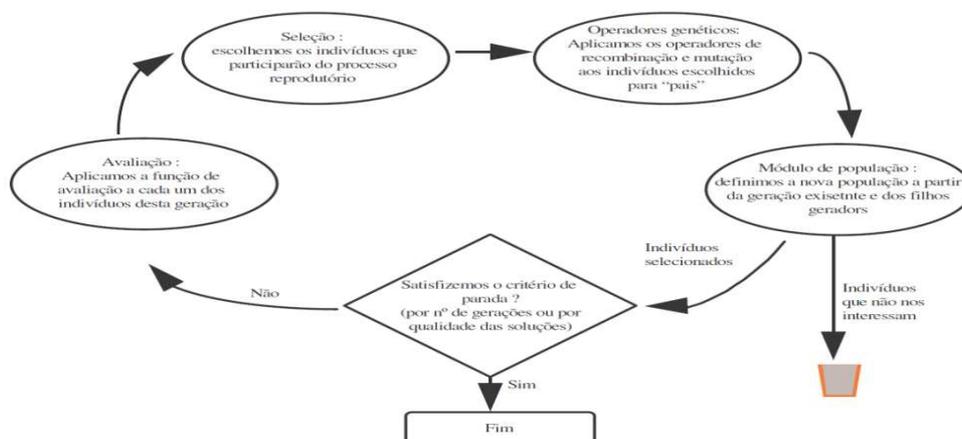
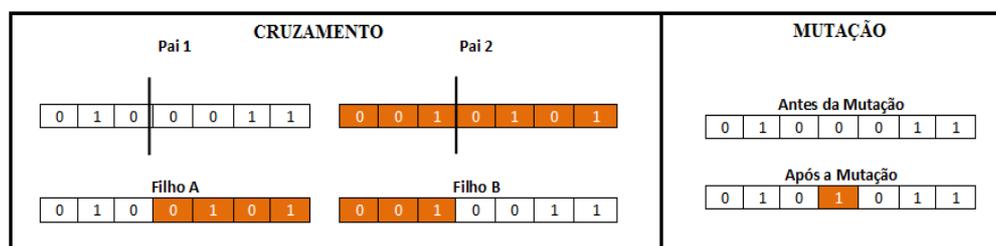


FIGURA 3 – ESQUEMA DE EXECUÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

É importante ressaltar que a representação de um cromossomo é fundamental para um algoritmo genético. A representação binária é a maneira básica de traduzir a informação do problema em uma maneira viável de tratamento pelo computador, porém muitas vezes não é a melhor opção. O AG apresentado neste trabalho simula uma população de vazão de água com representação de indivíduos binários. Cada indivíduo é uma vazão factível a ser entregue para cada unidade geradora, obedecendo às restrições do problema a fim de se gerar potência elétrica por meio de (7). A seleção do indivíduo mais apto é realizada usando roleta estocástica e elitismo. O critério de parada estabelecido foi o número de iterações (100). O AG implementado utiliza operador de cruzamento de ponto único e operador de mutação de troca de bit, conforme o exemplo da Figura 4.



Fonte: Adaptado Carvalho (2003)

FIGURA 4 – OPERADORES DE CRUZAMENTO E MUTAÇÃO

O algoritmo utilizou os seguintes parâmetros de inicialização:

- População de 100 indivíduos;
- Número de bits da codificação binária 16;
- Probabilidade de troca de bits 50%;

## 5. Estudo de Caso – Usina Hidrelétrica situada no sudeste brasileiro

Como estudo preliminar da solução de otimização, se fez necessária a obtenção dos parâmetros de inicialização, sendo assim é apresentada a seguir a análise feita da primeira remessa de dados fornecidos por uma usina hidrelétrica de médio porte situada no sudeste brasileiro. A usina concedeu uma massa de dados para análise do período de geração entre 12/07/11 à 11/08/11. Os dados contemplam um relatório geral de hidrologia e também o relatório individual de geração de cada uma das 06 unidades geradoras. A seguir são apresentados os dados tratados, do período de 28/07/11 a 11/08/11 por ter sido considerado o período mais estável de geração, com medidas de média de desvio padrão de cada parâmetro. Os dados foram coletados do servidor de banco de dados pertencente à usina. Como análise preliminar, os pontos a seguir foram considerados relevantes.

### 5.1 Vazão Turbinada

Desvio padrão da vazão está alto em todas as unidades de geração, ou seja, as vazões (hora em hora) se alteram bastante ao longo do dia e período, em torno de 5% em relação à média. Em termos de mínimos e máximos identificou-se vazão mínima de 94 m<sup>3</sup>/s e máxima de 150 m<sup>3</sup>/s.

## 5.2 Potência Ativa

O desvio padrão da potência está pequeno (em 3,5MW) em relação à média e a potência (MW) está variando entre 40MW e 65MW, o que está relevante, pois obedecem os limites operativos de produção (35-66MW).

## 5.3 Demanda Média do período

No período, a demanda de geração média da usina foi de 320 MW. Conclui-se que nesse período a usina teve uma grande demanda de geração. Este fenômeno é constante, pois a mesma é uma usina base da concessionária de energia, que tem como característica manter geralmente sua demanda produtiva no limite máximo operativo.

## 5.4 Parâmetros preliminares

Os dados até então apresentados não puderam ser usados como parâmetros de entrada, pois os mesmos não são dados de medição real da usina. Trata-se de dados calculados pelo sistema de controle que os arredonda automaticamente. Assim, para teste do Algoritmo Genético, foram inseridos os seguintes parâmetros reais da usina:

- Demanda por hora ao longo do dia: 320MW.
- Limites operativos dos conjuntos turbina-gerador: 35MW à 66MW.

Os coeficientes de operação informados em na seção 3 (Tabela 2) também foram inseridos como entrada no algoritmo.

## 5.6 Experimentos

A seguir são apresentados os resultados preliminares do experimento realizado com os parâmetros descritos. Com demanda única de 320MW para um período de 05 horas, o algoritmo convergiu dentro dos parâmetros de erro permitidos, não oscilando mais que 0,35MW da demanda informada como pode ser observado pela Figura 5.

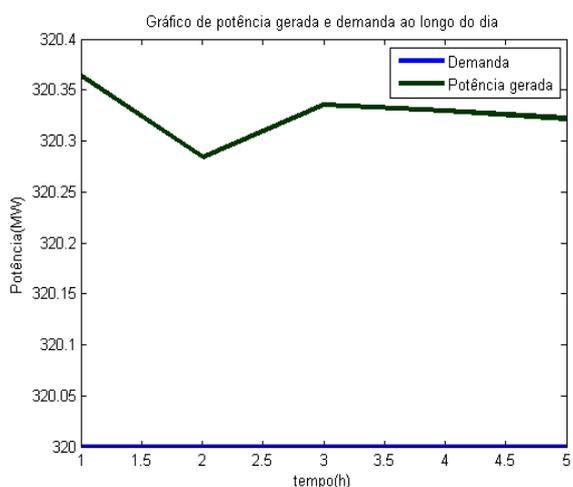


FIGURA 5 – GRÁFICO DE POTÊNCIA GERADA

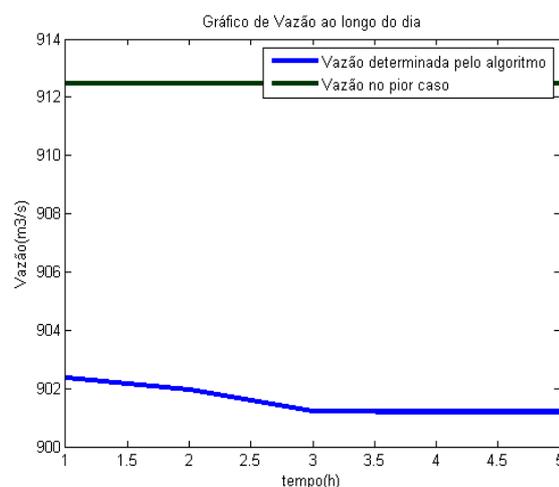


FIGURA 6 – GRÁFICO DE GRÁFICO DE VAZÃO

Pode-se notar na Figura 6, que a quantidade de vazão necessária para o sistema composto por 06 unidades geradoras foi de 902 m<sup>3</sup>/s, enquanto a vazão no pior caso foi de aproximadamente 912m<sup>3</sup>/s. Embora os coeficientes utilizados não caracterizarem as máquinas desta usina específica, houve economia de água neste experimento. As unidades conseguiram entregar a demanda solicitada, sem que nenhuma desligasse. É interessante perceber (vide Figura 7(a)), que o algoritmo cumpriu com a demanda de operação eficiente da usina, com a manutenção de demandas distintas no período para cada unidade geradora. Isto mostra que é possível obter uma demanda solicitada de modo eficiente, com economia de água, sem a necessidade de dividir a produção igualmente pelas unidades da usina.

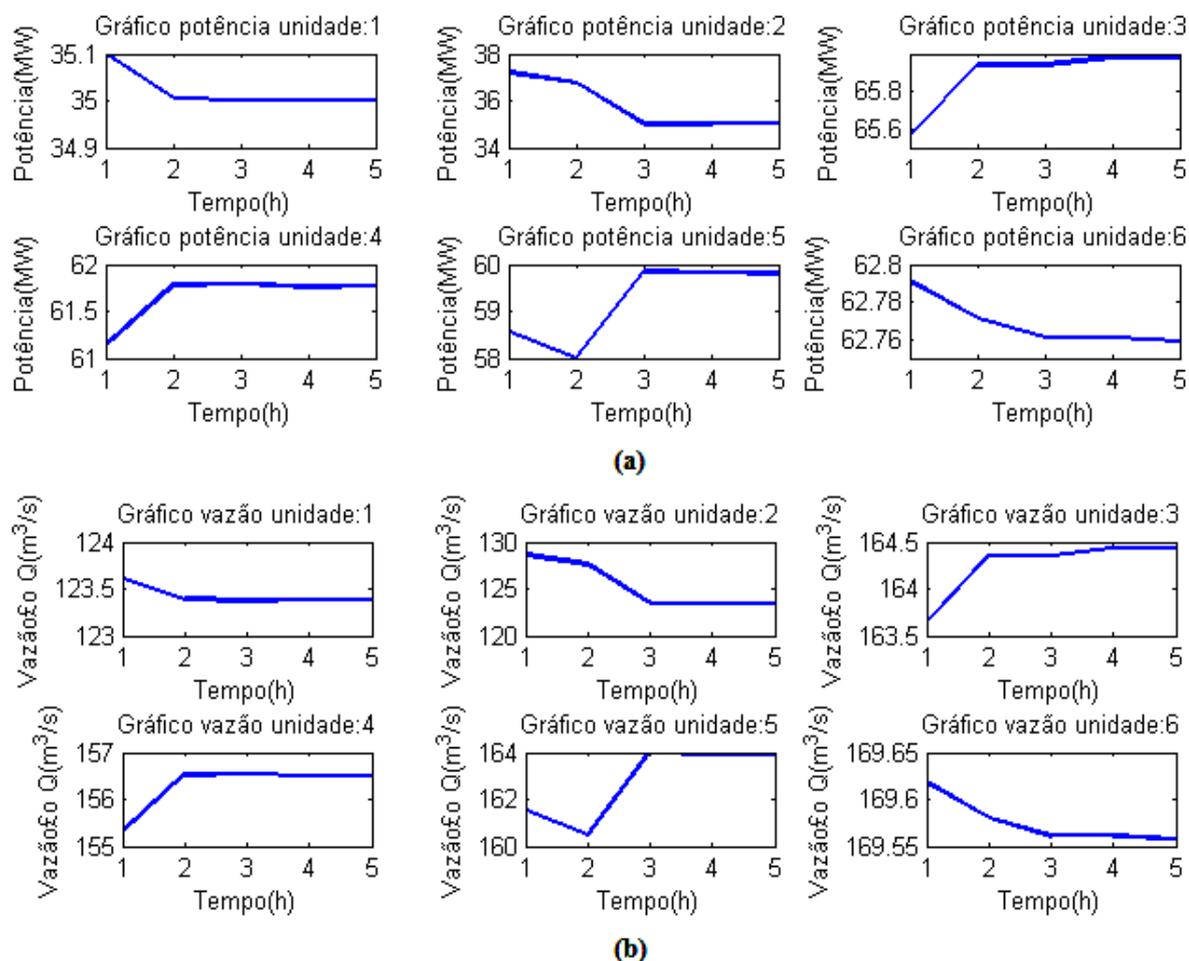


FIGURA 7 – GRÁFICO DE POTÊNCIA E VAZÃO POR UNIDADE GERADORA

A Figura 7(b) apresenta o gráfico de vazão unitário. Os gráficos comprovam que o algoritmo estipulou vazões pouco além das utilizadas na realidade, pelo fato do uso de coeficientes operativos não pertencentes à usina de estudo. Este fato faz com que a necessidade da técnica estatística, de regressão não-linear multivariável, seja realizada para que tal usina seja plenamente caracterizada. O tempo de execução do algoritmo é de 7,6 minutos para 05 horas de geração. Num primeiro momento, este tempo atende as necessidades de simulação, porém o mesmo pode ser minimizado ao realizar cruzamento e mutação com outros tipos de operadores. Em termos gerais o uso Computação Evolutiva foi satisfatório indicando uma boa solução para o problema descrito.

## 6 Conclusões

De posse dos resultados experimentais do estudo proposto, pôde-se constatar que o algoritmo evolutivo convergiu para um resultado satisfatório, uma vez que não utilizou os coeficientes operativos dos conjuntos turbina-gerador específicos da usina estudada. O modelo matemático apresentado simula o ambiente produtivo de uma usina hidrelétrica, do ponto de vista do despacho de unidades de geração.

Buscando o aperfeiçoamento de tal modelo, estudos relacionados a perdas hidráulicas estão em andamento. Acredita-se que ao incluir as perdas hidráulicas dos condutos forçados considerando suas dimensões de engenharia, serão encontrados melhores resultados. Para tanto será necessária a substituição da função de produção de potência unitária e das funções empíricas aqui citadas para cálculo de perdas e obtenção do parâmetro queda líquida, bem como a função de cálculo do parâmetro rendimento. Tais cálculos estão implícitos nos coeficientes operativos, uma vez que potência é gerada simplificadamente, apenas em função da vazão e dos coeficientes, como informado pela abordagem disposta no texto deste.

A mudança da função de potência irá alterar fortemente o modelo matemático apresentado neste trabalho, contribuindo para uma melhor solução do problema de despacho ótimo. Também está em andamento à realização de estudos com relação à técnica estatística de regressão não-linear múltivariável para que sejam extraídos da curva de colina da usina os coeficientes operativos das unidades geradoras.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o CEFET-MG, a CEMIG e a ORTENG pela possibilidade de desenvolvimento deste projeto e ao apoio para a publicação deste trabalho.

## Referências

- Araújo, R. (2010). Modelagem e Otimização hidrelétrica da energia: uma abordagem com emprego de sistemas inteligentes. CEFETMG. Belo Horizonte. Dissertação de mestrado.
- Back, T. (1996). Evolutionary Algorithms in Theory and Practice. Oxford University press.
- Baños, R. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. ELSEVIER, In: Renewable and Sustainable Energy Reviews V.15.
- Carvalho, A.(2003). Computação Evolutiva. In Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações. Ed. Manole. 1ª edição. Capítulo 9. São Paulo.
- Finardi, E. C. (2005). Unit commitment of single hydroelectric plant. Electric Power System Research, v. 75, p. 116–123.
- França, T. (2010). Um modelo de unit commitment para sistemas hidrotérmicos resolvido por método Híbrido baseado em Algoritmos Genéticos e Métodos de Pontos Interiores. Anais de Congresso, In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática .

- Goldberg, D.E. (1999). The compact Genetic algorithm. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.3, nº4.
- Iatipú. (2012) . Itaipú Binacional. In: <http://www.itaipu.gov.br/>. Acesso em 24/07/12.
- Konar, A. (2005). Computational Intelligence: Principles, Techniques and Applications. Calcutta: Springer.
- Pezzini, P. (2011). Optimization techniques to improve energy efficiency in power systems. ELSEVIER In: Renewable and Sustainable Energy Reviews V.15.
- Tolmasquim, M.T. (2011). Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia, Brasil.
- Villasanti, C. (2004). Dispatch of hydroelectric generating units using multiobjective evolutionary algorithms. In: Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE/PES