

# Algoritmos Genéticos aplicado à Geração de Energia Elétrica

Patrícia Teixeira Leite Asano  
Reinaldo Fugitaro Otobe Junior  
Thiago Ribeiro de Alencar

CECS – Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências  
Sociais Aplicadas  
Fundação Universidade Federal do ABC (UFABC)  
Santo André, Brasil

Jacyro Gramulia Junior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São  
Paulo (IFSP)  
São Paulo, Brasil  
[jacyrogramulia@gmail.com](mailto:jacyrogramulia@gmail.com)  
[rei.fugitaro@gmail.com](mailto:rei.fugitaro@gmail.com)  
[patricia.leite@ufabc.edu.br](mailto:patricia.leite@ufabc.edu.br)

**Resumo—** *O objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta computacional que permite controlar a transferência de água bruta entre rios ou bacias hidrográficas, otimizando o volume transferido para que não prejudiquem os ecossistemas, as atividades e utilizações da região doadora de água e atendam as necessidades da região receptora de água, incluindo seus próprios ecossistemas, priorizando num primeiro momento, a geração de energia elétrica. Vale destacar que a transferência de água se associada à produtividade das hidroelétricas podem contribuir, significativamente, para a otimização da produção de energia elétrica diminuindo a utilização das usinas térmicas de custos operativos elevados e enormes restrições ambientais. Sendo assim, a transferência de água entre regiões é uma estratégia que permite um ganho de armazenagem em reservatórios subutilizados em suas capacidades máximas de estocagem. Portanto, neste artigo será apresentado um novo operador genético, para o controle das vazões e volumes a serem transferidos, implementado em uma ferramenta computacional, denominada HIDRO-IA, com o emprego de algoritmos genéticos, que é uma técnica consolidada para otimização de problemas de grande porte. Pode-se observar no caso teste realizado que a transferência de água foi feita de forma controlada e otimizada, permitindo o uso adequado do recurso hídrico disponível. O resultado apresentado levanta a hipótese de se utilizar o ganho com a geração de energia elétrica para tratamento de água em algumas bacias poluídas de forma a trazer diversos benefícios para a sociedade que não seja apenas a produção de eletricidade, mas também, a disponibilização de água para abastecimento público.*

**Palavras-chave—** *Geração de Energia Elétrica, Planejamento Energético, Transposição, Algoritmos Genéticos, Operação, Otimização, Transferência de Água entre Bacias*

## I. INTRODUÇÃO

Sob o ponto de vista de abastecimento público a transferência de água se tornou uma necessidade e caso consagrado para atendimento da demanda por água nos grandes centros. Do ponto de vista energético, o aproveitamento da transferência para geração de energia elétrica tem sido pouco explorada, pois a prioridade tem se restringido ao aproveitamento do fluxo natural dos rios. As técnicas disponíveis para otimização do Planejamento da

Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência – POSHP não levam em consideração a transferência de água e, conseqüentemente, os programas simuladores e otimizadores não estão preparados para contemplar esta possibilidade para melhoria da produção de energia elétrica, nem mesmo uma possível comparação com a técnica proposta. Nas questões que envolvem o multiuso das águas, as duas situações não são concorrentes entre si, podendo-se, perfeitamente, através de gerenciamento operativo, encontrar boa solução para utilização para cada aplicação [1] – [2].

Do ponto de vista ambiental, a transferência de água provoca impactos ambientais tanto na bacia doadora quanto na bacia receptora. Como principais fatores impactantes na bacia doadora pode ser citado o comprometimento da qualidade da água provocado pela redução da capacidade de diluição, possibilidade de indisponibilidade hídrica e mudanças hidrológicas sazonais [3]. Na bacia receptora, os principais fatores de impacto estão relacionados com a importação da fauna e da flora exógena, transporte de nutrientes, erosão, salinidade das águas no semiárido. Ainda, de acordo com [3], o desequilíbrio das disponibilidades hídricas entre as regiões hidrográficas e suas respectivas necessidades constitui um dos principais problemas de alocação e distribuição de água.

Portanto, o desenvolvimento deste projeto de pesquisa propôs o aprimoramento na ferramenta computacional baseada em algoritmo genético, denominada HIDRO-IA [4], que permitirá o gerenciamento do sistema de produção de energia elétrica, controlando de forma ótima a transferência de água entre rios ou bacias hidrográficas, para atendimento da demanda do sistema de forma confiável, buscando o menor impacto ambiental para a sociedade.

## II. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O problema do POSHP pode ser formulado através de um modelo de otimização da minimização do custo ( $J$ ) do planejamento da operação do sistema representado por (1) [4]-[5]. Também adota-se o não atendimento da demanda pela geração hidráulica através de uma térmica fictícia global ( $CT$ ),

que possui um valor de conversão monetária ( $r$ ). O valor de conversão monetária ( $r$ ) é igual a 0,21 \$/MW<sup>2</sup> [6]. Além disto, adota-se uma formulação que contempla uma taxa de desconto ( $i$ ) capaz de valorar essa complementação térmica ao longo do período de planejamento.

$$J = r \cdot \sum_{\text{mês}=0}^N \frac{[CT(\text{mês})]^2}{(1+i)^{\text{mês}/12}} \quad (1)$$

Sendo assim, a demanda ( $D$ ) deve ser atendida pela geração hidráulica ( $GH$ ) e o não atendimento desta demanda será representado por  $CT$  conforme mostrado em (2a) e (2b).

$$CT(\text{mês}) = D(\text{mês}) - GH(\text{mês}), \text{ para } D(\text{mês}) \geq GH(\text{mês}) \quad (2a)$$

$$CT(\text{mês}) = 0, \text{ para } D(\text{mês}) \leq GH(\text{mês}) \quad (2b)$$

A geração hidroelétrica total  $GH$  (mês) em MW é calculada pelo somatório das gerações de todas as usinas hidroelétricas, conforme apresentado em (3). Para a usina  $i$ , tem-se que  $\Phi_i(\cdot)$  é a função de geração da hidroelétrica,  $x_i(\cdot)$  volume do reservatório [hm<sup>3</sup>],  $q_i(\cdot)$  vazão turbinada [m<sup>3</sup>/s] e  $z_i(\cdot)$  vazão vertida [m<sup>3</sup>/s], além disso,  $N$  é o número de usinas hidroelétricas do caso teste em análise.

$$GH(\text{mês}) = \sum_{i=1}^N \Phi_i[x_i(\text{mês}), q_i(\text{mês}), z_i(\text{mês})] \quad (3)$$

A função de geração hidráulica para uma usina qualquer é dada em (4).

$$\Phi_i(x_i, q_i, z_i) = K_i [h_{1,i}(x_i) - h_{2,i}(q_i + z_i)] \cdot q_i \quad (4)$$

onde,

$K_i$  = constante que engloba aceleração da gravidade, densidade da água, rendimento turbina-gerador e fatores de conversão;

$q_i(\cdot)$  = vazão turbinada pela usina [m<sup>3</sup>/s];

$h1(\cdot)$  = Polinômio cota x volume (altura de montante, função do volume do reservatório);

$h2(\cdot)$  = Polinômio vazão defluida x cota (altura de jusante, função das vazões turbinada e vertida).

A equação de balanço da água, que relaciona os estados dos reservatórios ao longo do tempo, é dada por (5).

$$u_i(\text{mês}) = x_i(\text{mês}) - x_i(\text{mês}+1) + [y_i(\text{mês})] \cdot f_c + \sum_{k \in \Omega_i} u_k(\text{mês}) \quad (5)$$

A vazão incremental  $y_i(\text{mês})$  é calculada em (6).

$$y_i(\text{mês}) = y_{n,i}(\text{mês}) - \sum_{k \in \Omega_i} y_{n,k}(\text{mês}) \quad (6)$$

onde,

$y_{n,i}(\cdot)$  = vazão natural da usina  $i$  [m<sup>3</sup>/s].

$y_{n,k}(\cdot)$  = vazão natural da usina  $k$ . [m<sup>3</sup>/s].

$y_i(\cdot)$  = vazão incremental no reservatório  $i$  [m<sup>3</sup>/s].

$\Omega_i$  = Conjunto de todas as usinas imediatamente a montante da usina  $i$ .

Porém, a vazão turbinada possui um limitante superior chamado engolimento máximo ( $q_{max}$ ), de acordo com as características das usinas hidroelétricas. A vazão defluida ( $u$ ) é a soma da vazão turbinada e vertida. Na modelagem utilizada, considerou-se que o vertimento ocorre apenas quando a vazão defluida é maior que o engolimento máximo, conforme apresentado em (7a) e em (7b).

$$u_i(\text{mês}) = q_i(\text{mês}) \quad \text{se } u_i(\text{mês}) \leq q_{\max,i}(\text{mês}) \quad (7a)$$

$$u_i(\text{mês}) = q_i(\text{mês}) + z_i(\text{mês}) \quad \text{se } u_i(\text{mês}) > q_{\max,i}(\text{mês}) \quad (7b)$$

Portanto, a vazão vertida pode ser calculada através de (8a) e (8b).

$$z_i(\text{mês}) = 0 \quad \text{se } u_i(\text{mês}) \leq q_{\max,i} \quad (8a)$$

$$z_i(\text{mês}) = u_i(\text{mês}) - q_{\max,i} \quad \text{se } u_i > q_{\max,i} \quad (8b)$$

Finalmente, as restrições operativas são dadas em (9), (10) e (11).

$$x_{\min,i}(\text{mês}) \leq x_i(\text{mês}) \leq x_{\max,i}(\text{mês}) \quad (9)$$

$$q_{\min,i}(\text{mês}) \leq q_i(\text{mês}) \leq q_{\max,i}(\text{mês}) \quad (10)$$

$$CT(\text{mês}) \geq 0 \quad (11)$$

O volume inicial e o estado final foram fixados em 100% do volume do reservatório. Esta consideração foi aplicada nos trabalhos de [7]-[11].

Para a avaliação da transferência de água entre bacias hidrográficas no planejamento energético, faz-se necessário a introdução de modificações em (8b) de forma a encontrar as quantidades adequadas de água a ser transferida mantendo a otimização do sistema como um todo para minimização dos custos no período de planejamento [12]. Sendo assim, a ferramenta computacional proposta utilizou em sua formulação matemática as equações a seguir:

$$y_{a,i}(\text{mês}) = y_i(\text{mês}) - y_{t,i}(\text{mês}) \quad (12)$$

$$y_{t,i}(\text{mês}) = \tau \cdot y_{n,i}(\text{mês}) \quad (13)$$

Substituindo (13) em (12), vem:

### III. ALGORITMO PROPOSTO

$$y_{a,i}(\text{mês}) = y_i(\text{mês}) - \tau \cdot y_{n,i}(\text{mês}) \quad (14)$$

$$y_{a,i}(\text{mês}) = (1 - \tau) \cdot y_{n,i}(\text{mês}) \quad (15)$$

Onde:

$y_{n,i}$  (*mês*) = vazão natural da usina i no mês.

$y_{a,i}$  (*mês*) = vazão artificial da usina i no mês.

$y_{t,i}$  (*mês*) = vazão de transposição da usina i no mês.

$\tau$  = valor da transposição (retirada) da usina i no mês.

Para a o reservatório da usina doadora, a vazão incremental após a transferência fica:

$$y_i(\text{mês}) = (1 - \tau) \cdot y_{n,i}(\text{mês}) - \sum_{k \in \Omega_i} y_{n,k}(\text{mês}) \quad (16)$$

Onde:

$y_i$  (*mês*) = vazão incremental da usina i no mês

$y_{n,k}$  (*mês*) = vazão natural da usina k no mês.

$\Omega$  = conjunto de usinas imediatamente a montante da usina i, em análise.

Para as usinas a jusante da usina doadora, as vazões incrementais ficam:

$$y_i(\text{mês}) = y_{j,i}(\text{mês}) - (\tau) \cdot y_{n,i}(\text{mês}) - \sum_{k \in \Omega_i} y_{n,k}(\text{mês}) \quad (17)$$

$$y_{a,i}(\text{mês}) = y_{n,j}(\text{mês}) - (\tau) \cdot y_{n,i}(\text{mês}) \quad (18)$$

Onde:

$y_j$  (*mês*) = vazão incremental da usina j no mês.

$y_{n,j}$  (*mês*) = vazão natural da usina j no mês.

$y_{a,j}$  (*mês*) = vazão artificial da usina j no mês.

O valor de quantidade adequada de água a ser transferida “ $\tau$ ” será definido aplicando o equacionamento implementado na ferramenta computacional desenvolvida para controle da transferência, levando-se em consideração todas as restrições de volume e vazões necessárias à manutenção e preservação da continuidade das atividades das bacias doadoras e receptoras.

Em outras palavras nessa ferramenta proposta (HIDRO-IA), além dos operadores genéticos desenvolvidos [4], [10], [13], [16] foi implementado um operador denominado: “Mutação Transferência de água” que em conjunto com os demais operadores de otimiza o da ferramenta, identificarão a situa o de menor custo de complementa o térmica no período de planejamento energético, transferindo a água, sempre que possível, para disponibilizá-la a montante da usina hidrelétrica que tenha maior produtividade, e consequentemente fazendo melhor uso da  gua.

Uma vez adotada a técnica de Inteligência Artificial, com o emprego de Algoritmos Genéticos (AGs), que fará a otimiza o do problema, faz-se necessário encontrar uma metodologia para descrever às características do problema apontado ao algoritmo. Finalizada esta etapa de adapta o do problema aos AGs começou-se a implementar operadores genéticos com o objetivo de melhorar o desempenho da ferramenta [4] e [10].

Devido   complexidade do problema do POSHP, sua codifica o tem que ser representativa para se adequar às características individuais das usinas consideradas no sistema teste. Por sua vez, cada usina selecionada possui suas características construtivas e operativas individuais, ou seja, operam de forma individual. Portanto, os vetores de volume e vazão afluyente dos reservatórios das usinas selecionadas para realizar o planejamento da opera o representam para a ferramenta computacional desenvolvida o indivíduo, enquanto os volumes e vazão, em hm<sup>3</sup>, do reservatório de cada mês do período de planejamento adotado representam os genes.

Para o melhor entendimento da ferramenta computacional desenvolvida será apresentada a seguir uma breve descri o do algoritmo proposto.

**Codifica o do problema:** para uma melhor representa o do problema, adotaram-se valores reais, e o indivíduo representar  o volume e a vazão afluyente natural das usinas em cada mês do período de planejamento.

**Popula o inicial:**   formada por 24 indivíduos, sendo que cada indivíduo   composto por dois vetores, sendo um vetor com volume máximo do reservatório e o outro vetor com as vazões afluentes natural da usina selecionada para o caso teste [4], [10], [14].

**Fun o de avalia o:** ou fun o de custo, está relacionada   minimiza o ou maximiza o do valor esperado da fun o objetivo do problema, conforme representado por (1), em conjunto com a adapta o do indivíduo, onde a cada restri o operativa do problema satisfeita, definidas na formula o matemática, através de (9) e (10),   dado ao indivíduo um ponto para valorizar sua adapta o na gera o [4].

**Sele o:** após a popula o ser ordenada do maior para o menor custo, de acordo com a fun o de avalia o,   feita a sele o pelo método da roleta ponderada para determinar em quais e em quantos indivíduos serão aplicados os diversos tipos de operadores genéticos utilizados. [15]

**Operadores genéticos:** neste trabalho foram utilizados os seguintes operadores genéticos com a distribui o apresentada na Tabela 1; elitismo, cruzamento uniforme, cruzamento médio, muta o suave, muta o direcionada, muta o fio d água, muta o gradiente, muta o local, novo indivíduo, muta o direcionada e muta o gradiente direcionado. Esses operadores são detalhadamente descritos em [4] e [10]. E para atender a proposta de gerenciar a transferência de água bruta entre rios ou bacias hidrográficas foi implementado o operador

“Mutação Transferência de água”, conforme descri o a seguir.

**Operador genético – Muta o Transferência de água:** através de vários estudos foi necessário conhecer às características do comportamento ótimo das usinas em uma cascata, para que se possa aplicar o operador proposto em um local que seja construtivamente viável, conforme modelado nas (12), (13), (14), (15), (16), (17) e (18), o que conseqüentemente validaria a proposta desenvolvida, como mostrado pelo algoritmo da Figura 1.

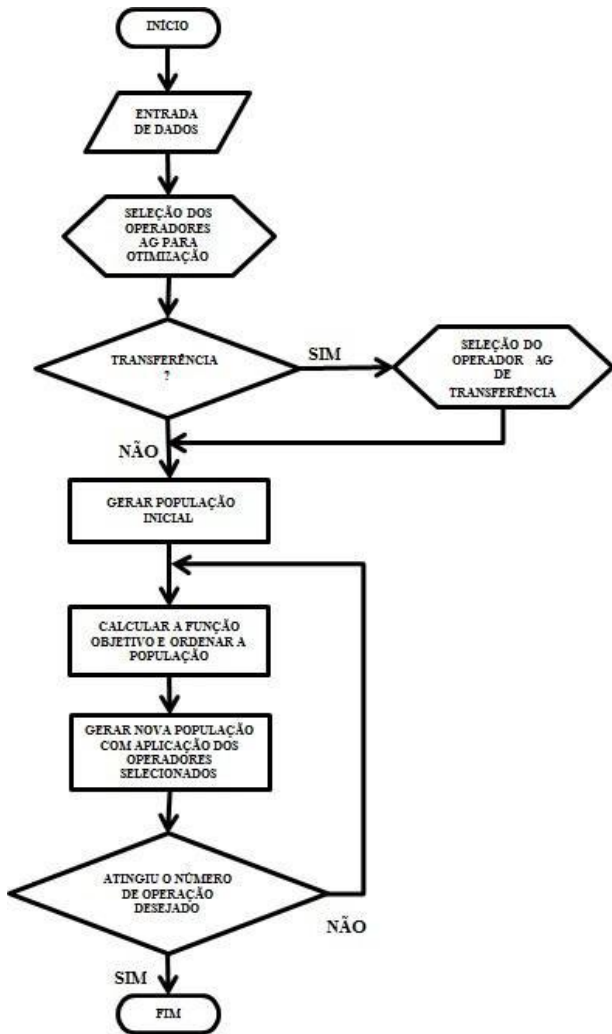


Fig. 1– Algoritmo Propostos

E, para a cria o de novas gera es, foi utilizada a configura o para os operadores genéticos conforme apresentado na Tabela I, onde cada indivíduo da nova popula o será criado através da aplica o dos operadores genéticos. Por exemplo, na nova popula o um indivíduo será criado por elitismo, dois serão criados por cruzamento uniforme e assim sucessivamente até completar o tamanho da popula o definido no arquivo de entrada. Neste caso teste foi adotada uma popula o composta por 24 indivíduos conforme determinado em [15].

**TABELA I - DISTRIBUI O DE OPERADORES GENÉTICOS NA POPULA O PARA O EXEMPLO**

TIPO DE OPERADOR	QUANTIDADE
Elitismo	1
Cruzamento uniforme	2
Cruzamento uniforme + muta�o suave	2
Cruzamento m�dio	2
Cruzamento m�dio + muta�o suave	2
Muta�o direcionada	4
Muta�o gradiente	2
Muta�o fio d’�gua	2
Muta�o local gradiente	2
Muta�o suave	3
<b>Muta�o Transfer�ncia</b>	<b>2</b>
<b>Tamanho da Popula�o</b>	<b>24</b>

#### IV. CASO TESTE

O caso teste desenvolvido compreende as usinas hidrelétricas de Ilha Solteira, Barra Bonita, Promissão, Três Irmãos, Porto Primavera e Itaip  (adotando características construtivas que a definem como usinas a reservatório) e Bariri, Ibitinga, Nova Avanhandava, Jupit  e Henry Borden (usinas a fio d’água), todas pertencentes ao Sistema Sudeste Brasileiro e perfazendo neste caso teste, 11 usinas envolvidas.

A Figura 2   um diagrama esquemático das usinas envolvidas no caso teste realizado.

Com objetivo de avaliar o aproveitamento da produ o de energia elétrica na usina Henry Borden realizou-se o caso teste para verificar se a retirada de água, a ser transferida para utiliza o nesta usina, não prejudicaria a produ o de energia elétrica na cadeia de usinas dos Rios Tietê e Paraná, e se não dificultaria a recupera o do armazenamento de água nos reservatórios de acumula o das usinas envolvidas no caso teste.

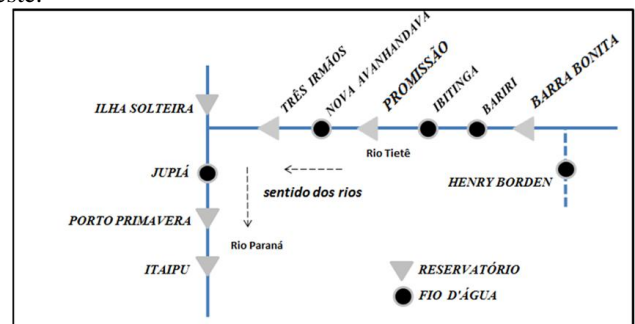


Fig. 2– Diagrama esquemático das usinas envolvidas

Para o planejamento e controle de sistemas hidrotérmicos de potência, foi utilizado um horizonte de planejamento de dois anos, com discretiza o mensal de seus intervalos, adotando-se o m s de maio, início do período de seca, como referência das condi es dos reservatórios de acumula o em

cada ano da otimização. O mercado de energia elétrica foi considerado constante e igual à capacidade instalada do sistema hidroelétrico e a taxa nominal de juros para o cálculo do valor presente no otimizador foi de 8% ao ano.

Além disso, na configuração do HIDRO-IA, foram utilizadas vazões afluentes naturais iguais à 80 % da MLT (Média de Longo Termo), com volumes inicial e final em 100% do volume útil.

As curvas de volumes definidas, sem e com a aplicação do operador de transferência são mostradas nas Figuras 3(a) e 3(b), respectivamente. Pode-se observar que mesmo em um sistema bastante complexo, o aprimoramento proposto no HIDRO-IA também manteve as características operativas das usinas. Por exemplo, as usinas de Ilha Solteira, Barra Bonita, Promissão, Três Irmãos e Porto Primavera se encarregam da regulação do sistema, oscilando os seus volumes. E mesmo no caso de Itaipu, que foi adotada como usina a reservatório, manteve o seu volume a 100% para melhor aproveitamento da produção de energia elétrica, uma vez que está localizada no final da cascata.

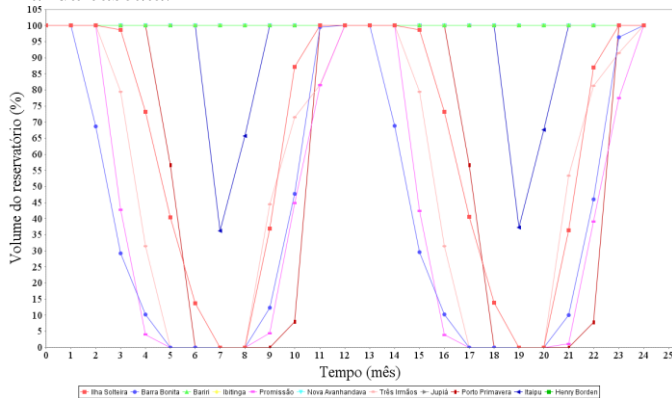


Fig. 3(a) – Volumes úteis das usinas sem operador transferência

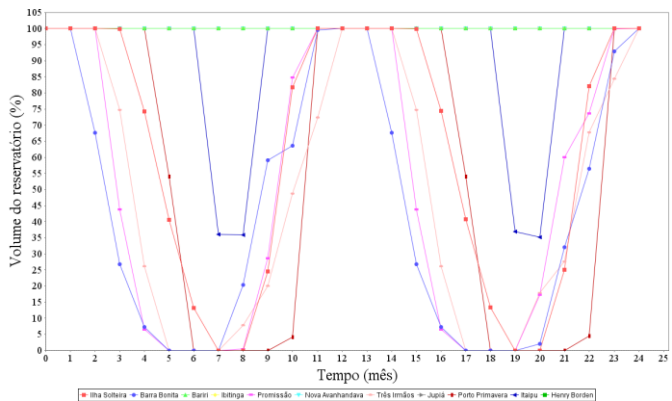


Fig. 3(b) – Volumes úteis das usinas com operador transferência

No caso das usinas de Bariri, Ibatinga, Nova Avanhandava, Jupia e Henry Borden, como era de se esperar, seus reservatórios permaneceram com 100% do volume útil, ou seja, não variaram seus volumes.

Como mostrado nas Figuras 4(a) e 4(b), a geração hidráulica total do sistema, sem e com o operador

transferência, repetiu-se no segundo ano devido à utilização da MLT, confirmando o bom desempenho do operador proposto.

Pode-se observar que a complementação térmica obtida com e sem a inclusão do operador encarregado de realizar transferência é quase constante ao longo do período de planejamento, indicando um custo de operação menor, pois este custo é dado por uma função com crescimento exponencial, conforme visto por (1). Portanto, quanto mais uniforme a complementação térmica, menor o seu valor.

Para melhor entendimento, a Figura 5 representa os resultados obtidos no caso teste realizado, com relação à demanda, produção hidráulica e a complementação térmica nos 12 primeiros meses do período de planejamento.

No caso teste, houve um ganho no sistema de aproximadamente 400MW por mês, gerado por fontes hidroelétricas.

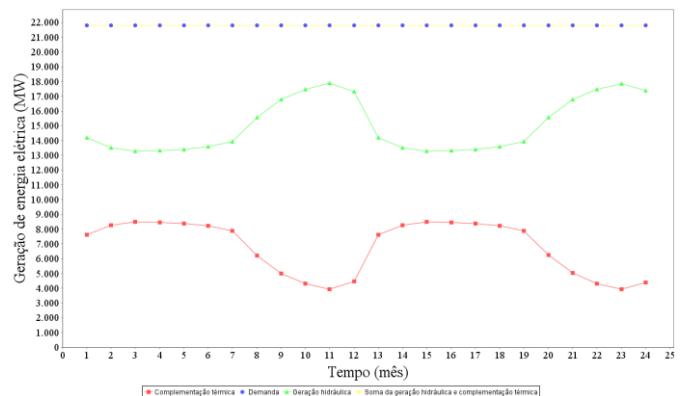


Fig. 4(a) – Complementação térmica do sistema sem operador transferência

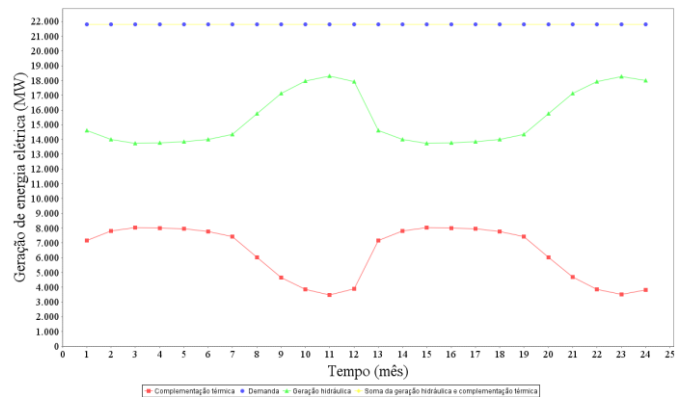


Fig. 4 (b) – Complementação térmica do sistema com operador transferência

Período de Planejamento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>11 USINAS SEM TRANSFERÊNCIA</b>												
Demanda [MW]	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793
Produção Hidráulica [MW]	14179	13528	13280	13331	13405	13576	13915	15559	16790	17485	17874	17331
Complementação Térmica [MW]	7614	8265	8513	8462	8388	8217	7878	6234	5003	4308	3919	4462
<b>11 USINAS COM TRANSFERÊNCIA</b>												
Demanda [MW]	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793	21793
Produção Hidráulica [MW]	14614	13997	13750	13788	13847	14015	14348	15769	17127	17949	18302	17905
Complementação Térmica [MW]	7179	7796	8043	8005	7946	7778	7445	6024	4666	3844	3491	3888

Fig. 5 – Resultados obtidos no caso teste sem e com transferência

Observa-se ainda que nas Figuras 6(a) e 6(b) que o operador de mutação transferência determinou ao longo do período de planejamento a quantidade de água ótima a ser

transferida de Barra Bonita para Henry Borden. Vale reiterar que a mesma operação se repetiu no segundo ano atestando, assim, a validade desta proposta de pesquisa. Mesmo com a introdução do operador de transferência de água, o HIDRO-IA continuou captando sem dificuldade as características de operação das usinas, definindo um cronograma de operação ótimo no período de planejamento, com a recuperação do volume útil dos reservatórios e diminuição da complementação térmica necessária para atendimento da demanda.

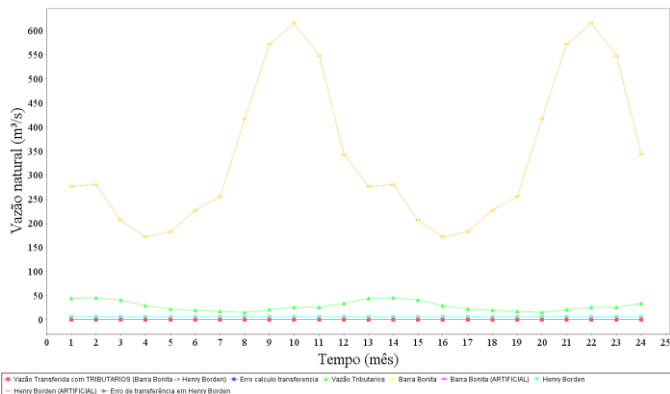


Fig. 6(a) - Afluências das usinas doadora e receptora sem operador transferência

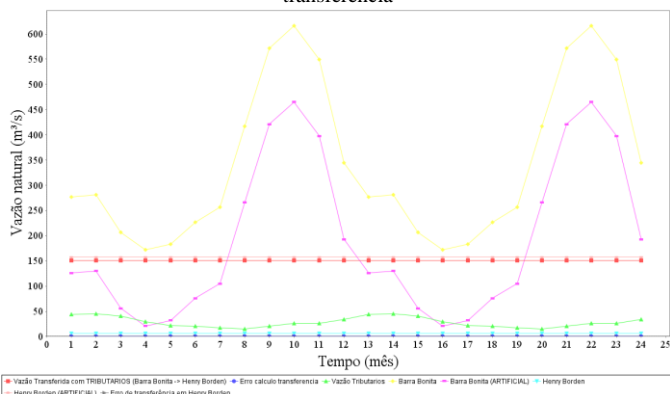


Fig. 6(b) - Afluências das usinas doadora e receptora com operador transferência

Esse bom desempenho apresentado pelo HIDRO-IA, mostra que esta ferramenta consegue determinar sem dificuldade as características operativas das usinas em diferentes cascatas, mesmo com a transferência de água bruta entre rios.

## V. CONCLUSÃO

Os bons resultados obtidos na aplicação do HIDRO-IA, para gerenciamento da transferência, através do operador genético proposto, mostraram o grande potencial desta ferramenta, que conseguiu captar as diferentes características de operação das usinas e afluências, complementando a formulação original do problema do POSHP. Observou-se que o operador transferência apresentou um desempenho satisfatório na determinação de uma estratégia operativa que venha a atender as restrições do Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência, bem como, as restrições de multiutilização das águas dos rios envolvidos. Finalizando

espera-se que este trabalho possa trazer contribuição para fomentar discussões na área ambiental e de planejamento energético.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASTRO, Marco Aurélio Almeida Castro (2006). O Planejamento Energético Ótimo de Médio Prazo com Representação Individualizada das Usinas Hidroelétricas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2006
- [2] GRAMULIA JUNIOR, J. et al. (2015). Análise e Gerenciamento de Transferência Não-Natural de Água entre Bacias Hidrográficas para o Auxílio do Planejamento Energético Brasileiro. XVI ERIAC - Décimo Sexto Encontro Regional Iberoamericano de CIGRÉ. Puerto Iguazú, Argentina. Maio de 2015. 2015
- [3] AZEVEDO, Luiz Gabriel Todt et al. (2005). Transferência de Água entre Bacias Hidrográficas. Série Água Brasil 7. 1ª Edição. Brasília, DF: Banco Mundial, 2005.
- [4] ALENCAR, T. R. Alencar, (2012). Sistema de Suporte à Decisão baseado em Algoritmos Genéticos para a Otimização do Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência Dissertação de mestrado – Universidade Federal do ABC – UFABC. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – CECS. Programa de pós-graduação em Energia. Setembro de 2012.
- [5] SOARES, S.; CARNEIRO, A. A. F. M. (1991). Optimal Operation of Reservoirs for Electric Generation. IEEE Transactions on Power Delivery, 6(3):1101-1107. 1991.
- [6] EL-HAWARY, M. E.; CHRISTENSEN, G. S. (1979). Optimal economic operation of electric power systems, New York, Academic Press. 1979.
- [7] CARNEIRO, Adriano A. F. M. V. (1991). Contribuição ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas. 1991.
- [8] CARNEIRO, Adriano A. F. M.; BOND, P. S. (1990). A Large Scale Application of an Optimal Deterministic Hydrothermal Scheduling Algorithm. IEEE, 1990. Transactions on Power Systems, 5(1): 204-211.
- [9] CICOGNA, Marcelo A. (2003). Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica. Doutorado pela Unicamp, Campinas, SP. 2003.
- [10] LOPES, Heitor S.; TAKAHASHI, Ricardo H. C. (2011). Computação Evolucionária em Problemas de Engenharia. Disponível em: <[http://omnipax.com.br/site/?page\\_id=66](http://omnipax.com.br/site/?page_id=66)>. Editora Omnipax. Curitiba, PR., 2011.
- [11] RABÊLO, Ricardo A. L. (2010). Componentes de software no planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos. Doutorado pela Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2010.
- [12] GRAMULIA JUNIOR, J. et al. (2010). Contribuição da Usina Hidroelétrica de Henry Borden para o Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. Revista Sinergia V11 n.1 Artigo 14. IFSP, São Paulo, 2010.
- [13] LEITE, P. T.; CARNEIRO, A. A. F. M.; CARVALHO, A. P. L. F. (2002). Energetic Operation Planning Using Genetic Algorithms. IEEE - Transaction on Power Systems, v. 17, n. 1, p. 173-179.
- [14] SCHLICK, C. (1994). Fast Alternatives to Perlin's Bias and Gain Functions. Graphics Gems IV, pages 401-403. 1994.
- [15] LEITE, P. T. (2003). Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. Doutorado pela Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, dezembro 2003.
- [16] ANTUNES, F. et al. (2014). Optimization of the Hydrothermal Power Systems Operation Planning Based on Artificial Intelligence Techniques. IEEE Latin America Transactions, Vol. 12, Nº 08, Dezembro de 2014.