

## OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA IMPLÍCITA E ALGORITMOS GENÉTICOS COMO FERRAMENTA NA OPERAÇÃO MENSAL DOS RESERVATÓRIOS COREMAS - MÃE D'ÁGUA

*Halana Oliveira Trigueiro<sup>1</sup>; Camilo Allyson Simões de Farias<sup>2\*</sup>*

**Resumo** – Esse trabalho desenvolve e aplica regras mensais de operação baseadas em Otimização Estocástica Implícita (OEI) e Algoritmos Genéticos (AG) para o sistema de reservatórios Coremas - Mãe D'água, que está localizado no sertão do Nordeste brasileiro. A técnica de OEI consiste em otimizar a operação do sistema utilizando um conjunto de possíveis cenários de vazão e no posterior uso dos dados ótimos para construção de regras operacionais. Nessa pesquisa, os dados ótimos obtidos com OEI foram utilizados por modelos de AG para derivar regras discretas de alocação com base no volume disponível de água para o mês corrente. Os cenários sintéticos de vazões afluentes foram obtidos pelo método dos fragmentos. As regras encontradas pelo modelo OEI-AG foram aplicadas para operação dos reservatórios Coremas - Mãe D'água considerando novos cenários de vazão. Um índice de vulnerabilidade foi utilizado para fins de avaliação e os resultados indicam que as regras OEI-AG foram superiores às regras de operação padrão. Assim, espera-se que estas regras sejam uma alternativa viável na tomada de decisão para operação mensal do sistema hídrico Coremas - Mãe D'água.

**Palavras-Chave** – Inteligência artificial, otimização estocástica, semiárido.

## IMPLICIT STOCHASTIC OPTIMIZATION AND GENETIC ALGORITHMS AS A TOOL FOR THE MONTHLY OPERATION OF COREMAS – MÃE D'ÁGUA RESERVOIRS

**Abstract** – This work aims at developing and applying monthly operating rules based on Implicit Stochastic Optimization (ISO) and Genetic Algorithms (GA) for the Coremas - Mãe D'água system of reservoirs, which is located in the outback of Brazilian Northeast. The ISO technique consists of optimizing the system operation with a set of possible inflow scenarios and later use of the optimal data for constructing operating rules. In this research, the ISO optimal data were exploited by GA models so that to derive allocation discrete rules based on the available volume of water for the current month. The synthetic inflow scenarios were determined by the fragment method. The operating rules found by the ISO-GA model were applied for the operation of Coremas - Mãe D'água reservoirs under new sets of inflow scenarios. A vulnerability index was used for evaluation purposes and the outcomes suggest the ISO-GA rules are superior to the standard rules of operation. Thus, such operating rules may be a viable alternative in the decision-making process for the monthly operation of Coremas - Mãe D'água water system.

**Keywords** – Artificial intelligence, stochastic optimization, semiarid.

<sup>1</sup> Aluna de Graduação do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, Rua Jairo Vieira Feitosa, 1770, Pereiros, 58840-000 Pombal – PB, Fone: (83) 9653-8877, e-mail: [лана\\_pb\\_16@hotmail.com](mailto:лана_pb_16@hotmail.com)

<sup>2</sup> Professor Adjunto, Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, Rua Jairo Vieira Feitosa, 1770, Pereiros, 58840-000 Pombal – PB, Fone: (83) 3431-4068, e-mail: [camiloallyson@yahoo.com.br](mailto:camiloallyson@yahoo.com.br)

## INTRODUÇÃO

A distribuição irregular dos recursos hídricos no planeta Terra, o crescimento populacional e o desenvolvimento industrial têm sido os principais responsáveis pela atual crise da água no mundo. Em regiões semiáridas, a escassez de água limita o progresso econômico e aumenta os conflitos entre os vários usuários deste recurso. No caso do Nordeste do Brasil, os efeitos decorrentes das secas observadas no semiárido têm uma grande implicação tanto no setor econômico, quanto no setor social e ambiental (Logar e Bergh, 2013). Esse fenômeno está normalmente relacionado com condições climáticas severas, tais como elevadas taxas de evapotranspiração e distribuição irregular de chuvas no espaço e tempo, que são muito comuns nessas regiões.

Neste sentido, as características hidrológicas do semiárido nordestino despertam um grande interesse no desenvolvimento de métodos para redução dos efeitos decorrentes das secas. Uma das soluções para essa problemática é o gerenciamento adequado dos sistemas de abastecimento de água existentes, que pode ser feito por meio do uso de regras de operação. Essas regras são normalmente baseadas em técnicas tradicionais de otimização (Celeste *et al.*, 2005; Farias, 2009).

As técnicas de otimização estocástica consideram a existência de incertezas nas variáveis do sistema e um dos procedimentos mais comuns é conhecido como Otimização Estocástica Implícita (OEI). A OEI considera a incerteza das variáveis do sistema por meio do uso de longas séries de valores históricos ou sintéticos, utilizando um modelo de otimização determinístico e produzindo um conjunto de soluções ótimas. As soluções ótimas são geralmente modeladas via regressão linear, relacionando dados de entrada a dados desejados de saída (Farias, 2009).

Na aplicação de técnicas de otimização estocástica é necessário dispor de longas séries temporais das variáveis do sistema hídrico. Essas variáveis são comumente obtidas pela geração sintética de séries de vazões, que são de grande utilidade para o planejamento e operação de sistemas hídricos a curto e longo prazo, com especialidade para regiões onde os dados históricos são escassos. A literatura apresenta vários métodos que podem ser utilizados na geração de séries temporais. Entre os mais comuns, pode-se citar o método dos fragmentos, que vem sendo bastante utilizado na geração de séries anuais e mensais (Svanidze, 1980; Celeste *et al.*, 2007).

Os algoritmos genéticos (AG) são algoritmos evolucionários baseados na teoria da evolução de Charles Darwin e definidos por um conjunto de métodos de otimização probabilística. Nesse tipo de abordagem, o comportamento das espécies observado por Charles Darwin é simulado computacionalmente de modo que seja possível otimizar parâmetros de modelos para solução de problemas com diferentes objetivos e restrições (Holland, 1975; Michalewicz, 1999).

Diferente do uso de equações de regressão linear, esse trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar técnicas de OEI combinada com AG a fim de derivar regras mensais de operação para um sistema hídrico localizado na região semiárida do estado da Paraíba, Brasil.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo de caso dessa pesquisa é o sistema hídrico Coremas - Mãe D'água, que se localiza na bacia hidrográfica do Rio Piancó, extremo sudoeste do estado da Paraíba.

A região apresenta uma precipitação média anual de 821 mm, concentrada entre fevereiro e abril. A temperatura média anual é de aproximadamente 24°C e a evaporação potencial anual de 2993,4 mm, com as maiores taxas entre setembro e dezembro (SCIENTEC, 1997; Lima, 2004).

A principal reserva hídrica superficial dessa região compete aos açudes Estevam Marinho (Coremas) e Mãe D'água, que quando atingem um determinado nível, se tornam um só reservatório. Nesta pesquisa, assim como no trabalho de Celeste *et al.* (2009), o sistema hídrico é entendido como um reservatório equivalente, onde o seu volume é considerado como a soma dos volumes individuais dos dois açudes. Do mesmo modo, as vazões afluentes ao reservatório equivalente são a soma das vazões de entrada nos dois açudes. As vazões que afluem aos reservatórios são provenientes de três grandes tributários: Riacho Aguiar, Riacho Emas e Rio Piancó. Os volumes mínimo e máximo do reservatório equivalente são iguais a 46,80 hm<sup>3</sup> e 1.358,70 hm<sup>3</sup>, respectivamente.

As demandas hídricas do sistema são assumidas como sendo as vazões máximas disponíveis para o Sistema Curema - Açú, conforme a Resolução nº 687/2004 da Agência Nacional de Águas (ANA, 2004). Nesse sentido, a demanda é definida como o somatório das vazões máximas disponíveis para o estado da Paraíba com a vazão mínima requerida no Rio Piranhas na divisa dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, totalizando o valor de 7,9 m<sup>3</sup>/s.

### Regras operacionais OEI-AG

O modelo OEI-AG consiste das etapas mostradas no fluxograma da Figura 1.

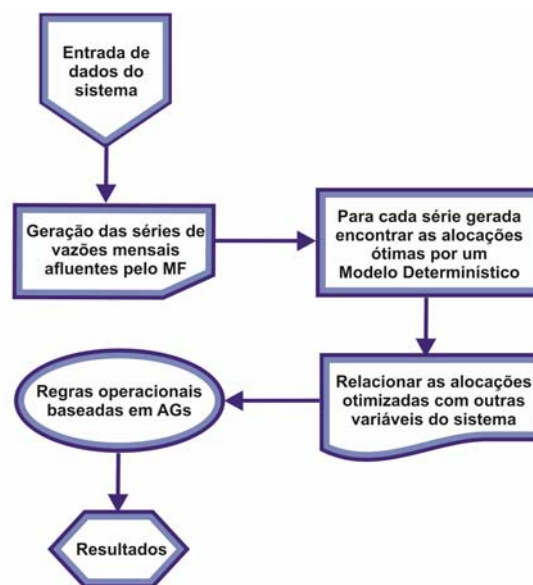


Figura 1 – Fluxograma representativo do modelo OEI-AG.

#### *Geração estocástica de vazões*

O modelo escolhido para geração sintética de vazões afluentes aos reservatórios Coremas - Mãe D'água é o Método dos Fragmentos (MF). Detalhes do MF podem ser encontrados nos trabalhos de Svanidze (1980), Celeste *et al.* (2007), e Carneiro e Farias (2013).

#### *Modelo determinístico*

Este modelo assume que o principal objetivo da operação é encontrar alocações de água que melhor satisfazem as demandas sem comprometer o sistema. A formulação do problema de otimização está mostrada na Equação (1):

$$\text{minimizar } \sum_{t=1}^N \left[ \frac{R(t) - D(t)}{D(t)} \right]^2 \quad (1)$$

onde  $N$  é o horizonte de operação;  $R(t)$  é a alocação no mês  $t$ ; e  $D(t)$  a demanda no mês  $t$ .

Alocações e volumes de cada período são relacionados com vazão afluente, evaporação e vertimento pela equação da continuidade:

$$\begin{aligned} S(1) &= S_0 + Q(1) - R(1) - Ev(1) - Sp(1) \\ S(t) &= S(t-1) + Q(t) - R(t) - Ev(t) - Sp(t); \quad \forall t = 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

em que  $S(t)$  é o volume do reservatório no final do mês  $t$ ;  $S_0$  é o volume inicial;  $Q(t)$  é a vazão afluente ao sistema durante o mês  $t$ ;  $Ev(t)$  é a evaporação sobre a superfície líquida do reservatório durante o mês  $t$ ; e  $Sp(t)$  é o vertimento que eventualmente pode ocorrer durante o mês  $t$ .

As limitações físicas do sistema definem as restrições para alocações, volume, vertimento e evaporação.

$$0 \leq R(t) \leq D(t); \quad \forall t \quad (3)$$

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max}; \quad \forall t \quad (4)$$

$$Sp(t) \geq 0; \quad \forall t \quad (5)$$

$$Ev(t) \geq 0; \quad \forall t \quad (6)$$

onde  $S_{\max}$  e  $S_{\min}$  são os volumes máximo e mínimo do reservatório, respectivamente.

### Modelos de AG

Os modelos de AG seguem basicamente os seguintes passos: 1) Escolha do sistema de representação das variáveis, que pode ser binária ou real, e a definição da função-objetivo para o problema; 2) Escolha de uma população inicial, que consiste em um conjunto de soluções (cromossomos) iniciais do problema geralmente tomadas aleatoriamente; 3) Avaliação da aptidão e seleção. Cada solução é avaliada e apenas as que apresentam os melhores valores são selecionadas como cromossomos pais para, a partir de operações genéticas (*crossover* e mutação), gerarem uma nova população de cromossomos chamados de cromossomos filhos. As melhores soluções podem ser transferidas para a próxima geração por meio do processo de elitismo (dessa forma não se corre o risco de perder a melhor solução nos processos de *crossover* e mutação); 4) É criado um critério de parada para o AG. O procedimento se repete até que o AG atinja o seu critério de parada. Maiores detalhes podem ser encontrados nos trabalhos de Holland (1975) e Michalewicz (1999).

Nesse trabalho, os dados otimizados de alocações são relacionados com volume disponível (volume inicial do reservatório equivalente mais a vazão esperada para o mês) por meio de regras discretas de operação mensal, conforme mostra a Figura 2.

Os parâmetros  $\alpha_1(m)$ ,  $\alpha_2(m)$ ,  $S_1(m)$ ,  $S_2(m)$  e  $S_3(m)$  para cada mês  $m$  do ano ( $m =$  janeiro; fevereiro,...; dezembro) são calibrados através de modelos baseados em AG. O objetivo dos modelos de AG é a minimização do quadrado do erro entre as alocações calculadas pelo modelo da Figura 2 e as observadas no conjunto de dados otimizados obtidos por OEI para cada mês do ano.

Com isso, é possível obter-se políticas mensais de racionamento de água para um determinado volume disponível no reservatório equivalente.

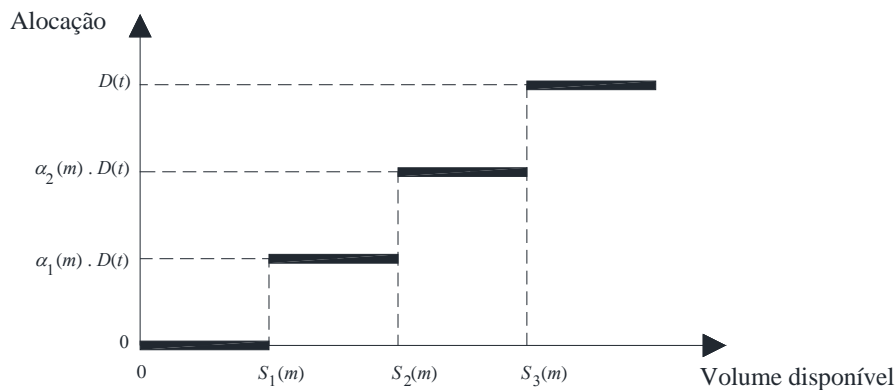


Figura 2 – Gráfico representativo das regras mensais para operação dos reservatórios Coremas - Mãe D'água.

## Modelo de simulação

Uma das regras de operação mais simples é a Política Operacional Linear Padrão, nome derivado do inglês *Standard Linear Operation Policy* (SLOP). Este modelo estabelece que quando o volume de água disponível é igual ou inferior à demanda, toda a água armazenada é liberada; e que quando o volume de água disponível é superior à demanda, a mesma é atendida e o excedente começa a ser acumulado no reservatório até atingir seu volume máximo. A partir desse patamar, o vertimento é iniciado (Loucks *et al.*, 1981; Carneiro e Farias, 2013).

Todos os modelos desse estudo foram implementados na linguagem de programação MATLAB, versão R2012a.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de vazões mensais utilizados nessa pesquisa foram obtidos junto a base de dados HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA, 2012). A série de dados utilizada é a soma das vazões nos postos fluviométricos Piancó, Emas e Aguiar, no período de 1964 a 1988.

### Geração estocástica de vazões

O modelo utilizado nesse estudo foi o mesmo implementado e testado por Carneiro e Farias (2013), onde 1.000 anos de vazões sintéticas mensais foram geradas e apresentaram propriedades estatísticas muito próximas dos valores das vazões históricas observadas.

### Regras operacionais OEI-AG

As regras operacionais OEI-AG, ou simplesmente modelo OEI-AG, foram aplicadas para operação do reservatório equivalente que representou o sistema hídrico Coremas - Mãe d'Água.

O volume inicial do reservatório foi assumido como sendo igual ao volume máximo. O modelo de OEI foi aplicado para  $M = 50$  sequências de  $N = 2448$  meses (204 anos) de vazões afluentes ao reservatório, que foram geradas pelo MF. Os primeiros e últimos dois anos de cada sequência foram eliminados para evitar problemas com condições de contorno, resultando em um total de 120.000 meses (50 sequências de 200 anos) de alocações ótimas.

Os dados ótimos de volume disponível (volume inicial mais vazão afluente) e alocação para os meses de janeiro a dezembro foram agrupados para obtenção de 12 regras de operação baseadas



em AG, uma para cada mês. O sistema de representação de variáveis nos modelos de AG foi o real. A população inicial (valor fixo durante as gerações), probabilidade de crossover e probabilidade de mutação dos AG desenvolvidos foram 20, 80% e 1%, respectivamente. A estratégia de elitismo foi adotada em 10% da população para evitar a perda das melhores soluções. As calibrações tinham como limite de parada um valor menor que  $10^{-6}$  no quadrado do erro entre alocações calculadas e alocações observadas. A Tabela 1 mostra os valores dos parâmetros de racionamento e dos volumes que dispararam esses racionamentos para cada mês do ano.

O desempenho do modelo OEI-AG foi verificado em cinco novas simulações com base em cinco novas sequências geradas pelo MF, cada uma com 54 anos de vazões mensais afluentes aos reservatórios Coremas - Mãe D'água. Assim como na calibração, os primeiros e últimos dois anos de cada sequência foram eliminados para evitar problemas com condições de contorno, resultando em um total de 50 anos (600 meses) de operação para cada sequência. Para fins de comparação, os resultados obtidos pela aplicação do modelo de otimização determinístico e pelo SLOP também foram avaliados. A Tabela 2 apresenta os resultados de um índice de vulnerabilidade, assumido como sendo igual à função objetivo da Equação (1), para todas as simulações e modelos apresentados nesse trabalho. Esse índice representa a magnitude das falhas ao atendimento das demandas do sistema levando-se em conta todo o horizonte de operação. Em cada instante  $t$ , a vulnerabilidade varia entre 0 e 1, com o valor 0 indicando o atendimento total a demanda e o valor 1 retratando que nenhuma alocação foi disponibilizada. Portanto, quanto maior o valor desse índice, mais vulnerável será considerada a regra avaliada. A Figura 3 mostra os resultados de alocações da simulação SIM#5 para todos os modelos.

Tabela 1 – Critérios de racionamento de água e volumes para disparo de racionamento.

Mês	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$S_1(m^3)$	$S_2(m^3)$	$S_3(m^3)$
Janeiro	0,78	0,91	54157511,21	106250804,18	310081173,73
Fevereiro	0,84	0,95	54436862,85	138442351,18	516825558,71
Março	0,15	0,84	53151349,99	54295738,68	265166240,87
Abril	0,35	0,82	80460555,71	134260000,02	373771801,09
Mai	0,60	0,94	62057556,02	205627296,37	718437825,71
Junho	0,58	0,86	46800001,01	187928637,36	304874331,31
Julho	0,49	0,89	107359674,86	146849036,83	465434215,49
Agosto	0,64	0,86	46946972,87	162280859,12	226799500,78
Setembro	0,67	0,94	89672549,38	145688142,95	563915476,44
Outubro	0,50	0,91	48950624,13	101699134,18	449626845,96
Novembro	0,25	0,40	62341170,68	67045547,32	77968681,77
Dezembro	0,24	0,42	53271675,21	56699329,65	62556669,80

Tabela 2 – Índices de vulnerabilidade para todos os modelos.

	SLOP	Modelo Determinístico	Modelo OEI-AG
SIM#1	20,18	5,79	12,72
SIM#2	4,11	0,65	2,83
SIM#3	37,12	20,56	31,05
SIM#4	7,10	1,53	3,78
SIM#5	5,03	0,64	1,93

Uma investigação dos resultados apresentados na Tabela 2 mostra que as regras do modelo OEI-GA foram menos vulneráveis que o SLOP para todas as simulações.

Ao analisar a Figura 3, pode-se notar que o modelo de regras discretas OEI-AG procura mitigar os déficits concentrados que acontecem com o SLOP, diminuindo as alocações antes da chegada dos períodos secos e, conseqüentemente, a magnitude destes déficits. Ainda verificando os resultados da SIM#5, observa-se que as alocações do modelo OEI-AG se comportam de maneira similar as do modelo determinístico, indicando que os resultados derivados são satisfatórios, uma vez que o modelo OEI-AG tenta se espelhar no modelo de previsão perfeita, que conhece as vazões para todo o horizonte de operação.

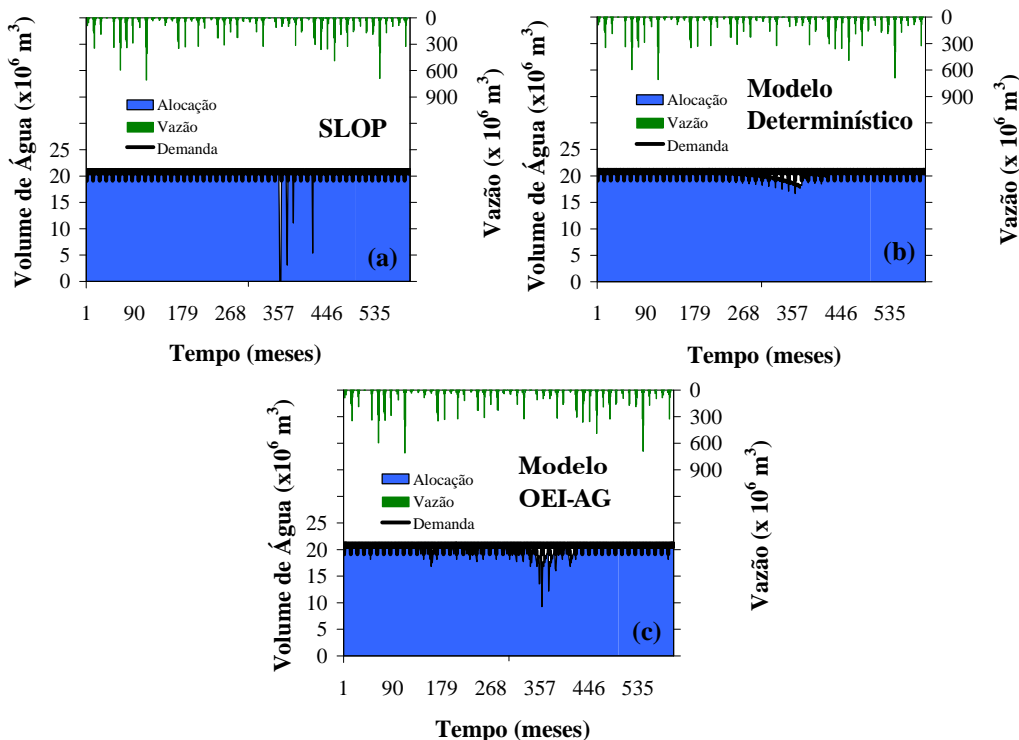


Figura 3 – Alocações de água com (a) SLOP, (b) Modelo Determinístico e (c) Modelo OEI-AG para simulação SIM#5.

## CONCLUSÃO

Essa pesquisa teve como principal objetivo formular e aplicar regras de operação mensal para o sistema hídrico Coremas - Mãe D'água, que está localizado no semiárido nordestino. Para isso, regras mensais discretas foram obtidas por meio da combinação das técnicas de Otimização Estocástica Implícita (OEI) e Algoritmos Genéticos (AG).

As regras geradas pelo modelo OEI-AG foram aplicadas para operar o sistema considerando-se cinco cenários sintéticos independentes e depois analisadas segundo um critério de vulnerabilidade. Os resultados obtidos sugerem que as regras OEI-AG são superiores a política de operação padrão. Destaca-se, também, que o modelo OEI-AG tentou se comportar de forma similar ao modelo determinístico. No entanto, é importante enfatizar que o modelo determinístico necessita conhecer todo o horizonte de operação, enquanto o modelo OEI-AG necessita apenas de informações sobre o volume inicial e de vazão afluente para o mês corrente. Sendo assim, espera-se que este modelo sirva como suporte na tomada de decisão durante a operação mensal dos reservatórios Coremas - Mãe D'água.

## REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas (2012). Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br>, acessado em 27/05/2012.
- ANA – Agência Nacional de Águas (2004). Resolução n.º 687, de 03 de dezembro de 2004.
- CARNEIRO, T. C.; FARIAS, C. A. S. (2013) Otimização Estocástica Implícita e Redes Neurais Artificiais para Auxílio na Operação Mensal dos Reservatórios Coremas - Mãe d'Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. (No prelo)
- CELESTE, A.B.; CURI, W.F.; CURI, R.C. (2007). Análise de métodos para geração sintética de vazões em rios intermitentes. In *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo, pp. 1-18.
- CELESTE, A. B.; SUZUKI, K.; KADOTA, A.; SANTOS, V. S. (2005). Derivation of reservoir operating rules by implicit stochastic optimization. *Annual Journal of Hydraulic Engineering – JSCE* 49(2), pp. 1111–1116.
- CELESTE, A. B., CURI, W. F., CURI, R. C. (2009). Implicit stochastic optimization for deriving reservoir operating rules in semiarid Brazil. *Pesquisa Operacional*, 29(1), pp. 223-234.
- FARIAS, C. A. S. (2009) *Derivation of hedging rules and forecasts by artificial neural networks for optimal real-time management of an integrated water resources system*. Tese de Doutorado, Ehime University, Matsuyama, Japão.
- HOLLAND. J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press.
- LIMA, C. A. G. (2004) *Análise e sugestões para diretrizes de uso das disponibilidades hídricas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Piancó, situada no Estado da Paraíba*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, Brasil.
- LOGAR, I.; BERGH, J. C. J. M. (2013). Methods to Assess Costs of Drought Damages and Policies for Drought Mitigation and Adaptation: Review and Recommendations. *Water Resources Management*, Vol. 7, pp. 1707-1720.
- LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. (1981) *Water Resources Systems Planning and Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA.
- MICHALEWICZ. Z. (1999). *Genetics Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer, 3<sup>th</sup> edition.
- SCIENTEC, Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. (1997). Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba: Bacias do Piancó e do Alto Piranhas, SEPLAN, Brasil.
- SVANIDZE, G. G. (1980). Mathematical Modeling of Hydrologic Series (for Hydroelectric and Water Resources Computations). *Water Resources Publications*, Fort Collins, Colorado, 1980.