

IV-111 - ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DO SISTEMA HÍDRICO COREMAS - MÃE D'ÁGUA

Tereza Helena Costa Nunes⁽¹⁾

Aluna do Curso de Engenharia Ambiental, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, UFCG, Pombal, PB.

Artur Moises Gonçalves Lourenço⁽²⁾

Aluno do Curso de Engenharia Ambiental, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, UFCG, Pombal, PB.

Tatiane Carolyne Carneiro⁽³⁾

Aluna do Curso de Engenharia Ambiental, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, UFCG, Pombal, PB.

Dyego Assis Lourenço⁽⁴⁾

Aluno do Curso de Engenharia Ambiental, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, UFCG, Pombal, PB.

Camilo Allyson Simões de Farias⁽⁵⁾

Engenheiro Civil, Professor Doutor, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, UFCG, Pombal, PB.

Endereço⁽¹⁾: Travessa Pedro Paes de Lira, 04 - Centro – São José do Egito - PE - CEP: 56700000 - Brasil - Tel: (83) 9654-0880 - e-mail: eng.terezanunes@gmail.com

RESUMO

Neste projeto de pesquisa desenvolveu-se e aplicou-se um modelo baseado em Algoritmos Genéticos (AG) para otimização multiobjetivo das alocações de água dos reservatórios Coremas - Mãe d'Água, que estão localizados na região semiárida do estado da Paraíba, município de Coremas. A crescente demanda hídrica e as frequentes secas observadas na região têm gerado conflitos entre os diversos usuários e, portanto, torna-se imprescindível a busca por soluções mais elaboradas para o gerenciamento dos recursos hídricos existentes. A presença de objetivos conflitantes, como é o caso do uso da água dos reservatórios Coremas - Mãe d'Água, torna a procura por um ótimo global impossível e, portanto, uma análise multiobjetivo deve ser realizada. Os AG podem ser definidos como métodos de otimização probabilística que são capazes de resolver vários problemas arbitrários com diferentes objetivos e restrições. Diferente das técnicas tradicionais de otimização, os AG não exigem simplificações na representação do sistema e aparecem como uma ótima opção na resolução de problemas não-lineares. Espera-se que esta pesquisa possa incentivar o manejo eficiente dos recursos hídricos existentes, contribuindo para minimização de conflitos e para o desenvolvimento socioeconômico da região abastecida pelos reservatórios Coremas - Mãe d'Água.

PALAVRAS-CHAVE: Operação de Reservatórios, Algoritmos Genéticos, Otimização Multiobjetivo.

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos no planeta Terra são extremamente mal distribuídos e, com o avanço da humanidade, esse problema se torna cada vez mais preocupante. Como resultado, tem-se investido consideravelmente nos estudos voltados para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Enquanto algumas regiões enfrentam grandes períodos sem chuva, outras sofrem com o excesso da mesma e com diversos problemas devido às grandes cheias. Esses problemas ligados aos recursos hídricos ocorrem devido a vários fatores, tais como as variações climáticas, o aumento das demandas e modificações ambientais. Esses agravantes tornam o manejo eficiente dos recursos hídricos bastante complexo.

No Nordeste do Brasil, em especial na região semiárida, os problemas relacionados com os recursos hídricos se dão devido às chuvas irregulares, ao baixo índice pluviométrico e às altas taxas de evaporação. Tal questão tem total influência sobre o desenvolvimento social e econômico desta região.

O semiárido paraibano, em particular, está inserido no Polígono das Secas, uma área com aproximadamente um milhão de metros quadrados, caracterizada por grandes e constantes períodos sem precipitação, gerando problemas que têm como agravantes a crescente demanda hídrica, gerando com isso inúmeros conflitos entre os múltiplos usuários da água.

Este artigo tem como proposta o desenvolvimento e aplicação de um Algoritmo Genético a fim de desenvolver estratégias para sistemas hídricos com múltiplos usos do semiárido paraibano do Brasil. Os AGs são interessantes por não exigirem simplificações na representação do sistema e se mostram como uma ótima opção na resolução de problemas não-lineares.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

O sistema hídrico Coremas – Mãe d'Água situa-se na bacia do Rio Piancó, extremo sudoeste do estado da Paraíba. A região tem uma precipitação média anual de 821 mm, com 60% desse valor concentrado entre fevereiro e abril, uma temperatura média anual de aproximadamente 25°C e uma evaporação potencial anual de cerca de 3000 mm, concentrando-se em sua maioria entre os meses de setembro e dezembro.

A nascente do Rio Piancó localiza-se na Serra do Umbuzeiro, Santa Inês-PB, e deságua no Rio Piranhas, na cidade de Pombal - PB. A bacia do Rio Piancó possui 1336 açudes, em sua grande maioria micros e pequenos reservatórios (PDRH/PB – SCIENTEC, 1997). Essa bacia conta com um escoamento superficial preocupante no que diz respeito à quantidade de água demandada e disponível no sistema.

A bacia apresenta vegetação característica do Bioma Caatinga que, quando explorada irracionalmente, causa assoreamento dos rios e também dos reservatórios. Aproximadamente 28% dos solos da bacia são indicados à exploração, todavia, apenas cerca de 3% é explorada, em geral por pequenos proprietários e projetos públicos de exploração.

O açude Estevam Marinho (Coremas) foi construído na década de 30 e barra o Rio Piancó enquanto o açude Mãe d'Água foi construído na década de 50 e barra o Rio Aguiar. Esses açudes têm como principais usos a irrigação, controle de cheias, piscicultura, perenização de vales, aproveitamento de culturas nas áreas de montante, abastecimento de água para populações urbanas e geração de energia. Os dois açudes são interligados por um canal com capacidade máxima de vazão igual a 12 m³/s. Na Figura 1 apresenta-se uma imagem de satélite dos dois açudes.

O reservatório Coremas apresenta uma capacidade máxima de 720 milhões de metros cúbicos e seus principais tributários são o Rio Piancó e o Rio Emas. Este reservatório conta ainda com uma usina hidroelétrica que tem capacidade de produzir 3,52 MW de potência para uma vazão máxima turbinada de 7,3 m³/s.

O reservatório Mãe d'Água apresenta uma capacidade máxima de 638,7 milhões de metros cúbicos e seu principal tributário é o Rio Aguiar. Do reservatório Mãe d'Água sai o Canal da Redenção, responsável por suprir as demandas de irrigação das Várzeas de Sousa (5000 ha, que se localiza entre as cidades de Sousa-PB e Aparecida-PB. Na Tabela 1 encontram-se apresentados os dados mensais de demanda e evaporação potencial nos reservatórios Coremas - Mãe d'Água.



Figura 1: Imagem de satélite dos Reservatórios Coremas - Mãe d'Água (Fonte: ©Google Earth).

Tabela 1: Demandas e evaporações mensais.

Períodos	Irrigação (m ³ /s)	Abastecimento urbano (m ³ /s)	Piscicultura (m ³ /s)	Geração de energia(m ³ /s)	Evaporação potencial(mm)
Jan	8,13	2,28	0,05	6,00	272,3
Fev	7,45	2,28	0,05	6,00	215,4
Mar	6,77	2,28	0,05	6,00	204,1
Abr	6,68	2,28	0,05	6,00	182,4
Mai	6,51	2,28	0,05	6,00	183,1
Jun	6,65	2,28	0,05	6,00	182,2
Jul	7,12	2,28	0,05	6,00	219,9
Ago	7,92	2,28	0,05	6,00	271,9
Set	8,40	2,28	0,05	6,00	299,6
Out	8,71	2,28	0,05	6,00	332,9
Nov	8,72	2,28	0,05	6,00	319,0
Dez	8,22	2,28	0,05	6,00	310,6

ALGORITMOS GENÉTICOS

AG são métodos de otimização (busca da melhor solução para um dado problema) inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos. Estes se baseiam na teoria da seleção natural e sobrevivência do mais apto, declarada pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin em 1859, no seu livro “A Origem das Espécies”. Segundo Darwin: “quanto melhor o indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”. Os AG foram introduzidos por Holland (1975) e popularizados por um de seus alunos, David Goldberg (Goldberg, 1989).

Segundo Goldberg (1989), os AG seguem basicamente os seguintes passos: 1) Escolha do sistema de representação das variáveis e definição da função-objetivo para o problema. A representação das variáveis pode ser binária (onde se utilizam cadeias de bits) ou real (onde são utilizados números reais); 2) Escolha de uma população inicial que consiste em um conjunto de soluções, geralmente escolhidas de maneira aleatória. A população é formada por indivíduos chamados de cromossomos que representam, cada um, uma solução para o problema; 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 através 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.

MODELO CHUVA-VAZÃO PARA PREENCHIMENTO DE FALHAS

Neste estudo foi utilizado como modelo chuva-vazão uma Rede Neural Artificial (RNA) do tipo perceptron de múltiplas camadas, sendo esta treinada pelo algoritmo de retropropagação de erros. O modelo foi utilizado para preencher falhas nos dados de vazão que foram utilizados para operação do reservatório.

A estrutura da RNA empregada possui uma camada de entrada, uma camada intermediária e uma camada de saída. A RNA possui uma topologia do tipo alimentada adiante e, desta forma, as conexões da mesma ocorrem da camada de entrada para a oculta e da oculta para a de saída.

No modelo, a camada de entrada dispõe de três neurônios compostos pelo valor prévio de precipitação média $P(t-1)$, valor corrente de precipitação média $P(t)$, e evaporação potencial $Ev(t)$, sendo todos estes expressos em [mm].

A quantidade de neurônios da camada oculta é obtida por um processo fundamentado em tentativa e erro. O único neurônio presente na camada de saída é a vazão no posto fluviométrico de Piancó $Q(t)$, expressa em [mm]. No processo foram empregadas funções sigmóides para os neurônios da camada oculta e uma função linear para o neurônio da camada de saída. Na Figura 2 apresenta-se a estrutura da RNA desta pesquisa.

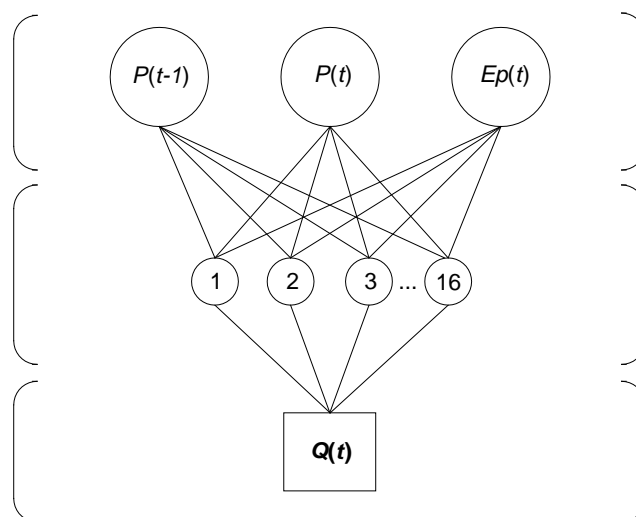


Figura 2: Estrutura do modelo Chuva-vazão baseado em RNA.

Os dados originais (entradas e saídas desejadas) foram criteriosamente escalonados a fim de obter uma melhora na eficiência da calibração dos modelos RNA. O escalonamento consiste em regularizar as entradas e saídas desejadas de forma que tenham média igual a zero e desvio padrão unitário (Demuth *et al.*, 2008). Neste caso, foi escolhido para a calibração o algoritmo de retropropagação de erro, algoritmos este que vêm sendo empregado com êxito em muitos campos da engenharia. Na aplicação em questão, o algoritmo utilizado para retropropagação foi o Scaled Conjugate Gradient (SCG). Pode-se encontrar uma explicação detalhada deste algoritmo em Moller (1993).

A calibração da RNA é encerrada pelo processo *Early Stopping Method* (Demuth *et al.*, 2008). Este método divide os dados de calibração em dois subconjuntos: um de treinamento e outro de validação, onde o de treinamento é utilizado para calcular gradientes e ajustar os pesos e níveis de bias e o de validação tem seus erros monitorados para evitar *overfitting* dos dados e conseqüentemente melhorar o grau de generalização da RNA. A calibração chega ao fim quando o erro no subconjunto de validação aumenta por um determinado número de iterações.

MODELO DE OTIMIZAÇÃO 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).

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

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

Alocações e volumes de cada período são relacionados com vazão afluente, evaporação e vertimento pela equação da continuidade (Equação 2):

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

em que $S(t)$ é o volume do reservatório no final do mês t ; S_0 é o volume inicial; $Q_T(t)$ 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 e vertimento.

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

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

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

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

em que S_{max} e S_{morto} são os volumes máximo e morto do reservatório, respectivamente.

Este modelo de otimização, formulado como um problema de programação quadrática com restrições lineares, é implementado em MATLAB.

MODELO DE SIMULAÇÃO

Uma das regras de operação mais simples é a Política Operacional Linear Padrão, do inglês *Standard Linear Operation Policy* (SLOP). Este modelo, que é mostrado na Figura 3, estabelece que, quando a água disponível é igual ou inferior à demanda, toda a água armazenada é liberada, e quando a 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 daí, o vertimento é iniciado (Loucks *et al.*, 1981; Celeste, 2005).

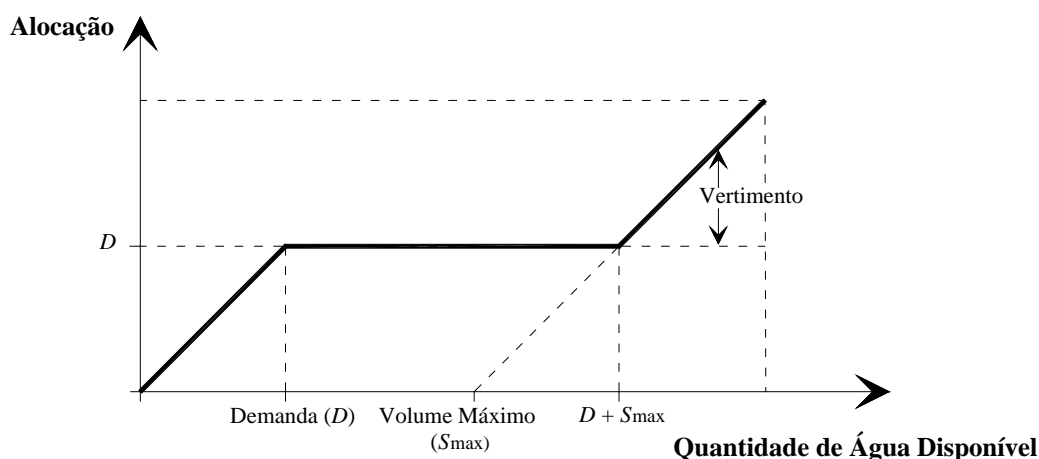


Figura 3: Política de Operação Linear Padrão (Adaptado de Farias, 2009).

MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO PARA ALOCAÇÕES

Este modelo tem como principal objetivo dividir uma possível liberação do reservatório entre os diversos usuários. Neste estudo, assumiu-se que os objetivos eram o abastecimento urbano e a irrigação. O problema de otimização consistiu em maximizar a liberação para os objetivos específicos, como mostrado na Equação 7.

$$\begin{aligned} & \text{maximizar } F1 + F2; \\ F1 &= \left[\frac{R_I(t)}{D_I(t)} \right]^2; F2 = \left[\frac{R_U(t)}{D_U(t)} \right]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

em que $R_I(t)$ é a alocação para irrigação no mês t ; $R_U(t)$ é a alocação para abastecimento urbano no mês t ; e $D_I(t)$ e $D_U(t)$ são as demandas para irrigação e abastecimento urbano no mês t , respectivamente.

As limitações para as alocações são:

$$R_I(t) + R_U(t) = R(t) \quad (8)$$

$$0 \leq R_I(t) \leq D_I(t) \quad (9)$$

$$0 \leq R_U(t) \leq D_U(t) \quad (10)$$

O modelo de otimização multiobjetivo, baseado na técnica de AG, foi também implementado em MATLAB.

APLICAÇÃO E RESULTADOS

MODELO CHUVA-VAZÃO POR MEIO DE RNA

O modelo Chuva-vazão mensal baseado em RNA foi implementado e calibrado utilizando dados de oito postos pluviométricos (médias aritméticas) e o posto fluviométrico Piancó, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Postos utilizados para calibração do modelo Chuva-vazão.

Código	Nome do posto	Tipo	Município
737006	Piancó	Pluviométrico	Piancó
738020	Conceição	Pluviométrico	Conceição
738015	Manaíra	Pluviométrico	Manaíra
738013	Princesa Isabel	Pluviométrico	Princesa Isabel
738019	Santana dos Garrotes	Pluviométrico	Santana dos Garrotes
738012	Boa Ventura	Pluviométrico	Boa Ventura
738014	Nova Olinda	Pluviométrico	Nova Olinda
738018	Ibiara	Pluviométrico	Ibiara
37340000	Piancó	Fluviométrico	Piancó

Os dados utilizados para treinamento, validação e teste do modelo de RNA foram de 1963-1974, 1975-1981 e 1982-1988, respectivamente.

A avaliação do desempenho do sistema de previsão de vazões foi realizada com base nos seguintes índices: correlação (r), viés relativo (VR) e eficiência de Nash-Sutcliff ($NASH$). A correlação mede o grau de dependência linear entre as previsões e os valores observados de vazão, expressando na realidade um valor potencial de bom ajuste. O viés relativo, por sua vez, mostra se o sistema de previsão de vazões possui uma tendência a subestimar ou superestimar as vazões observadas. O índice de eficiência $NASH$, que pode variar entre $-\infty$ e 1, é tradicionalmente utilizado para expressar aderência entre vazões simuladas e observadas. Esse índice considera tanto os erros sistemáticos quanto os erros randômicos, indicando que o ajuste é cada vez melhor à medida que o seu valor aproxima-se de um.

Valores altos de correlação não significam, por si só, previsões com alta precisão. Por exemplo, um sistema com um viés muito alto, mesmo que possua correlação igual à unidade ($r=1$), fornecerá previsões de vazões de baixa precisão, embora seja possível remover este viés por meio de modelos estatísticos. Um sistema perfeito de previsão teria $r = 1$ e $VR = 0$. As equações para cálculo destes índices podem ser encontradas em Salas (1993).

Os índices de correlação, viés relativo e $NASH$, calculados para todos os conjuntos de dados (calibração e teste), encontram-se na Tabela 3.

Na Figura 4 mostra-se um comparativo entre as previsões mensais de vazão obtidas com o modelo de RNA e os correspondentes valores observados de vazão para o posto fluviométrico investigado. Vale notar que nestes gráficos são apresentados os resultados para o período de testes, ou seja, para uma série de dados totalmente independentes daqueles utilizados para calibração (treinamento e validação) do modelo.

Tabela 3: Correlação, viés relativo e NASH entre as vazões mensais calculadas e observadas.

Calibração			Teste		
r	VR	$NASH$	R	VR	$NASH$
0,87	-10,30%	0,75	0,88	-26,5%	0,70

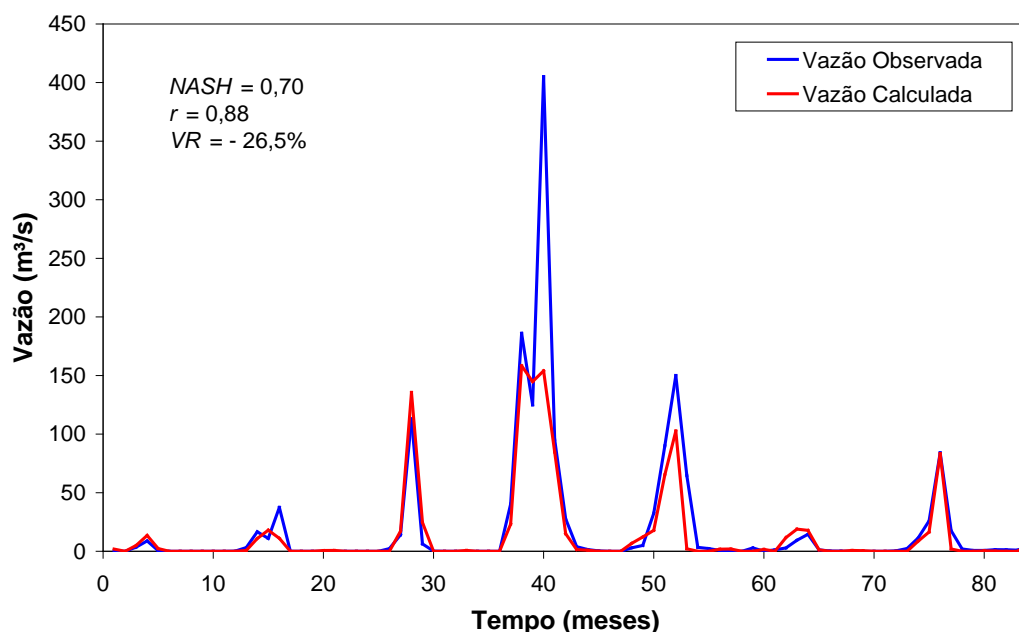


Figura 4: Comparação entre previsões mensais de vazão obtidas com o modelo RNA e os valores observados no posto Piancó durante os sete anos do período de teste (1982–1988).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4, observa-se que as previsões do modelo de RNA possuem alta correlação com os valores observados. Os valores de viés relativo apresentaram-se bastante razoáveis, tendo em vista que uma das limitações das RNA é atingir os picos de vazão em virtude do pequeno número de exemplos de treinamento para estes eventos. Os valores do *NASH* também foram acima de 0,70, o que indica que as previsões mensais de vazão possuem boa qualidade.

O modelo calibrado foi utilizado para preencher falhas nos postos fluviométricos de Emas e Aguiar. Os dados de entrada eram compostos das médias de precipitações observadas nos postos pluviométricos listados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Postos utilizados para preenchimento de falhas no posto fluviométrico de Emas.

Código	Nome do posto	Tipo	Município
737021	Catingueira	Pluviométrico	Catingueira
738016	Juru	Pluviométrico	Juru
738017	Imaculada	Pluviométrico	Imaculadas

Tabela 5: Postos utilizados para preenchimento de falhas no posto fluviométrico de Aguiar.

Código	Nome do posto	Tipo	Município
738010	Serra Grande	Pluviométrico	Serra Grande
737019	Açude Coremas	Pluviométrico	Coremas

MODELO DE OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICO E SLOP

Para operação do reservatório, foram utilizadas as vazões observadas nos postos fluviométricos de Emas, Aguiar e Piancó. Estes postos foram escolhidos por serem os grandes tributários do sistema Coremas – Mãe d'Água, reservatórios em estudo e maior reserva hídrica do estado da Paraíba. Os postos e o período de vazões utilizadas para operação dos reservatórios são mostrados na Tabelas 6.

Os reservatórios Coremas - Mãe d'Água são compostos pela junção de dois açudes, que quando atingem um determinado nível, se tornam um só reservatório. Nessa pesquisa, os reservatórios foram utilizados como um reservatório equivalente, ou seja, o volume ativo do sistema será considerado como a soma dos volumes ativos dos reservatórios individuais.

Tabela 6: Postos e períodos de dados utilizados.

Nome do posto fluviométrico	Período	Fonte
Piencó	1963 – 1988	Hidroweb (ANA, 2010)
Aguiar		Preenchidos pelo modelo chuva-vazão de RNA
Emas		<i>Hidroweb</i> com falhas preenchidas pelo modelo Chuva-vazão de RNA

Nas Figuras 5, 6 e 7 apresentam-se os resultados para operação do reservatório Coremas – Mãe D'água. Pode-se perceber que o modelo determinístico mitiga os déficits concentrados que acontecem com o SLOP pela diminuição das alocações antes dos períodos secos de forma a diminuir a magnitude destes déficits. Os grandes déficits apresentados pela política de operação padrão (SLOP) e os ótimos resultados mostrados pelo modelo determinístico indicam que regras operacionais devem ser desenvolvidas e testadas em busca de melhores diretrizes para o manejo da água dos reservatórios Coremas - Mãe d'Água. É importante ressaltar que o modelo determinístico é impraticável, uma vez que ainda não é possível prever afluências com alta precisão para um longo horizonte de operação.

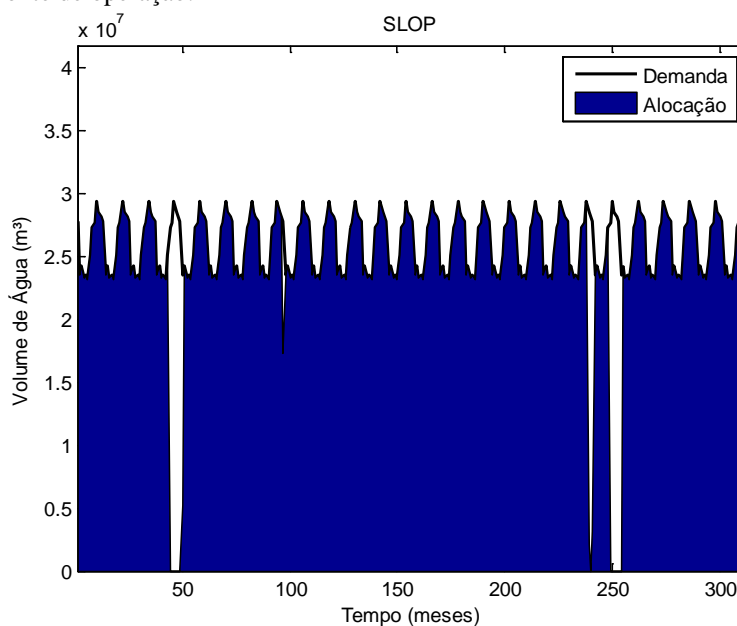


Figura 5: Operação do reservatório utilizando o SLOP.

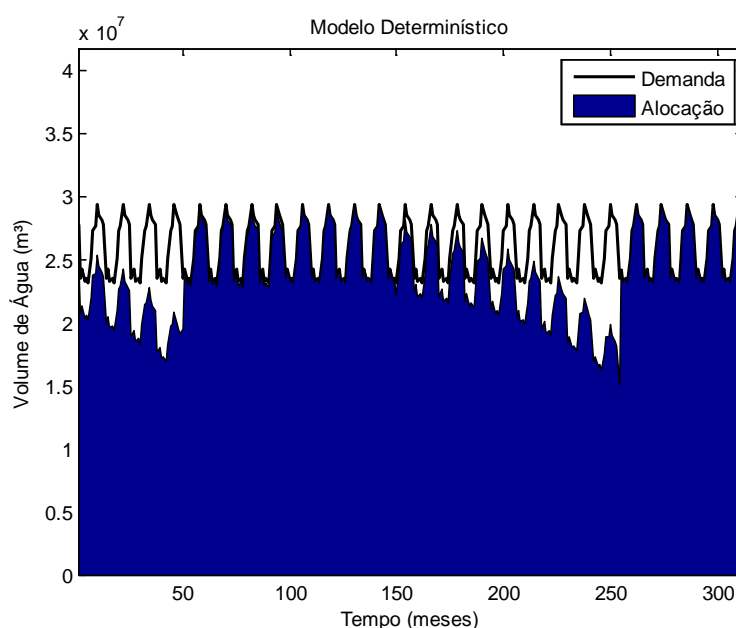


Figura 6: Operação do reservatório utilizando o modelo determinístico.

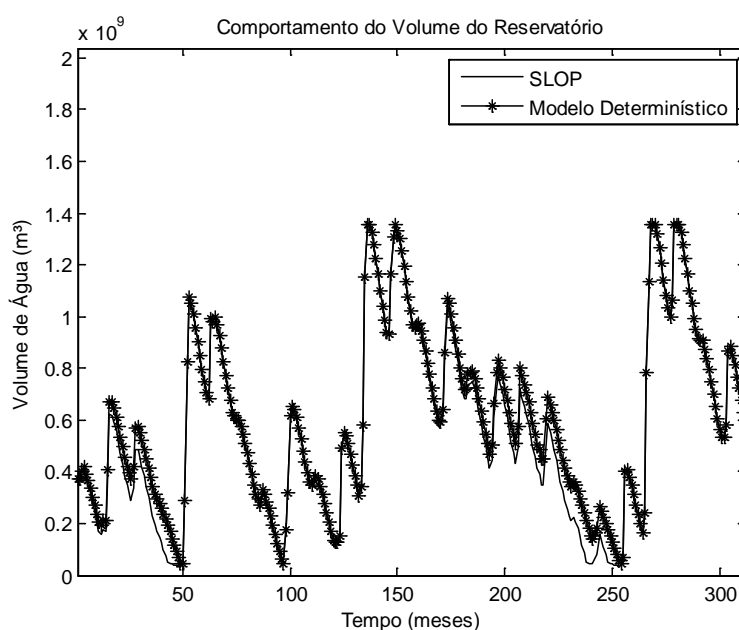


Figura 7: Volume do reservatório em função do tempo.

MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA ALOCAÇÕES

Um modelo de otimização multiobjetivo baseado de AG foi aplicado com a intenção de se buscar um conjunto de soluções adequadas para definir alocações de água para irrigação e abastecimento urbano. A população inicial (valor fixo durante as gerações), probabilidade de *crossover* e probabilidade de mutação do AG desenvolvido foram 100, 80% e 1%, respectivamente. A estratégia de elitismo foi adotada para evitar a perda das melhores soluções. Para efeitos ilustrativos, a Figura 8 mostra os *trade-offs* entre os objetivos F1 (irrigação) e F2 (abastecimento humano) para diversos cenários de disponibilidade de água R , considerando as demandas hídricas do mês de janeiro. É importante observar que quanto mais próximo de 1, maior será o atendimento às demandas dos respectivos objetivos.

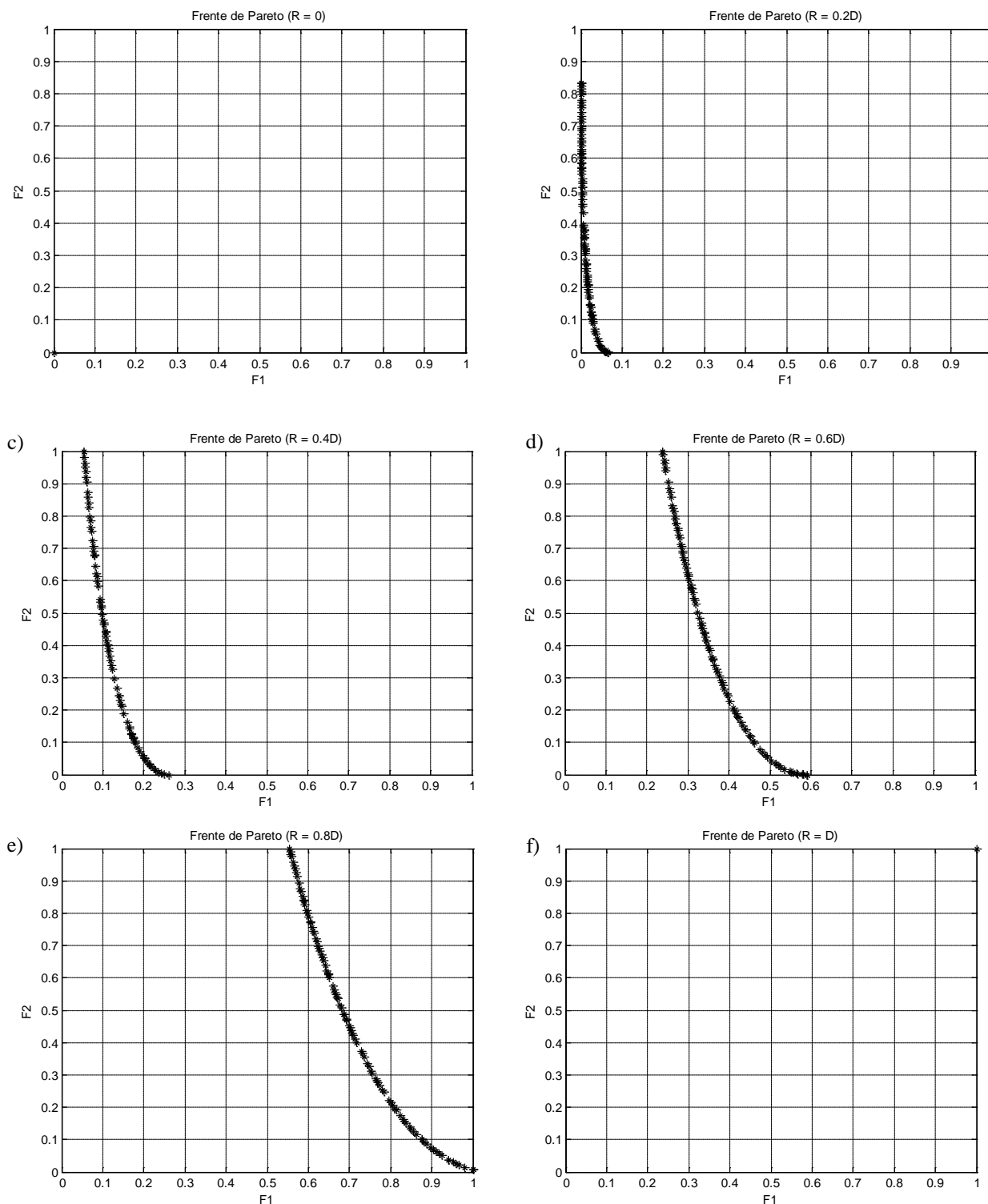


Figura 8: Trade-offs entre as funções objetivo $F1$ e $F2$, utilizando como base as demandas hídricas do mês de janeiro.

Uma análise da Figura 8 mostra que para as disponibilidades de água $R = 0\%$ e $R = 100\%$, o modelo multiobjetivo converge para soluções únicas, $F1 = F2 = 0$ e $F1 = F2 = 1$, respectivamente. Este resultado era esperado, uma vez que a disponibilidade zero de água impossibilita qualquer dos abastecimentos e que uma disponibilidade capaz de suprir todas as demandas deve atender os objetivos em 100%. Para disponibilidades entre 0 e 100%, observa-se que se pode ter vários cenários e que a melhora de um objetivo sempre significará o

detrimento do outro. Foi possível também comprovar a eficácia da técnica de AG para otimização de funções não lineares, o que nem sempre é conseguido com técnicas matemáticas de otimização.

CONCLUSÕES

Este estudo teve como principal meta o desenvolvimento e a aplicação de um modelo baseado em Algoritmos Genéticos para análise multiobjetivo das liberações dos reservatórios Coremas - Mãe d'Água, que estão localizados no semiárido paraibano.

O reservatório em estudo teve a sua operação simulada a partir de uma política de operação padrão, o SLOP, e de um modelo de otimização determinístico, que visava à minimização dos déficits hídricos durante o horizonte de operação. Com base nestes resultados, verificou-se a possibilidade e necessidade de se estabelecer regras de operação práticas mais sustentáveis que o SLOP.

Os resultados obtidos para divisão das alocações entre o abastecimento humano e a irrigação indicaram que a abordagem multiobjetivo pode ser muito útil na análise e planejamento de sistemas hídricos. Espera-se que tais métodos de análise possam contribuir para definição de estratégias que busquem a minimização de conflitos durante a operação dos reservatórios Coremas - Mãe d'água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA – Agência Nacional de Águas. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acessado em 10/01/2011.
2. Celeste, A. B., K. Suzuki., A. Kadota and V. S. Santos: Derivation of reservoir operating rules by implicit stochastic optimization, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 49(2), pp. 1111–1116, 2005.
3. Demuth H.; Beale, M.; Hagan, M. *Neural Network Toolbox 6: User's Guide*. The MathWorks Inc Natick, USA, 907 p, 2008.
4. Farias, C. A. S.: Derivation of hedging rules and forecasts by artificial neural networks for optimal real-time management of an integrated water resources system, Ph.D. Thesis, Ehime University, Matsuyama, Japan, 2009.
5. Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, Reading, USA, 1989.
6. Loucks, D. P., J. R. Stedinger and D. A. Haith: *Water Resources Systems Planning and Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA, 1981.
7. Moller, M. F.: Scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning, *Neural Networks*, Vol. 6 (4), pp. 525-533, 1993.
8. SCIENTEC, Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia: *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba: Bacias do Piancó e do Alto Piranhas*, SEPLAN, Brasil, 1997.