

## **APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

**Fabio PONTES (1); Kennedy LUCENA (1)**

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica - PB, Av. 1º de Maio nº 720 - Jaguaribe - João Pessoa - PB,  
CEP 58.015 - 430, Telefone: 3208 3073, Fax: 3208 3052, e-mail: [kennedyflavio@yahoo.com.br](mailto:kennedyflavio@yahoo.com.br)

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica - PB, e-mail: [fabiopontes123@gmail.com](mailto:fabiopontes123@gmail.com)

### **RESUMO**

As redes de distribuição de água se constituem em importante meio para promoção da melhoria da qualidade de vida das populações, através dos sistemas de abastecimento urbano, assim como para o desenvolvimento econômico, a exemplo dos projetos de irrigação. Os projetos de redes de distribuição de água mobilizam importante capital de investimento e exigem uma análise econômica criteriosa, sendo o elevado custo da rede de tubulações um dos fatores principais a ser considerado no dimensionamento. Hidraulicamente inúmeras soluções podem ser obtidas para o dimensionamento de uma rede, no entanto busca-se aquela que atenda todas as exigências físicas e operacionais com o menor custo de investimento e de operação. Muitos estudos têm dedicado especial atenção à temática nos últimos anos e diversas técnicas matemáticas têm sido propostas para subsidiar a elaboração dos projetos de redes. Dentre as principais técnicas empregadas destacam-se a programação linear, a programação não linear, a programação dinâmica e as técnicas evolucionárias. Os algoritmos genéticos se inserem nas técnicas evolucionárias e se baseiam na teoria da seleção natural dos seres vivos, onde se presenciam processos como a seleção, cruzamento e mutação, denominados de operadores dos algoritmos genéticos. Este trabalho científico tem como objetivo apresentar os resultados preliminares de um projeto de pesquisa em desenvolvimento no CEFET-PB, que tem como ênfase a construção de modelos computacionais para otimização de redes hidráulicas usando técnicas multiobjetivos. Neste estudo, fez-se uso de algoritmos genéticos para o dimensionamento de uma rede de distribuição ramificada e de uma rede malhada, onde se avaliou sua eficiência computacional para a obtenção das redes de custos mínimos. A análise dos resultados permite uma avaliação satisfatória do desempenho dos algoritmos genéticos neste tipo de problema, porém com menor eficiência que outras técnicas como o gradiente reduzido generalizado.

**Palavras-chave:** algoritmos genéticos, redes hidráulicas, dimensionamento ótimo, trabalho científico.

## **1. INTRODUÇÃO**

As redes distribuição de água constituem importante componente de uma infra-estrutura urbana ou rural e podem representar um diferencial no desenvolvimento de uma sociedade. Nas áreas urbanas as redes de distribuição têm o objetivo de garantir o abastecimento de água à população atendendo às demandas em quantidade e qualidade, enquanto que na zona rural as redes têm como principal função o atendimento do fornecimento de água para as atividades agrícolas, principalmente a irrigação cujo consumo é extremamente elevado. No dimensionamento hidráulico de sistemas de distribuição busca-se a obtenção dos diâmetros das tubulações que permitirão a condução das vazões desejadas, dentro dos limites operacionais de pressão e velocidade. Esse é um problema complexo e hidraulicamente indeterminado, que permite a análise de inúmeras soluções viáveis em termos de atendimento das demandas e das restrições hidráulicas. Entretanto, diante das possibilidades de dimensionamentos cabe ao projetista, além da análise hidráulica, uma avaliação econômica do dimensionamento, uma vez que esses projetos imobilizam considerável capital inicial e implicam em elevados custos operacionais ao longo de toda a vida do sistema. O problema de dimensionamento de redes de distribuição envolve grande número de variáveis e a solução de complexos sistemas de equações não lineares, o que tem levado vários pesquisadores a investigação de técnicas mais eficientes computacionalmente. Algumas dessas técnicas não visam à busca da solução mais econômica, o passou a ter grande impulso com a aplicação das técnicas de pesquisa operacional. Podem-se citar como estudos sobre o dimensionamento econômico de redes os trabalhos de Karmeli et al. (1968), Alperovitz e Shamir (1977) com a programação linear, Gessler e Walski (1985) usaram a enumeração exaustiva, (Granados, 1986) aplicaram a programação dinâmica, Cirilo (1997) e Lucena (2003) usaram a programação não linear. O maior problema da programação não linear é a não garantia de obtenção da solução ótima global. Nos últimos anos tem-se empregado no dimensionamento e análise de redes de distribuição uma técnica estocástica de otimização, denominada de algoritmo genético (AG), que se baseia nas técnicas evolutivas para busca da solução. Esse permite a busca fora dos pontos de mínimos locais, o que possibilita a ampliação do campo de busca e a capacidade de obter melhores soluções (Holland, 1975). Alguns dos trabalhos com a aplicação promissora dos algoritmos genéticos no dimensionamento ótimo de redes de distribuição podem-se destacar os de Savic e Walters (1997), Kumar et al. (2000), Prasad e Park (2002), Gambale (2000) e Gibbs et al. (2005). Este trabalho apresenta uma avaliação da aplicação dos algoritmos genéticos para o dimensionamento ótimo de redes de distribuição de água para rede ramificada e rede malhada, tendo como principal objetivo a obtenção dos diâmetros das redes.

## **2. METODOLOGIA**

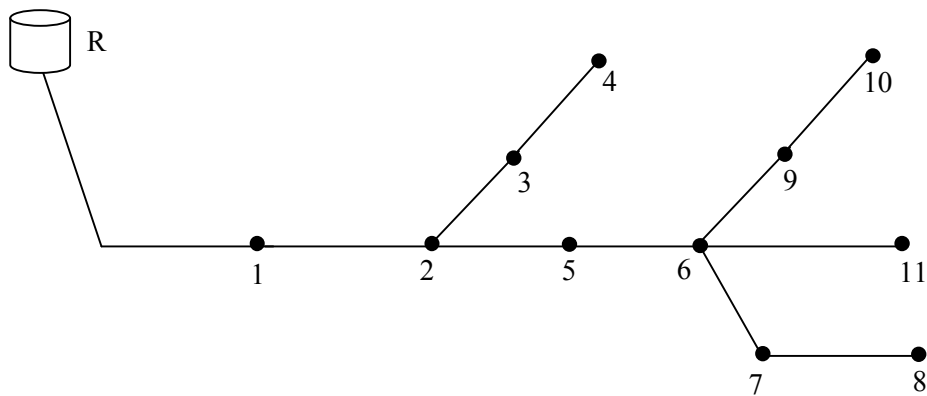
Neste trabalho utilizou-se a técnica evolutiva dos algoritmos genéticos para a análise do dimensionamento de uma rede ramificada e de uma rede malhada empregando-se o toolbox de algoritmos genéticos do software MatLab versão 7.0. Em ambas as redes as variáveis de decisão são os diâmetros das tubulações.

### **2.1. Aplicação 1: Rede ramificada**

Nesse primeiro caso tem-se uma rede ramificada onde são conhecidas as vazões nas tubulações, os comprimentos dos trechos e as cotas topográficas dos nós da rede (Tabela 1). Deseja-se obter os diâmetros das tubulações que atendam às vazões requeridas dentro das restrições de velocidades e de pressões na rede. A rede usada na aplicação 1 foi obtida em Gomes (2004) (Figura 1) e tem como cota piezométrica de cabeceira 183 m.c.a. (metro coluna de água).

**Tabela 1 – Características da rede ramificada**

Nó	Vazão (L/s)	Cota (m)	Trecho	Comprimento (m)
R	-	153	-	-
1	6,3	151	R-1	1260
2	7,5	150	1-2	320
3	20	150	2-3	312
4	20	150	3-4	380
5	10	150	2-5	365
6	0	149	5-6	360
7	12,5	149	6-7	312
8	12,5	149	7-8	340
9	15	149	6-9	320
10	15	149	9-10	323
11	17,5	149	9-11	380



**Figura 1 – Representação da rede 1 (ramificada) dimensionada**

### 2.1.1. Restrições do problema

a) Velocidades máximas e mínimas nas tubulações (m/s)

$$0,5 \leq V_i \leq 3,0$$

b) Pressões mínimas nos nós da rede (m.c.a.)

$$P_i \geq 30$$

c) Diâmetros internos máximos e mínimos das tubulações (mm)

$$108,4 \leq D_i \leq 619,6$$

Determinação das perdas de carga - Utilizou-se a equação de Darcy-Weisbach:

$$h_f = \frac{f L V^2}{2 g D} \quad (\text{Eq. 01})$$

O fator de atrito foi obtido pela fórmula de Swamee e Jain (1976), apud Gomes (2004), com a rugosidade (e) de 0,02 mm e viscosidade da água a 20 °C:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (\text{Eq. 02})$$

### 2.1.2. Função objetivo

Nessa aplicação o AG visa obter apenas a solução hidráulica do dimensionamento da rede, isto é, a determinação dos diâmetros internos não comerciais que atendem às restrições impostas para os limites de velocidades e pressões mínimas nos nós. Essas restrições foram incorporadas à função objetivo como penalizações nas soluções encontradas pelo AG que violavam alguma restrição.

A penalização para violação das velocidades máximas e mínimas foi obtida por:

$$\text{Se } 3,0 < V < 0,5 \quad \Longrightarrow \quad \text{PenV} = \sum_i^n |V_i - 3,0|, \quad \text{se NÃO} \quad \Longrightarrow \quad \text{PenV} = 0$$

De modo análogo foi obtida a penalização das para violação das pressões:

$$\text{Se } P < 30 \quad \Longrightarrow \quad \text{PenP} = \sum_i^n |P_i - 30|, \text{ se NÃO} \quad \Longrightarrow \quad \text{PenP} = 0$$

A Função objetivo ou de aptidão do AG foi calculada:

$$FO = \text{PenV} + \text{PenP} \quad (\text{Eq. 03})$$

## 2.2. Aplicação 2: Rede malhada

Nesse problema tem-se uma rede malhada onde também são conhecidas as vazões nas tubulações, os comprimentos dos trechos e as cotas topográficas dos nós da rede (Tabela 2). O objetivo nesse caso é obter os diâmetros das tubulações que atendam às vazões requeridas dentro das restrições de velocidades e de pressões na rede com o mínimo custo de investimento. A rede usada na aplicação 2 foi obtida em Gomes (2004) (Figura 2) e tem como cota piezométrica de cabeceira 97 m.c.a..

**Tabela 2 – Características da rede malhada**

Nó	Vazão (L/s)	Cota (m)	Trecho	Comp (m)
R	-		R-1	2540
1	0	6,0	1-2	1230
2	47,78	5,5	2-3	1430
3	80,32	5,5	3-4	1300
4	208,6	6,0	1-4	1490
5	43,44	4,5	1-5	1210
6	40,29	4,0	5-6	1460
-	-	-	6-4	1190

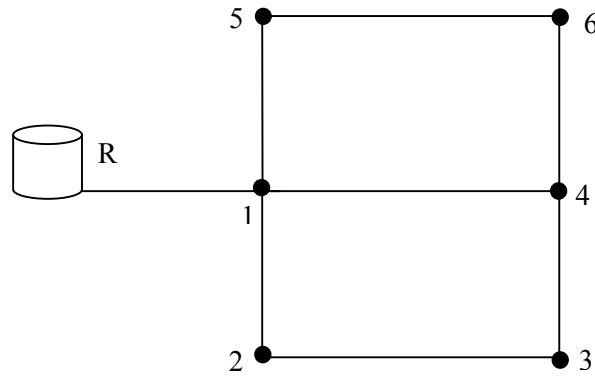


Figura 2 – Representação da rede 2 (malhada) dimensionada

### 2.2.1. Restrições do problema

a) Velocidades máximas e mínimas nas tubulações (m/s)

$$0,5 \leq V_i \leq 3,0$$

b) Pressões mínimas nos nós da rede (m.c.a.)

$$P_i \geq 25$$

c) Diâmetros internos máximos e mínimos das tubulações (mm)

$$108,4 \leq D_i \leq 619,6$$

d) Balanço de energia (Ben) nos anéis da rede – a somatória das perdas de carga nos anéis deve ser nula:

$$\sum h_{fij} = 0 \quad (\text{Eq. 04})$$

Determinação das perdas de carga - Utilizou-se a equação de Hazen-Williams com  $C = 135$ .

$$h_f = 10,67 Q^{1,852} C^{-1,852} L D^{-4,87} \quad (\text{Eq. 05})$$

### 2.2.2. Função objetivo

Nessa aplicação o AG visa além de obter a solução hidráulica do dimensionamento da rede, isto é, a determinação dos diâmetros internos não comerciais que atendem às restrições impostas busca encontrar a solução de mínimo custo. As restrições foram incorporadas à função objetivo como penalizações nas soluções encontradas pelo AG que violavam alguma restrição. Foram usados os mesmos limites de diâmetros anteriores.

A penalização para violação das velocidades máximas e mínimas foi obtida por:

$$\text{Se } 3,0 < V < 0,5 \quad \Longrightarrow \quad \text{PenV} = \alpha, \quad \text{se NÃO} \quad \Longrightarrow \quad \text{PenV} = 0$$

De modo análogo foi obtida a penalização das para violação das pressões:

$$\text{Se } P < 25 \quad \Longrightarrow \quad \text{PenP} = \delta, \quad \text{se NÃO} \quad \Longrightarrow \quad \text{PenP} = 0$$

A penalização para violação do balanço de energia (Ben) nos anéis foi obtida por:

$$\text{Se } 0,02 < \sum h_{fij} < -0,02 \implies \text{PenBen} = \varphi |\text{erro Ben}|, \text{ se NÃO } \implies \text{PenBen} = 0$$

A Função Objetivo ou de Aptidão do AG foi calculada por:

$$FO = \sum_i^n (0,002 D_i^2 + 1,1074 D_i - 115,25) L_i + (\text{PenV} + \text{PenP} + \text{PenBen}) \quad (\text{Eq. 06})$$

O primeiro termo da Eq. 06 representa o custo com as tubulações da rede e os segundo as penalidades. Os fatores  $\alpha$ ,  $\delta$  e  $\varphi$  são os pesos atribuídos às soluções que violam restrições.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um dos fatores que interferem diretamente no desempenho dos algoritmos genéticos é a obtenção da melhor combinação dos seus operadores. Nos dois problemas analisados, embora alguns autores já tenham diagnosticado indicadores para a melhor eleição desses operadores, cada situação em particular pode ser determinante na busca da melhor solução do problema. Nos dois problemas analisados as restrições foram incorporadas à função objetivo através de funções de penalizações. No primeiro problema, aplicação 1, buscou-se apenas no dimensionamento da rede a solução hidráulica, isto é, a combinação de diâmetros das tubulações que atendessem a todas as restrições físicas do modelo: limites de velocidades, pressão e de diâmetros. No segundo problema, aplicação 2, o dimensionamento da rede procurou, além de atender às restrições hidráulicas, obter a solução de menor custo.

Nas tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados para as duas redes dimensionadas. Foram testadas várias combinações para os operadores do AG e encontrou-se uma solução satisfatória com os operadores da tabela 3. Na aplicação 1 o AG obteve alto desempenho, ou seja, o tempo de processamento para encontrar solução foi reduzido em função do baixo número de gerações necessárias. Pode-se observar que os diâmetros obtidos estão apenas próximos dos obtidos usando-se a técnica do GRG2, uma vez que não se buscou a solução mais econômica da rede e que para esse tipo de problema inúmeras soluções são possíveis. Considerando-se que a principal restrição do problema foi a pressão mínima de operação da rede (30 m.c.a.), os resultados demonstraram que o AG se comportou adequadamente, pois buscou obter a pressão mínima exigida, o que induz a um dimensionamento sub-ótimo do ponto de vista econômico. As penalizações adotadas para o problema atenderam plenamente às restrições do modelo e, nesse caso, a não violação das restrições implicou em anular a função objetivo o que foi conseguido com sucesso. Nesse tipo de aplicação do AG o principal fator para obtenção da eficiência do algoritmo é a modelação das penalizações e não os operadores do AG.

**Tabela 3 – Comparação entre os dimensionamentos da rede 1 obtidos pelos Algoritmos Genéticos e pelo Gradiente Reduzido Generalizado 2 (Diâm. em mm, Vel. em m/s e Pressão em m.c.a.)**

Operadores do AG		Trecho	Diâm (AG)	Vel.	Diâm. (GRG2)	Nó	Pressão (AG)	Pressão (GRG2)
<b>População</b>	100	<b>R-1</b>	494,24	0,71	489,40	<b>R</b>	-	
<b>Fitness</b>	rank	<b>1-2</b>	485,26	0,70	434,75	<b>1</b>	31,04	31,00
<b>Seleção</b>	roleta	<b>2-3</b>	227,14	0,98	284,43	<b>2</b>	31,80	31,59
<b>Reprodução</b>	elit. 1 – cross. 0,73	<b>3-4</b>	223,73	0,50	222,42	<b>3</b>	30,71	31,22
<b>Mutação</b>	0,035	<b>2-5</b>	326,33	0,98	415,34	<b>4</b>	30,31	30,81
<b>Crossover</b>	um ponto	<b>5-6</b>	396,46	0,58	409,34	<b>5</b>	30,97	31,33
<b>Gerações</b>	50	<b>6-7</b>	213,60	0,69	239,95	<b>6</b>	31,73	32,12
-	-	<b>7-8</b>	150,82	0,70	135,29	<b>7</b>	31,10	31,77
-	-	<b>6-9</b>	260,40	0,56	225,95	<b>8</b>	30,06	30,00
-	-	<b>9-10</b>	174,20	0,62	149,46	<b>9</b>	31,39	31,44
-	-	<b>6-11</b>	194,98	0,58	180,26	<b>10</b>	30,70	30,00
-	-	-	-	-	-	<b>11</b>	31,11	31,22

Na tabela 4 são apresentados os resultados para a aplicação 2, dimensionamento de uma rede malhada. No caso de redes malhadas tem-se um problema mais complexo em função de restrições mais severas como o balanço de energia nos anéis. Nessa aplicação do AG buscou-se, além da solução hidráulica, a solução mais econômica da rede, isto é, a combinação de diâmetros que implicou no menor custo da rede. Após a avaliação de vários operadores do AG a solução mais satisfatória foi obtida com os operadores da tabela 4. O desempenho do AG na aplicação 2 foi pouco inferior à aplicação 1 em função da maior complexidade da rede e do objetivo de minimizar o custo. Pode-se verificar na tabela 4 que o GRG2 foi mais eficiente que o AG na obtenção da rede de custo mínimo, porém com diferença de apenas 1,43% nos custos. Isso pode ser constatado também pela folga nas pressões obtidas pelo AG. Essa pequena diferença entre os diâmetros obtidos é irrelevante se considerarmos a aproximação com os diâmetros comerciais. Quanto aos operadores do AG verificou-se a necessidade de maior número de indivíduos na população inicial e de gerações, porém com tempo de processamento computacional cerca de 4 minutos. Observou-se que a aplicação do elitismo para manter o melhor indivíduo após o atendimento de cada restrição exige uma taxa de mutação superior aos convencionalmente usados nesse tipo de problema, com o objetivo de melhorar a solução econômica da rede. Dentre as penalizações adotadas para o problema o balanço de energia nos anéis foi a mais difícil de minimizar. A solução obtida pelo AG, assim como na aplicação 1, também apresentou maior folga nas pressões da rede, o que foi provocado pelo primeiro trecho dimensionado da rede.

**Tabela 4 – Comparação entre os dimensionamentos da rede 2 obtidos pelos Algoritmos Genéticos e pelo Gradiente Reduzido Generalizado 2 (Diâm. em mm, Vel. em m/s e Pressão em m.c.a.)**

Operadores do AG		Trecho	Diâm. (AG)	Vel.	Diâm. (GRG2)	Nó	Pressão (AG)	Pressão (GRG2)
<b>População</b>	200	<b>R-1</b>	446,90	2,67	434,48	<b>R</b>		
<b>Fitness</b>	rank	<b>1-2</b>	290,63	2,05	291,65	<b>1</b>	59,86	55,28
<b>Seleção</b>	estoc. unif	<b>2-3</b>	254,18	1,74	255,04	<b>2</b>	45,11	40,79
<b>Reprodução</b>	elit. 1 - cross. 0,74	<b>3-4</b>	120,94	0,71	121,34	<b>3</b>	29,80	25,72
<b>Mutação</b>	0,081	<b>2-4</b>	296,35	3,01	297,33	<b>4</b>	25,00	25,00
<b>Crossover</b>	heurístico	<b>2-5</b>	229,45	1,83	231,65	<b>5</b>	45,36	41,51
<b>Gerações</b>	500	<b>5-6</b>	177,22	1,31	177,64	<b>6</b>	31,82	28,13
		<b>6-4</b>	115,37	0,75	114,43			
<b>Custo da rede (AG)</b>		R\$ 2.294.586,61		<b>Custo da rede (GRG2)</b>		R\$ 2.262.132,59		

Aplicando-se o AG no dimensionamento da rede malhada tendo-se também como variável a altura piezométrica de cabeceira obteve-se melhores resultados que o anterior. Com a nova altura piezométrica otimizada de 99,3 m.c.a. o custo da rede reduziu para R\$ 2.277.292,39. Esse resultado também demonstra a capacidade do AG em solucionar problemas com variáveis diversas e com valores escalares distintos.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicada a técnica dos algoritmos genéticos para a o dimensionamento de duas redes de distribuição de água, sendo uma ramificada e uma malhada, tendo-se os objetivos de obter a solução hidráulica e a minimização dos custos da rede. A solução do modelo desenvolvido foi obtida utilizando-se a ferramenta de algoritmos genéticos do software MatLab. Pelos resultados encontrados pode-se constatar que os algoritmos genéticos tiveram desempenho satisfatório para esse tipo de problema. A inserção de penalidades na função objetivo para atender às restrições do modelo exige tratamento criterioso e interfere diretamente nos operadores do AG, mas foi adequada ao problema. O uso das penalizações na função objetivo exigiu que a aplicação do elitismo nas otimizações e uma maior taxa de mutação que a convencional. Problemas com várias restrições conflitantes como os tratados neste trabalho podem ser objeto de estudo de técnicas evolucionárias multiobjetivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. (1977). *Design of optimal water distribution systems*. Water Resources Research. New York, v. 13, n. 6, p. 885-900.
- CIRILO, J. A. (1997). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos* - Coleção ABRH vol. 6. Porto Alegre: Editora da Universidade - UFRGS. cap 6, p. 305-359.
- GAMBALE, S. R. (2000). *Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água*. São Paulo. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- GESSLER, J.; WALSKI, T. M. (1985). Technical Report EL-85-11: *Water distribution system optimization*, DC, USA: U.S. Army Corps Engineers, Washington.
- GIBBS, M. S.; DANDY, G. C.; MAIER, H. R.; NIXON, J. B. (2005). *Selection of Genetic Algorithm Parameters for Water Distribution System Optimization*. World Water and Environmental Resources Congress, May 15–19, 2005, Anchorage, Alaska, USA
- GOMES, H. P. (2004). *Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes elevatórias*. 2. edição João Pessoa: Editora Universitária-UFPB. 2004, 242p.
- GRANADOS, A. (1986). *Infraestructuras de Regadíos - Redes Colectivas de Riego a Presión*. Madrid: Servicio de Publicación de E. T. S. I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.
- HOLLAND, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MIT Press.
- KARMEI, D.; GADISH, Y ; MEYERS, S. (1968). *Design of optimal water distribution networks*, Journal of Pipeline Division, ASCE New York, v. 94, n. 10, p. 1-10.
- KUMAR, S. V.; DOBY, T. A.; BAUGH, J. W.; BRILL, E. D.; RANJITHAN, S. R. (2000). *Method for Least Cost Design of Looped Pipe Networks for Different Levels of Redundancy Using Genetic Algorithms*. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning & Management, July 30 – August 2, 2000, Minneapolis, Minnesota, USA
- LUCENA, K. F. M. *Modelo de otimização para o dimensionamento e operação de sistemas de microirrigação*. Universidade Federal de Campina Grande - PB. Tese de Doutorado. 187 p.
- PRASAD, T. D.; PARK, N. (2004). *Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 130, n.1, p. 73-82
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G.A. (1997). *Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 123, n. 2, p. 67-77.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Fundo Setorial de Recursos Hídricos (CT-HIDRO), do governo brasileiro, pelo apoio financeiro para realização do estudo e ao Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba.