

## PSO aplicada à redução do custo de energia em redes de abastecimento de água

Bruno Melo Brentan <sup>\*1</sup> & Edevar Luvizotto Jr <sup>2</sup> & Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro <sup>3</sup>

**Resumo** – O crescimento da população urbana e decorrente expansão das cidades impõem dificuldades de congregar sistemas de abastecimento de água confiáveis para o atendimento das flutuações de demandas ao longo do dia, com parâmetros hidráulicos adequados. A busca por rotinas ótimas para o bombeamento de água, tanto com partida e parada de bombas ou com uso de inversor de frequência tem se tornado cada dia mais comum, tendo em vista a necessidade de economia de energia. Porém a tarefa é árdua e se torna campo propício para a aplicação de técnicas modernas e robustas de otimização. Destacam-se atualmente as que buscam sua inspiração na natureza, como a PSO, *Particle Swarm Optimization*, técnica baseada na inteligência de grupos, como cardumes de peixe ou enxames de abelha. Neste sentido, esse trabalho visa contribuir com o tema, desenvolvendo um algoritmo híbrido (simulador-otimizador) para determinação de rotinas otimizadas para o bombeamento de uma instalação de recalque, ou seja, rotinas que busquem a melhor rotina operacional para um período extensivo de 24 horas.

**Palavras-Chave** – Bombeamento de Água, Inversores de Frequência, PSO

### INTRODUÇÃO

O cenário de necessidade constante de expansão, resultado da franca expansão das áreas urbanas, reflete no consumo de energia elétrica do setor de abastecimento de água, cerca de 3% do total consumido pelo país (PROVINELLI, NETO, *et al.*, 2009). Ademais, com exceção das chamadas “*energias limpas*”, a geração de energia é impactante ao meio ambiente e, desafortunadamente as formas mais empregadas atualmente estão entre as mais severas. Alguns dados indicam que os sistemas de bombeamento representam uma emissão de milhões de toneladas de carbono ao ano (EPE, 2012).

Rotinas operacionais otimizadas, sejam relacionadas às manobras de partida e parada das bombas, sejam relacionadas à mudança da rotação via inversor de frequência, trazem significativa redução no consumo de energia, como pode ser observado na literatura. (RIBEIRO, 2007), (RODRIGUES, 2007). Dentre as principais técnicas de otimização empregadas na busca de melhores rotinas operacionais do bombeamento de água, destacam-se a Programação Dinâmica (JOWITT e GERMANOPOULOS, 1992), e técnicas evolucionárias como Algoritmo Genético (ANDRADE, *et al.*, 2008), (FARMANI, SAVIC e WALTERS, 2007) e o próprio PSO (AL-ANI, 2012).

O emprego de rotinas computacionais capazes de simular instalações operando com inversores de frequência, que permitam avaliar cenários de funcionamento e das máquinas ou

---

<sup>1</sup> Afiliação: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, FEC - UNICAMP

<sup>2</sup> Afiliação: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, FEC – UNICAMP

<sup>3</sup> Afiliação: Faculdade de Tecnologia, FT - UNICAMP

variação da rotação destas, são importantes para a determinação de operações otimizadas, considerando-se o desempenho energético e hidráulico dessas instalações. O acoplamento de algoritmos de otimização a simuladores hidráulicos tem se mostrado ferramenta adequada a diversos problemas relacionados ao abastecimento de água. (MORENO, 2007).

Neste sentido a pesquisa proposta visa contribuir com o tema, desenvolvendo um algoritmo híbrido (simulador-otimizador) para determinação de rotinas que atendam às restrições impostas ao sistema de distribuição de água em análise e minimizem o custo energético.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A questão energética e as estações elevatórias

Responsáveis por grande parte do consumo de energia, as estações elevatórias surgem como protagonistas nos estudos de redução do consumo de energia dentro do setor de saneamento básico. O motor elétrico é responsável por transmitir rotação às partes girantes da bomba e podem ser à corrente contínua ou à corrente alternada síncronos e assíncronos, sendo que os síncronos são os mais empregados em instalações de recalque. Em condições reais sofre a chamada perda por escorregamento ( $s$ ), que é decorrente da diferença entre as velocidades do estator e rotor, desta forma a rotação assíncrona ( $N$ ) é dada por:

$$N = \frac{120f}{p} (1 - s) = N_s(1 - s) \quad (1)$$

A alteração da rotação nominal ( $N_R$ ), para uma rotação inferior qualquer ( $N_i$ ), através da modificação da frequência, pode ser escrita, na forma adimensional, tomando a frequência nominal ( $f$ ) de 60 Hz, como:

$$\alpha = \frac{N_i}{N_R} = \frac{f_i}{60} \quad (2)$$

sendo,  $f_i$  a frequência que define a rotação ( $N_i$ ) e  $\alpha$  o adimensional de rotação associado.

A mudança da rotação nominal para uma rotação qualquer modifica o ponto de funcionamento da bomba, observada através das suas leis de semelhança física:

$$Q = \alpha Q_R, \quad H = \alpha^2 H_R, \quad P = \alpha^3 P_R \quad \eta_p = \eta_{pR} \quad (3)$$

em que o subscrito  $p$  foi empregado para especificar o rendimento ( $\eta$ ) associado à bomba, o índice  $R$ , à condição na rotação nominal.  $Q$ ,  $H$  e  $P$ , representam a vazão, a carga hidráulica e a potência associada à bomba respectivamente.

A potência elétrica ( $P(\alpha)$ ) necessária para o recalque de uma vazão  $Q$ , atendendo uma determinada carga  $H$ , para uma dada rotação ( $N$ ), pode ser calculada através da expressão:

$$P(\alpha) = \frac{\gamma Q H}{\eta_t} \quad (4)$$

sendo  $\gamma$ , o peso específico da água. O rendimento ( $\eta$ ) representa o rendimento total do conjunto motor, inversor, bomba e outros.

O consumo mínimo desejado de energia elétrica pode ser expresso, para um período ( $P_e$ ), constituído por intervalos iguais de tempo ( $i$ ) por:

$$f(\alpha) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^{P_e} f_i \cdot c \cdot P(\alpha)_{n,i} \quad (5)$$

em que  $c$  é o custo da energia elétrica para o intervalo de tempo  $i$ ,  $f_i$  é o fator que sobretaxa o custo de energia se o intervalo de tempo representar uma condição adversa, como por exemplo um

horário de ponta. A potência  $P(\alpha)_{n,i}$  é a potência elétrica necessária para o recalque da vazão demanda  $Q$  pelo sistema no período, a uma dada carga  $H$ , de uma bomba  $n$ , necessária para atender os requisitos operacionais.

### Técnicas de otimização, Inteligência de grupo e o PSO

Num ambiente de enxames, pressupõe-se a existência de certo grau de desordem, aleatoriedade que leva, de alguma maneira, a resolução de problemas com sucesso (MEYER e CHRISTOFER, 2005). Para entender o comparativo, é preciso conhecer um pouco mais dos conceitos de um ambiente sociocognitivo, ou seja, conhecer o ambiente que se insere o indivíduo para compreender seu comportamento, visto que estudos comprovaram que as decisões finais de um indivíduo são balizadas por suas experiências pessoais e sua troca de informação com o meio em que se insere. Dentre os principais algoritmos com base na Inteligência de Enxame, encontra-se a PSO, *Particle Swarm Optimization*, desenvolvido por Eberhart e Kennedy em 1995 e aperfeiçoado por Eberhart e Shi, os quais implantaram a constante de inércia no método (EBERHART e KENNEDY, 1995) e (RUSSEL, EBERHART e SHI, 2001).

A PSO enquadra-se dentro de uma série de outros algoritmos, os chamados algoritmos evolucionários, que se baseiam principalmente em dois aspectos: todos eles são de base populacional, assim todos os algoritmos se norteiam na experiência encontrada em populações ou enxames que trabalham diariamente como um grupo, numa ajuda mútua, para a solução dos problemas. O segundo aspecto importante é a comunicação entre os elementos do enxame ou população, ou seja, os indivíduos da população trocam informações, atualizando-se com fontes de dentro do grupo (RUSSELL, EBERHART e SHI, 1998). Como exemplo, pode-se citar bando de pássaros em busca de alimentos. Cada indivíduo do bando tem sua inteligência, porém o bando todo se comporta como um “macro indivíduo”, podendo se identificar comportamentos comuns e movimentos coordenados.

Supondo que o problema a ser otimizado tenha  $D$  dimensões e que o problema seja constituído por  $i$  partículas, cada partícula,  $X_i$  do enxame é descrita por um vetor com  $D$  dimensões sendo,  $X_i=(x_{i1},x_{i2},x_{i3},\dots,x_{iD})$ . A velocidade dessa partícula também pode ser descrita por um vetor com  $D$  dimensões, em que cada componente do vetor  $V_i$  representa a velocidade da partícula  $i$  na dimensão  $D$  assim  $V_i=(v_{i1}, v_{i2},v_{i3}\dots v_{iD})$ .

Entre si as partículas comparam suas posições e relembram-se das soluções anteriores, guardadas em sua “memória”. Essa solução também é repassada às partículas vizinhas, para que o grupo possa avaliar qual a melhor momentaneamente. Avaliada a melhor solução dentre todas as partículas, o método trabalha para que as partículas distantes aproximem da mesma. Esse movimento é guiado por essa solução global. Na comparação, a melhor posição da partícula  $i$  é armazenada num vetor denominado *lbest* (*melhor valor local*) descrito por  $P_i=(p_{i1},p_{i2},p_{i3}\dots p_{iD})$  e a melhor solução do enxame é armazenado num vetor denominado *gbest* (*melhor valor global*).

O comportamento do enxame pode ser descrito pelas equações abaixo:

$$v_{id}^{n+1} = \left[ w \cdot v_{id}^n + \frac{c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id}^n - x_{id}^n)}{\Delta t} + \frac{c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{id}^n - x_{id}^n)}{\Delta t} \right] \quad (6)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \cdot \Delta t \quad (7)$$

onde  $d = 1,2,\dots,D$ ,  $n = 1,2,\dots,N$  e  $N$  é número de iterações. Ainda  $r_{1,i,d}$  e  $r_{2,i,d}$  são números escolhidos de forma randômica dentro do intervalo  $[0,1]$  e  $n$  representa a iteração atual.

O coeficiente de inércia  $w$  tem a função de coordenar a exploração do espaço de busca, levando a partícula para a direção de movimento atual. Inicialmente a inércia era um coeficiente constante, mas segundo DARAEIKHAH, MERAJI e AFSHAR (2009), experiências mostraram que valores maiores para a inércia facilitavam a exploração dos valores globais, enquanto valores menores da inércia facilitavam as buscas locais. Para uma melhor eficiência do método então, convencionalmente, utiliza-se o valor da inércia variando segunda a iteração corrente. Assim no início do método utiliza-se valores maiores, promovendo uma varredura mais rápida do espaço de busca, e ao longo das iterações esse valor vai diminuindo, aprofundando as buscas locais.

### ESTUDO DE CASO

Para o estudo do modelo otimizador foi utilizada a rede fictícia abaixo:

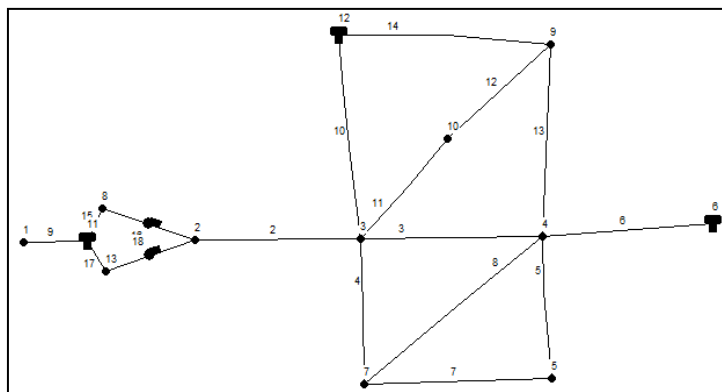


Figura 1 – Topologia fictícia

A rede é composta por 3 reservatórios de nível variado, duas bombas além de 10 nós e 14 tubos. Para o PSO foi utilizada a inércia variável, com  $w$  variando entre 0,4 e 0,8, valores amplamente citados na literatura como facilitadores da convergência para problemas multidimensionais. Além disso, foram utilizadas 96 partículas com 3000 iterações.

Segue dados da rede:

Tabela 1 – Configuração de demandas base nos nós

Nós	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Demanda	-210	0	0	0	70	0	7	0	70	20	0	0	0

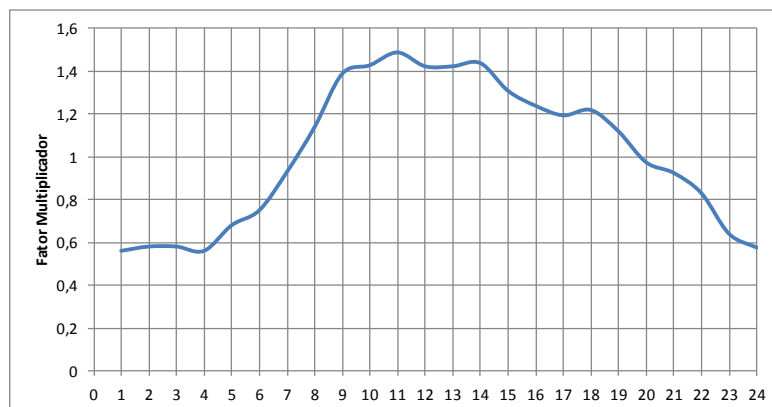


Figura 2 – Curva Neutra de Demanda

Tabela 2 – Configuração dos tubos

Tubo	L(m)	D(mm)	C
2	300	250	120
3	200	200	120
4	150	200	120
5	200	200	120
6	200	250	120
7	200	200	120
8	200	200	120
9	1000	100	100
10	125	200	120
11	125	200	125
12	125	200	120
13	150	200	120
14	200	200	120

Tabela 3 – Curva da bomba

Hs	Qr	Hr	Qt	Ht
50	100	43	110	32,8

A fim de adicionar as restrições operacionais que um sistema de abastecimento de água está sujeito (nível de reservatório mínimo e máximo e pressões operacionais limitadas por norma), fez-se uso de funções de penalização da função objetivo. Essas funções podem ser escritas como:

$$\text{Se } g_i(x) \geq 0 \rightarrow \rho_i(x) = 0;$$

$$\text{Se } g_i(x) < 0 \rightarrow \rho_i(x) > 0.$$

em que  $g_i(x)$  é uma função que relaciona uma grandeza  $g$  ao elemento  $i$  e  $\rho_i(x)$  é a função de penalização. Para o exposto acima, a função de penalização só é ativada se a grandeza  $g$  fica abaixo de 0, do contrário a função tem valor nulo. Conseqüentemente a função objetivo pode ser reescrita como

E a função objetivo, que antes podia ser escrita como  $f(\alpha)$ , passa a ser:

$$Z(x) = f(\alpha) + \sum_i^n \rho_i(\alpha) \tag{8}$$

Após as simulações pode-se validar o método de otimização, encontrando assim valores de custo de bombeamento inferiores aos custos do sistema operando com a bomba à rotação plena. Essa economia chega a 26% do custo total, com rotações acima de 80% da rotação nominal. A tabela abaixo apresenta os valores finais.

Tabela 1 – Valores do custo operacional diário

Rotação	Custo Operacional
Fixa	U.M 2410,55
Otimizada	U.M 1783,85

A seguir, ilustra-se o comportamento do nível dos reservatórios. É evidenciado nesses gráficos que no horário de pico há esvaziamento dos reservatórios, o que é relevante para a economia de energia.

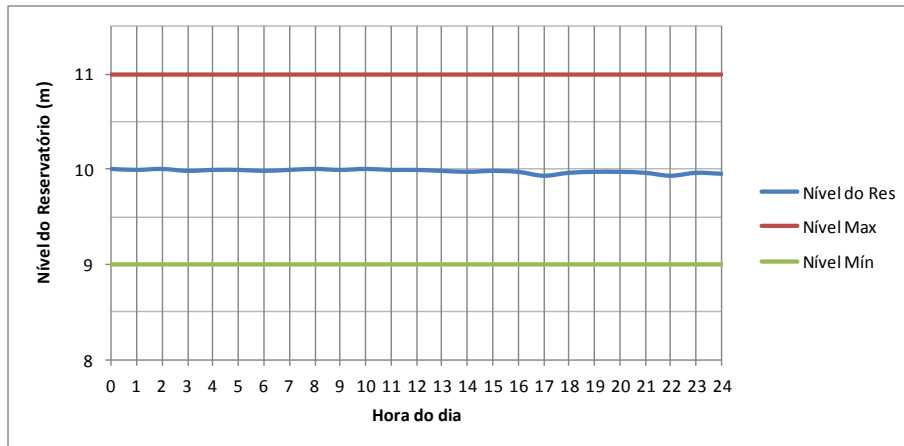


Figura 3 – Nível do reservatório a montante do bombeamento – RNV 11

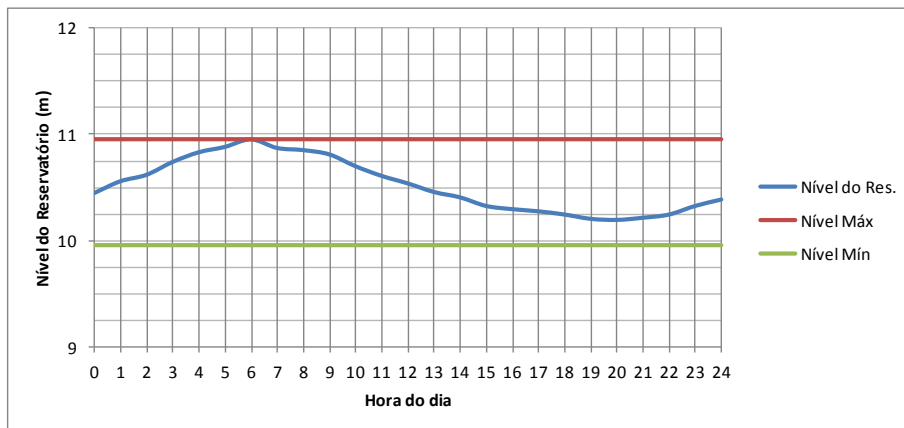


Figura 4 – Nível do reservatório a jusante do bombeamento – RNV 12

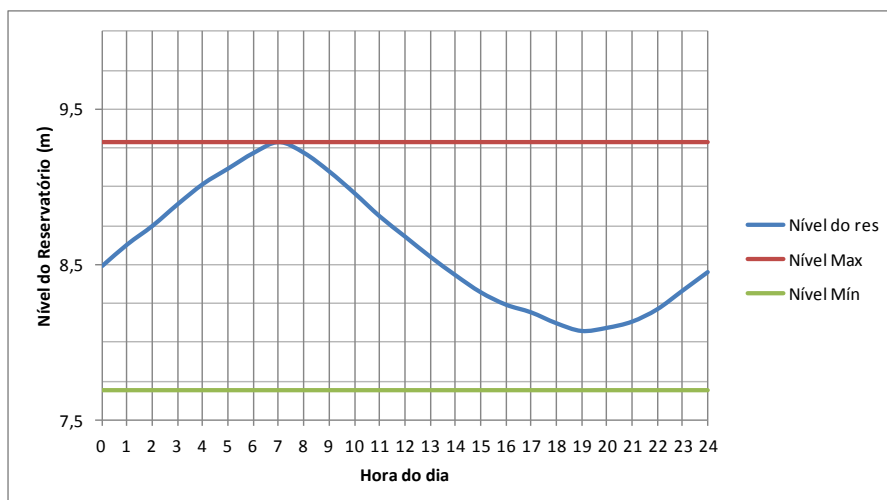


Figura 5– Nível do reservatório a jusante do bombeamento – RNV 06

Além de minimizar os custos de energia, a rotina operacional otimizada propicia uma alívio nas pressões dos nós. Esse alívio pode ser observado no gráfico abaixo, tomando como referencia o nó 03.

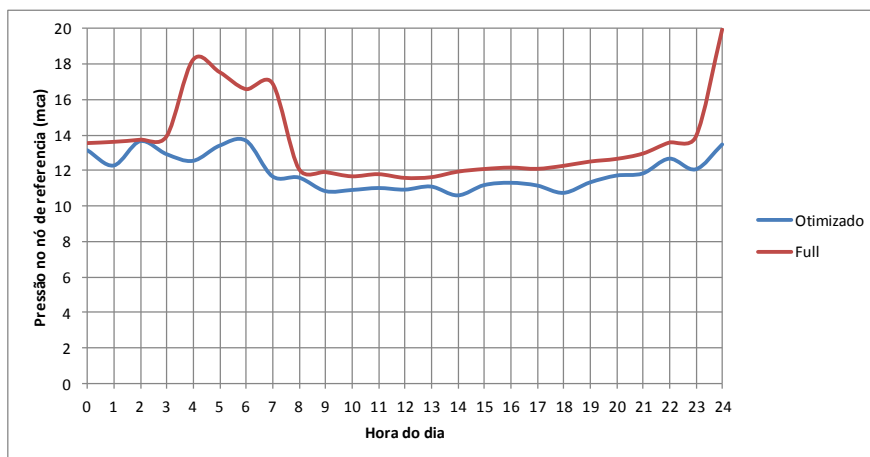


Figura 6 – Comparativo entre pressões para cenário otimizado e cenário com rotação fixa – Nó 03

A principal vantagem de obter uma rede com pressões mais baixas e que oscilem menos está na redução dos efeitos de fadiga ao longo do tempo útil das redes.

## CONCLUSÕES

O uso de inversores de frequência nas redes tem se mostrado cada dia mais comum. Obter regras de operação para que seu uso seja adequado é de suma importância, permitindo o uso racional dos insumos energéticos, operando com uma rede menos carregada, com pressões mais baixas e oscilando mais o nível dos reservatórios. Nesse trabalho apresentou-se um sistema de otimização das rotações com um inversor de frequência baseado no movimento de enxames ou de bandos, buscando um valor de ótimo com o intuito de minimizar o custo de operação de uma rede estudada.

Fica evidenciado que o uso de rotinas otimizadoras acopladas a simuladores hidráulicos são ferramentas poderosas na operação dos sistemas de abastecimento, levando a reduções significativas no consumo de energia. Pode-se observar ainda, a partir dos resultados apresentados que os reservatórios de nível variado a jusante do bombeamento cumprem um papel crucial para essa redução do consumo de energia, visto que nos horários de pico são esvaziados até valores próximos do mínimo, reduzindo assim o consumo pela bomba.

Por fim, os novos paradigmas impostos pela profunda necessidade de redução do consumo de energia tem levado o setor de saneamento a repensar em suas rotinas operacionais. Acompanhando as novas tendências dos métodos de otimização, esse trabalho propôs o acoplamento de rotina evolutiva de otimização ao simulador hidráulico, permitindo assim, avaliação criteriosa das rotações horárias do sistema motobomba com o intuito de se enquadrar no novo cenário energético apresentado.

## REFERENCIAS

AL-ANI, D. (2012) Optimal Pump Operation for Water Distribution Systems using a New Multi-Agent Particle Swarm Optimization Technique With Epanet. 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Montreal: IEEE.

ANDRADE et al. (2008) Previsão de Custos de Energia em Recalques Operados com Inversores de Frequência Usando Epanet Toolkit. VIII Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem. Lisboa: [s.n.].

DARAEIKAH, M.; MERAJI, S. H.; AFSHAR, M. H. (2009) Application of Particle Swarm Optimization to Optimal Design of Cascade Stilling Basins. *Sciencia Iranica, Transaction A: Civil Engineering*, Vol. 16, No. 1, p. 50-57.

EBERHART, J.; KENNEDY, R. (1995) Particle swarm optimization. *Neural Networks - IEEE*, p. 1942-1948 vol.4, 1995.

EPE. Balanço Energético Nacional 2012. (2012) Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, Brasil.

FARMANI, R.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2007) Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. *Engineering Optimization*, 25 January 167-183

JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G. (1992) Optimization Pump Scheduling in Water-Supply. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, p. 406-422,

MEYER, E. B.; CHRISTOFER, J. (2005) *Swarm Intelligence: a Whole New Way to Think about Business*. [S.l.]: Harvard Business Review.

MORENO, M. A. et al. (2007) Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosystems engineering*, p. 479-486.

PROVINELLI, J. et al. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico 5.(2009)Brasil.

RIBEIRO, L. C. L. J. (2007) Modelo Híbrido Multiobjetivo para Obtenção de Roteiros Operacionais de Bombas de Rotação Variável em Instalações Hidráulicas. Campinas: Unicamp.

RODRIGUES, W. (2007) Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de água. Campinas: Tese de Doutorado, FEC, Unicamp.

RUSSEL, C.; EBERHART, R.; SHI, Y. ( 2001) Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources. *Evolutionary Computation - IEEE*, p. 101-106