

## USO RACIONAL DE ENERGIA NO BOMBEAMENTO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO, VIA PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

Adalberto Aragão de Albuquerque<sup>1</sup>, Mosefran Barbosa Macedo Firmino<sup>2</sup>  
e Wilson Fadlo Curi<sup>2</sup>

**Resumo** - Nas empresas de saneamento, as despesas com energia elétrica já figuram como sendo uma das maiores, na maioria das empresas brasileiras, logo após as despesas com pessoal. É de amplo conhecimento das pessoas que tratam desse assunto, que o grande consumo de energia elétrica nessas empresas é oriunda de motores e que chegam a superar 90% do total do consumo das empresas. Então, este trabalho apresenta uma metodologia de otimização do funcionamento dos conjuntos motores-bomba, via programação não-linear. Esta metodologia foi aplicada ao sistema principal de abastecimento de Campina Grande, cidade paraibana de aproximadamente 400 mil habitantes, responsável pelo abastecimento de 29 reservatórios de distribuição, uma malha de 450km de rede de distribuição de água, com um total de 83.500 ligações domiciliares e uma demanda média de 60890,4m<sup>3</sup>/dia.

**Palavras-chave:** otimização; programação não-linear; operação de bombas.

**Abstract** - The expenses with energy consumption, within Brazilian water treatment and supply companies, are among the greatest ones, coming just after of their personnel ones. Up to 90% of the energy consumption in those companies is related to the motors' operations to pump water within the system. This work presents an optimization modeling procedure, via non linear programming, to minimize the pumping energy consumption cost while attending the physical and operational system requirements. The decision variables are the 24 hourly fraction of time for each pumping system. This model has been applied to the main part of the Campina Grande city water supply system, which is responsible to supply 29 distribution reservoirs within a framework of 450 km pipe-network, 400,000 people, 83,500 houses and a demand of 60,890.3 m<sup>3</sup>/day.

**Key words:** optimization, nonlinear programming, pump operation

---

<sup>1</sup> Doutorando em Recursos Naturais da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande e Engenheiro da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba –CAGEPA, email: [aragão@cagepa.gov.pb.br](mailto:aragão@cagepa.gov.pb.br), fone: (83) 331-1022

<sup>2</sup> Graduando e Professor PhD, respectivamente, da Unidade Acadêmica de Física da UFCG - Av. Aprígio Veloso, 882 - Bloco CY - Bodocongó CEP: 58.109-970, Campina Grande, Pb, emails: [mosefran@df.ufcg.edu.br](mailto:mosefran@df.ufcg.edu.br), [wfcuri@yahoo.com.br](mailto:wfcuri@yahoo.com.br), fone: (83) 310-1195, fax: (83)310-1005

## INTRODUÇÃO

A possibilidade de corte de luz nos lares e até nas cidades de uma vasta região do Brasil é uma ameaça que incomoda e até apavora o cidadão, além dos prejuízos significativos que possa causar à economia do país e ao bem-estar das populações. Essa situação incômoda tem propiciado lições proveitosas, entre outras, sobre a importância de se evitar desperdícios. O sistema de abastecimento de água consome entre dois e três por cento da energia do mundo utilizando no bombeamento e tratamento de água para residências urbanas e industriais [USEPA, 1998]. O enfoque do presente trabalho relaciona-se, contudo, ao funcionamento das Estações Elevatórias (EE) e Estações de Tratamento de Água (ETA) para distribuição e abastecimento de água.

Como fornecedores de água para quase 50 por cento da população mundial, as companhias de água exercem um papel vital no gerenciamento deste recurso de fácil escassez. Como a migração para as cidades continua, as companhias de água têm a complexa tarefa de fornecer água com custo otimizado para manter as cidades funcionando. Os recursos limitados de energia, suprimentos ineficientes de água e as crescentes preocupações ambientais torna a distribuição de água ainda mais desafiadora [Alliance, 2002].

A preocupação no dimensionamento de sistemas de abastecimento de água de forma econômica surgiu na década de quarenta, quando o processo de urbanização se acelerou [Hamberg e Shamir, 1988]. Mas, somente no final da década de 60 métodos de otimização foram introduzidos por Karmeli et al (1968) à hidráulica, no dimensionamento de redes pressurizadas de distribuição, através de técnicas de programação linear e a partir daí vem sendo aprimorado por vários autores (Alperovitz e Shamir, 1977; Quindry et al., 1979; Fujiwara et al., 1987; Kessler e Shamir, 1989; e Silva, 1997). Vários autores têm feito uso da programação não linear para se resolver o mesmo tipo de problema (El Baharawy e Smith, 1985 e 1987; Su et al., 1987; Lancey e Mays, 1989; Lancey et al, 1989, Duan, 1990; Formiga, 1999). Outros métodos, tais como algoritmo genético (Simpson et al., 1994, Savic e Walters, 1997), de enumeração exaustiva (Gessler, 1985, Simpson et al, 1994) e heurísticos (Granados, 1990), têm aparecido na literatura (todos referenciados em Curi e Firmino, 2002).

Devido à alta complexidade na operação de bombeamento, na maioria das vezes, somente técnicas de simulação vêm sendo aplicadas a este tipo de problema, no qual um do modelo WADISO –Water Distribution System Optimization, desenvolvido pelo U. S. Army Corps of Engineers (Walski et. al., 1990 apud Curi e Firmino, 2002) tem grande destaque. Também, algumas aplicações na otimização pelo método de algoritmo genético [Righetto, 2002] vem sendo desenvolvido. Portanto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um método de otimização,

baseado em programação não linear, que venha a controlar a operação das bombas das estações elevatórias e de tratamento, buscando minimizar os custos de bombeamento durante o período de 24 horas, atendendo as restrições de vazões, capacidade máxima e mínima dos reservatórios de distribuição, demanda, sob determinado esquema tarifário da concessionária de energia elétrica.

## DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O objeto de aplicação do modelo a ser desenvolvido será testado no sistema de abastecimento de Campina Grande, cidade paraibana de aproximadamente 400 mil habitantes, situada a 120 Km da capital João Pessoa, um dos mais importantes centros urbanos e renomado núcleo de tecnologia do interior do Nordeste. Esse sistema de abastecimento urbano é administrado pela CAGEPA - Companhia de Águas e Esgotos do Estado da Paraíba, empresa pública estadual.

A Figura 1 representa o sistema simplificado de abastecimento de Campina Grande-PB, com cinco estações elevatórias e uma estação de tratamento de água (ETA). O processo de controle no bombeamento das estações elevatórias será submetido ao método de otimização para o tempo de operação de cada conjunto motor-bomba, de acordo com a demanda do Reservatório de Distribuição “R9”. A partir deste, outros reservatórios são alimentados por gravidade e não tem interesse para o escopo deste trabalho.

O sistema inicia com a captação na Barragem Epitácio Pessoa, mais conhecido como Boqueirão, de onde, através de uma junção, partem duas adutoras de água bruta de 1100 e 900mm, por gravidade até duas estações elevatórias de água bruta, de onde saem duas adutoras de 900mm e 800mm fornecendo água bruta para a ETA em Gravatá, com comprimento de 21km e vazão máxima de 61000 m<sup>3</sup>/dia. A ETA de Gravatá tem a capacidade de tratamento máxima de 5344,56 m<sup>3</sup>/h.

O sistema de bombeamento de Gravatá, com três elevatórias responsáveis pelo fornecimento de água para o reservatório de distribuição de Campina Grande o “R9”, é abastecido pelo poço de sucção “R0” com capacidade de 340 m<sup>3</sup>. A água é transportada via três adutoras: de 500mm, de 700mm e de 800mm.

O reservatório R9, localizado no bairro de Santa Rosa em Campina Grande, tem capacidade de armazenamento de água tratada de 40.000 m<sup>3</sup>. É o principal centro de reserva e distribuição de água tratada para os demais reservatórios existentes em todo o sistema de abastecimento de Campina Grande, num total de 29 reservatórios elevados e semi-enterrados, onde vão abastecer uma malha de 450 km de rede de distribuição de água, com um total de 83.500 ligações domiciliares e uma demanda média de 60890,4 m<sup>3</sup>/dia com distribuição horária média representada pela Tabela 1.

Tabela 1 – Demanda horária média do Reservatório de Distribuição R9

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8
Demanda (m³/h)	1468	727	504	662	1087	1659	2289	2898
Hora	9	10	11	12	13	14	15	16
Demanda (m³/h)	3416	3812	4057	4147	4096	3924	3668	3369
Hora	17	18	19	20	21	22	23	24
Demanda (m³/h)	3067	2800	2592	2451	2354	2250	2034	1551

O sistema de bombeamento nas elevatórias I, II, IV e V ocorre com o funcionamento de bombas em paralelas através da conexão em barriletes que tem característica fortemente não linear. A vazão de funcionamento em paralelo dos conjuntos motores bomba é configurado pela representada através da Tabela 2.

Tabela 2- Vazão das bombas em paralelo em cada elevatório

Elevatória	Nº de Bombas	Vazão (m³/h)
I	1	1.375,70
	2	2.355,84
	3	2.989,44
	4	3.093,84
II	1	1.419,48
	2	2.355,12
	3	2.777,60
	4	3.903,46
III	1	689,40
IV	1	1.427,76
	2	2.153,52
	3	2.803,32
V	1	1.472,40
	2	2.416,32
	3	3.375,20
	4	3.681,00

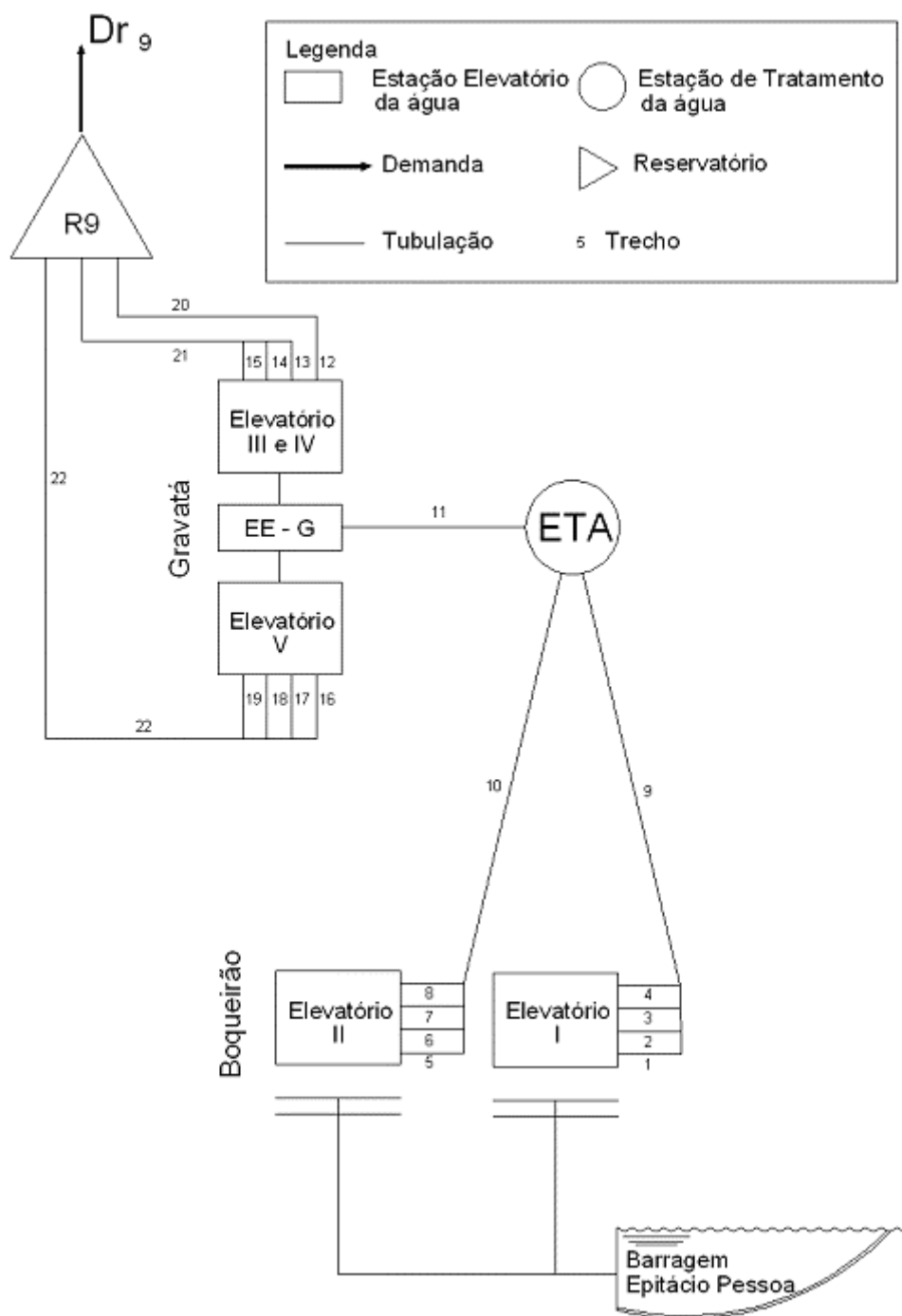


Figura 1 – Esquema simplificado do Sistema de Abastecimento de Campina Grande

As Tabelas 3, 4 e 5 resumem todos os dados do sistema principal de abastecimento de Campina Grande, com dados dos reservatórios, ETA, conjuntos motores-bomba e trechos, respectivamente.

Para evitar transbordamento no poço de sucção o “R0” e no “R9” foi adotado o volume máximo de 95% da sua capacidade. Também, para evitar cavitação, o volume mínimo no “R0” ficou restrito a 5% de sua capacidade. Como no Brasil é adotado, para a capacidade mínima de

reservação, um terço do volume distribuído no dia de consumo máximo [Tsutiya, 2001] foi aplicada esta condição ao reservatório “R9” assegurando o combate a incêndios, condições de emergência (acidentes, reparos nas instalações etc), atender a demanda no caso de interrupções de energia elétrica e manter pressões na rede distribuidora.

Tabela 3-Dados dos Reservatórios e ETA

Ordem	Local	Reservatório	Capacidade (m <sup>3</sup> )	Volume Max. (m <sup>3</sup> )	Volume Min (m <sup>3</sup> )	Tipo
Manancial	Boqueirão	EE-B	∞	∞	∞	Apoiado
1	Gravatá	ETA	5344,56	5344,56	0,00	Apoiado
2	Gravatá	R0	340,00	323,00	17,00	Apoiado
3	Santa Rosa	R9	40000,00	38000,00	18300,00	Apoiado

O sistema elétrico para o abastecimento de água de Campina Grande é composto por duas sub-estações: uma na elevatória de água bruta em Boqueirão com uma potência instalada de 6.000 KVA – 69KV sendo três transformadores de 2.000 KVA, funcionando dois e um de reserva. Na Estação de Tratamento de Gravatá tem-se uma potência instalada de 8.000 KVA – 69 KV com quatro transformadores de 2.000 KVA, atuando 6.000 KVA e um transformador de 2.000 KVA de reserva. Assim a energia elétrica é fornecida pela Companhia Energética da Borborema – CELB classificando o sistema mantido pela CAGEPA com faturamento do Grupo A – alta tensão (A3 – consumidores ligados em tensão de 69KV) com tarifa azul considerando-se a seguinte estrutura:

- Demanda de potência (KW)
  - um preço para ponta;
  - um preço para fora de ponta.
- Consumo de energia (KWh)
  - um preço para ponta em período úmido e seco;
  - um preço para fora de pontas em período úmido e seco;

Tabela 4 – Dados dos conjuntos motores-bomba

Conjunto	Adu tora	Local	Vazão (m³/h)	Altura (mca)	Corrente (A)	Tensão (V)	Altura Sucção	Potência Nominal
1	900	EE-B	1375,70	100	145	2300	28	650 cv
2	900	EE-B	1375,70	100	145	2300	28	650 cv
3	900	EE-B	1375,70	100	145	2300	28	650 cv
4	900	EE-B	1375,70	100	145	2300	28	650 cv
5	800	EE-B	1419,48	159	200	2300	28	900 cv
6	800	EE-B	1419,48	159	200	2300	28	900 cv
7	800	EE-B	1419,48	159	200	2300	28	900 cv
8	800	EE-B	1419,48	159	200	2300	28	900 cv
9	500	EE-G	689,40	115	115	2300	0	600 cv
10	700	EE-G	1427,76	100	140	2300	0	650 cv
11	700	EE-G	1427,76	100	140	2300	0	650 cv
12	700	EE-G	1427,76	100	140	2300	0	650 cv
13	800	EE-G	1472,40	159	200	2300	0	900 hp
14	800	EE-G	1472,40	159	200	2300	0	900 hp
15	800	EE-G	1472,40	159	200	2300	0	900 hp
16	800	EE-G	1472,40	159	200	2300	0	900 hp

Tabela 5 -Dados dos Trechos do Sistema

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Tipo do material
1	500	10	Aço
2	500	10	Aço
3	500	10	Aço
4	500	10	Aço
5	500	10	Aço
6	500	10	Aço
7	500	10	Aço
8	500	10	Aço
9	900	21000	Aço
10	800	21000	Aço
11	1300	226	Ferro Fundido
12	300	10	Ferro Fundido
13	350	10	Aço
14	350	10	Aço
15	350	10	Aço
16	500	10	Ferro Fundido
17	500	10	Ferro Fundido
18	500	10	Ferro Fundido
19	500	10	Ferro Fundido
20	500	23000	Ferro Fundido
21	700	23000	Aço
22	800	23000	Ferro Fundido

Consumo de Energia Elétrica na estação de Boqueirão, no início de ano 2004, é apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6 – Consumo da Estação elevatória de Boqueirão**

Mês / (KWh)	Consumo de Ponta	Consumo Fora de Ponta - F.P.	Demanda Contratada Ponta	Demanda Contratada F. P.	Demanda Medida na Ponta	Demanda Medida F.P.
Janeiro	60.000	1.062.000	3.100	3.500	1.380	2.940
Fevereiro	54.000	996.000	3.100	3.500	2.340	2.940
Março	60.000	1.200.000	3.100	3.500	1.380	2.760
Média diária	1.912,09	35.802,20	-----	-----	1.700	2.880

Consumo de Energia Elétrica da ETA de Gravatá e estação elevatória no início de 2004 é apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7 – Consumo da Estação Elevatória e ETA de Gravatá**

Mês / (KWh)	Consumo de Ponta	Consumo F.P.	Demanda Contratada Ponta	Demanda Contratada F. P.	Demanda Medida na Ponta	Demanda Medida F.P.
Janeiro	102.000	1.410.000	3.800	4.000	1.680	3.360
Fevereiro	96.000	1.380.000	3.800	4.000	3.420	3.420
Março	108.000	1.668.000	3.800	4.000	1.620	3.300
Média diária	3.362,64	48.949,01	-----	-----	2.240	3.360

O horário de ponta para a CELB é das 18 horas às 20 horas, totalizando três horas corridas. Analisando as Tabelas 6 e 7, temos um consumo diário médio de 5.275 KWh no horário de ponta e 84.791 KWh no horário fora de ponta. A CELB aplica a tarifa de R\$ 0,11324 por KWh no consumo ponta e de R\$ 0,07338 por KWh no consumo fora de ponta. Então o custo diário médio de R\$ 597,34 no horário de ponta é de R\$ 6221,96 no horário fora de ponta, logo o custo total de R\$ 6819,30 por dia.

## **METODOLOGIA**

O processo de otimização para esta aplicação será realizado pelo MATLAB, utilizando o toolbox de otimização. A energia é essencial para mover a água através dos sistemas de água, tornando a água potável, e removendo os detritos. Cada litro de água que se move pelo sistema representa um significativo e custo de energia. Assim o estudo visando à redução do custo de



energia elétrica deve ser iniciado pelo sistema tarifário e pela energia consumida para cada período, então representaremos o custo do sistema por:

$$C = E_p \times T_p + E_{FP} \times T_{FP} \quad (1)$$

sendo:

$C$  o custo diário de energia de cada conjunto motor-bomba;

$E_p$  a energia consumida (KWh) no horário de ponta;

$E_{FP}$  a energia consumida (KWh) no horário fora de ponta;

$T_p$  a tarifa de consumo (R\$/KWh) no horário de ponta;

$T_{FP}$  a tarifa de consumo (R\$/KWh) no horário fora de ponta;

A energia consumida no horário de ponta ( $E_p$ ) é

$$E_p = \sum_{i=1}^m P(i) \times \Delta p(i) \quad (2)$$

e a Energia consumida no horário fora de ponta ( $E_{FP}$ ):

$$E_{fp} = \sum_{i=1}^m P(i) \times \Delta fp(i) \quad (3)$$

onde

$P(i)$  é a potência (KW) do conjunto motor-bomba  $i$ ;

$\Delta p(i)$  é o tempo total (Horas) de funcionamento no horário de ponta do conjunto  $i$ ;

$\Delta fp(i)$  é o tempo total (Horas) de funcionamento no horário fora de ponta do conjunto  $i$ ;

$m$  é o numero de conjuntos motores-bomba do sistema.

Ainda definiremos a potência do conjunto motor-bomba,  $P(i)$ ,

$$P(i) = \frac{9,81}{\eta} Qc(i) \cdot H(i) \quad (4)$$

sendo:

$\eta$  o rendimento do conjunto motor-bomba;

$Qc(i)$  a vazão do conjunto motor-bomba (m<sup>3</sup>/s);

$H(i)$  a altura manométrica (m).

O tempo de funcionamento de cada conjunto motor-bomba no horário de ponta e no horário fora de ponta. No horário de Ponta:

$$\Delta p(i) = \sum_{j=18}^{20} t(j,i) \quad (5)$$

e no horário Fora de Ponta ( $\Delta fp(i)$ ) de cada conjunto motor-bomba  $i$ :

$$\Delta fp(i) = \sum_{j=1}^{17} t(j,i) + \sum_{j=21}^{24} t(j,i) \quad (6)$$

onde  $t(j,i)$  é a fração de uma hora durante a hora  $j$  em que o conjunto motor-bomba  $i$  estará ligado.

Para elaborar as restrições do problema é necessário definir as vazões nos trechos em função da fração de tempo de funcionamento, em cada hora, do conjunto motor-bomba, ou seja:

$$Q(k,j) = Qc(i) \times t(j,i) \quad (7)$$

onde  $Q(k,j)$  é a vazão de funcionamento no trecho  $k$  na hora  $j$ .

As vazões horárias nas adutoras são caracterizadas pelo funcionamento em paralelo dos conjuntos motores-bomba, que apresentam comportamento não linear. O cálculo da vazão, no problema proposto, foi determinado pelo seguinte algoritmo, segundo as características de medição:

*[resposta] = Rotina ( $t(1), t(2), \dots, t(n), q(1), q(2), \dots, q(n)$ )*

*{Colocar a tempo de funcionamento “t” de cada conjunto em ordem crescente}*

*Para  $i := 1$  até  $n$*

*min := i*

*Para  $j := i+1$  até  $n$*

*Se ( $t(j) < a(min)$ )*

*min := j*

*Fim do se*

*Fim do para*

*aux := t(i)*

*t(i) := t(min)*

*t(min) := aux*

*Fim do para*

*{Colocar a vazão para o conjunto de conjunto em funcionamento na ordem crescente}*

*{ item ao passo anterior}*

*{Calculo da vazão horária no trecho}*

*k := n*

*resposta := 0*

*Para  $i := 1$  até  $n$*

*resposta :=  $q(k) \times t(1) + resposta$*

*k := k-1*

*Fim do para*

### *Fim da Rotina*

Em seguida, foi definido o volume horário dos reservatórios, por:

$$V(k, j) = V(k, j-1) + \sum Q_{entra}(i, j) - \sum Q_{sai}(i, j) - D(k) \quad (8)$$

sendo:

$V(k, j)$  o volume do reservatório  $k$  no tempo  $j$ ;

$V(k, j-1)$  o volume do reservatório  $k$  no tempo  $j-1$ ;

$Q_{entra}(i, j)$  a vazão dos trechos  $i$  que chegam ao reservatório na hora  $j$ ;

$Q_{sai}(i, j)$  a vazão dos trechos  $i$  que deixam ao reservatório na hora  $j$ ;

$D(k)$  a demanda média do reservatório  $k$ .

Portanto, as seguintes restrições do problema podem ser formuladas:

1 - Intervalo de funcionamento de cada conjunto motor-bomba, que caracteriza a variável de decisão do problema de otimização, é dado por:

$$0 \leq t(i, j) \leq 1 \quad (9)$$

2- Capacidade mínima e máxima dos reservatórios e das estações de tratamento (ETA), ou seja, o volume armazenado nos reservatórios no tempo " $j$ " devem ser maiores que o requerimento mínimo ( $C_{min}(k)$ ) adotado e menores que sua capacidade máxima ( $C_{max}(k)$ ).

$$C_{min}(k) \leq V(k, j) \leq C_{max}(k) \quad (10)$$

3- Volume de cada reservatório " $k$ " no início do dia ( $V_i$ ) é igual a do final do dia  $V(k, 24)$ .

$$V_i = V(k, 24)$$

## **RESULTADOS**

Os resultados da otimização do sistema exposto são mostrados nas Tabelas 7 e 8. A entrada de dados utilizando um exemplo prático do funcionamento do sistema foi de essencial importância para o sucesso da otimização. No final da otimização obtivemos um consumo energético de 2332,7 KWh no horário de ponta e de 36217,0 KWh no horário fora de ponta, representando um custo de total de R\$ 2.921,8 por dia.

**Tabela 7 – Variação de Bombas Funcionando por Estação Elevatória**

Elevatória	Bombas*	Horas de Funcionamento (minutos)																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
I	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	60	60	0	60	0	0
I	2	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	0	0	0	0	0	0	60
I	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	60	0
I	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	1	10,6	12,7	10,7	10,0	10,4	31,0	12,2	20,3	43,0	8,9	0	13,4	13,1	28,4	19,6	0	10,4	0	0	0	8,6	0	0	17,6
II	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
III	1	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	49,3	47,8	60	60	60	60
IV	1	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	28,8	46,8	34,7	60	60	60	60
IV	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IV	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	1	19,4	27,5	21,2	18,3	19,7	34,8	25,9	24,7	47,0	18,6	19,7	21,9	23,0	31,9	34,6	24,80	17,8	0	0	0	11,7	14,7	10,5	21,1
V	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

\* Numero de Bombas funcionando por estação elevatória

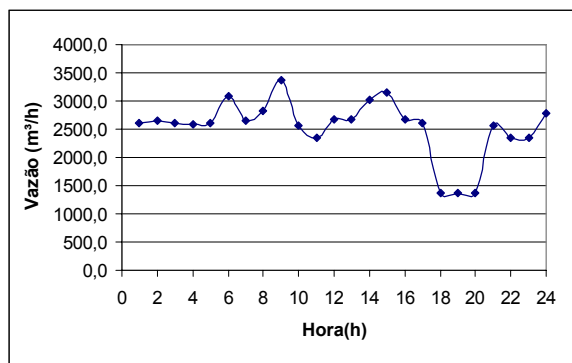


Figura 2 - Bombeamento para ETA

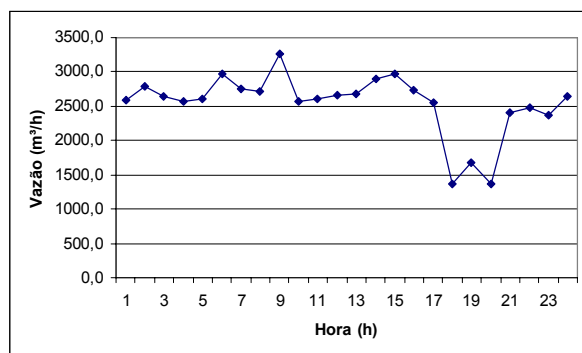


Figura 3 - Bombeamento para o R9

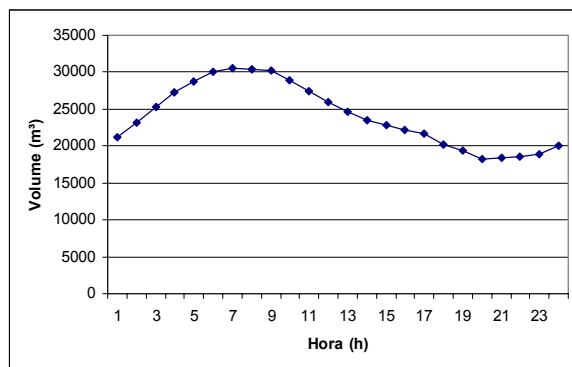


Figura 4 - Volume Armazenado no R9

**Tabela 8 – Consumo, Bombeamento e Armazenamento do Sistema de Abastecimento**

Período (hora)	Consumo (m³/h)	Bombeamento para					Volume	
		ETA (m³/h)	R9 - 500*	R9 – 700*	R9 – 800*	Total R9 (m³/h)	R0 (m³)	R9 (m³)
			(m³/h)	(m³/h)	(m³/h)			
1	1468,8	2605,8	689,4	1427,8	476,5	2593,7	182	21125
2	727,2	2656,1	689,4	1427,8	675,4	2792,6	46	23190
3	504,0	2609,6	689,4	1427,8	521,1	2638,3	17	25324
4	662,4	2592,3	689,4	1427,8	448,2	2565,4	44	27227
5	1087,2	2602,0	689,4	1427,8	482,5	2599,7	46	28740
6	1659,6	3090,3	689,4	1427,8	854,1	2971,3	165	30051
7	2289,6	2645,1	689,4	1427,8	636,5	2753,7	57	30515
8	2898,0	2835,5	689,4	1427,8	607,3	2724,5	168	30342
9	3416,4	3373,0	689,4	1427,8	1153,3	3270,5	270	30196
10	3812,4	2565,5	689,4	1427,8	456,6	2573,8	262	28957
11	4057,2	2355,8	689,4	1427,8	483,8	2601,0	17	27501
12	4147,2	2672,2	689,4	1427,8	538,5	2655,7	34	26010
13	4096,8	2665,9	689,4	1427,8	565,4	2682,6	17	24595
14	3924,0	3028,4	689,4	1427,8	783,0	2900,2	145	23572
15	3668,4	3142,7	689,4	1427,8	847,8	2965,0	323	22868
16	3369,6	2679,3	689,4	1427,8	608,5	2725,7	277	22224
17	3067,2	2600,7	689,4	1427,8	437,1	2554,3	323	21711
18	2800,8	1375,7	689,4	686,3	0,0	1375,7	323	20286
19	2592,0	1375,7	566,8	1114,9	0,0	1681,7	17	19376
20	2451,6	1375,7	549,3	826,4	0,0	1375,7	17	18300
21	2354,4	2558,7	689,4	1427,8	288,1	2405,3	17	18351
22	2250,0	2355,8	689,4	1427,8	359,7	2476,9	49	18578
23	2034,0	2355,8	689,4	1427,8	256,5	2373,7	32	18917
24	1551,6	2772,6	689,4	1427,8	517,1	2634,3	170	20000
Soma	60890,4	60890,2	16282,9	32611,4	11997,0	60891,3	----	-----

\* Adutora entre Gravatá e Santa Rosa em Campina Grande

**Tabela 10- Tempo de funcionamento de cada conjunto motor-bomba**

Bombas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ponta (h)	0	1	1	1	0	0	0	0	2,62	0	1,84	0	0	0	0	0
Fora de Ponta (h)	19	19	2	2	0,30	0,23	4,47	0,14	1,0	19	2,00	0	5,72	2,24	0	0,20

**Tabela 11– Tabela de Consumo de Energia do Sistema**

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8
Consumo (KWh)	1641,43	1749,39	1662,42	1623,34	1642,39	2014,97	1727,81	1797,66
Hora	9	10	11	12	13	14	15	16
Demanda (KWh)	2267,12	1615,35	1536,31	1697,07	1705,98	1957,35	2175,09	1590,35
Hora	17	18	19	20	21	22	23	24
Demanda (KWh)	749,76	833,16	749,76	1914,30	1107,66	1812,69	1731,30	749,76

## **CONCLUSÃO**

Neste trabalho, pode-se verificar o sucesso da implantação desta formulação matemática e de aplicação de um método de programação não linear para definição das regras operacionais ótimas quanto ao tempo de funcionamento horário, durante 24 horas, de cada conjunto motor-bomba do sistema de abastecimento de Campina Grande, PB. A modelagem visa reduzir os custos com o bombeamento de água através da otimização da operação de bombeamento, atendendo as restrições de demanda, vazão capacidade máxima e mínima dos reservatórios, capacidade de tratamento da ETA e as restrições operacionais. A função objetivo é representada pelos custos energéticos de bombeamento, de acordo com o sistema tarifário em vigor. Para comparação e análise dos resultados foram usados os dados reais de funcionamento do sistema, tirados do livro “BOLETIM DIÁRIO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE – Pb”, e verificou-se que, para o dia 01 de julho de 2004, houve um consumo de 3.012,3 KWh no horário de ponta e 44.828 KWh no horário fora de ponta. Logo, para este dia, base dos dados deste trabalho, foi obtida uma redução de 22,5% no consumo no horário de ponta e 19% no consumo no horário fora de ponta, que representa uma economia financeira de 19,5%.

## **AGRADECIMENTOS**

A CAGEPA pela cessão dos dados utilizados, pelas discussões operacionais e as várias visitas técnicas ao sistema de abastecimento de Campina Grande.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALLIANCE – Aliança para conservação de Energia, “*Água e Energia: Aproveitando as oportunidades de eficientização de água e energia não exploradas nos sistemas de água municipais.*” Washington D.C., 2002.
- [2] CAGEPA, “*BOLETIM DIÁRIO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE – Pb*”, Gerência Regional da Borborema – Divisão de Controle Operacional, Mês de Julho, 30p.
- [3] CURI, W. F. e FIRMINO, M. B. .M, “*Um Método de Dimensionamento Ótimo de Redes Pressurizadas Malhadas Via Programações Não Linear e Linear*”, In: SEMINÁRIO - Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas, 2002, João Pessoa - PB, Brasil. Anais... CD-ROM.
- [4] HAMBERG, D.; SHAMIR, U, Schematic Models for Distribution Systems Design I: *Combination Concept. Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 114, nº 2, p. 129-162, New York, USA, 1988.
- [5] MATSUMOTO, ÉLIA Y.; “*Matlab 6 – Fundamento da Programação*”; Editora Érica; 2001,314p.
- [6] PORTO, R. de M.; “*Hidráulica Básica*”, EESC USP projeto REENGE, São Paulo-SP – 2ª ed, 1999, 519p.
- [7] RIGHETTO, A. M.; “*OPERAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMA URBANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA*” In: SEMINÁRIO - Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas, 2002, João Pessoa - PB, Brasil. Anais... CD-ROM.
- [8] TSUTIYA, M. T.; “*Redução do custo de energia elétrica de abastecimento de água*” 1º ed – São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, XV- 185p.
- [9] USEPA - Agência de Proteção Ambiental dos EUA; “*Apêndice A: Medidas de Conservação de Água.*” Guia de Planos para Conservação de Água Tratada. Washington D.C. Agosto, 1998.