



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOUTORADO TEMÁTICO  
DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS



Análises e Métodos de Otimização para Eficiência  
Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de  
Abastecimento de Água

Adalberto Aragão de Albuquerque

Campina Grande - Paraíba

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN  
DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS

Análises e Métodos de Otimização para Eficiência  
Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de  
Abastecimento de Água

Adalberto Aragão de Albuquerque

Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação  
em Recursos Naturais, da Universidade Federal  
de Campina Grande em cumprimento às  
exigências para obtenção do grau de Doutor em  
Recursos Naturais.

Orientador:

**Prof. Dr Wilson Fadlo Curi**

Campina Grande – Paraíba  
Julho de 2007

ADALBERTO ARAGÃO DE ALBUQUERQUE

Análises e Métodos de Otimização para Eficiência  
Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de  
Abastecimento de Água

Aprovado em: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi  
Unidade Acadêmica de Física - UAF  
Universidade Federal de Campina Grande

---

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO GONÇALVES DE AZEVEDO  
Departamento de Engenharia Civil – DEC  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. RUI DE OLIVEIRA  
Universidade Estadual da Paraíba

---

Dr. ALCIGEIMES BATISTA CELESTE  
Pesquisador de Desenvolvimento Científico Regional

---

Profa. Dra. ROSIRES CATÃO CURI  
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UAEC  
Universidade Federal de Campina Grande

Campina Grande – Paraíba  
Julho de 2007

“Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço.”

Dave Weinbaum

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço ao Grande Criador do Universo, pelo o que sou e pelas vitórias em minha vida.

Ao Professor Dr. Wilson Fadlo Curi, pelos os ensinamentos, conselhos paciência na orientação desta tese.

Ao Professor e amigo Mosefran Firmino, pelo apoio, para a realização desta tese.

A Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), Gerência de Campina Grande, as Divisões de Controle Operacional, Manutenção pelo fornecimento de informações e dados, para a discussão do problema.

A Universidade Federal de Campina Grande, particularmente na pessoa dos professores Anne Marie Koning, Rui de Oliveira e Alcigeimes Batista Celeste que além de professores são verdadeiros educadores.

A todos, que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

---

O desafio em compor um método eficiente de associação de ligações dos conjuntos motor-bomba no conceito de uso de água e energia é um dos principais desafios das empresas de saneamento. Existem várias situações em problemas práticos de engenharia nas quais pesquisadores necessitam minimizar ou maximizar determinadas funções numéricas. As técnicas de otimização já são bastante divulgadas, mas devido à dificuldade de implementação e aos diferentes tipos de aplicação, as novas técnicas vêm ganhando bastante espaço, muitas vezes sem a preocupação inicial de verificar a aplicação das técnicas tradicionais. Neste trabalho foram feitos diferentes testes da aplicação de métodos de otimização ao problema de acionamento (horário ótimo) dos conjuntos motor-bomba do sistema principal de abastecimento de água da cidade de Campina Grande, PB, com aproximadamente 400 mil habitantes. Numa primeira análise de desempenho fez-se uso de programações linear (PL) e não linear (PNL) e algoritmos genéticos (AG), onde foi considerado que as variáveis de decisão pudessem assumir valores fracionários. Além de grandes diferenças no tempo computacional requerido, verificou-se que mudanças nos valores iniciais atribuídos as variáveis de decisão geraram diferentes soluções. Numa segunda análise, voltada a apreciação de métodos que gerassem variáveis de decisão inteiras e binárias, utilizou-se da combinação de técnicas de PL e programação linear inteira e o seu desempenho foi comparado com uma regra de simulação padrão. Nesta análise observou-se uma economia financeira de 20,27% e de consumo energético de 16,86% da aplicação do método de otimização comparado com o método de simulação padrão. Finalmente, com o intuito de resolver problemas de grande porte, foi aplicado uma combinação de PL, para gerar um ótimo global, e programação quadrática, para tornar valores fracionários das variáveis de decisão em valores inteiros e minimizar o número de operações liga-desliga, a um sistema aumentado de abastecimento.

## ABSTRACT

---

An efficient use of energy regarding a pump scheduling within water distribution companies is one of their major concerns. In practical problems of engineering, there are several situations in which researchers need to minimize or maximize certain numerical functions. Classical optimization techniques have been extensively documented but the difficulties in their implementation have given room for application of new techniques, sometimes with no verification of the applicability of the traditional methods. In this study, different tests of linear and nonlinear programming as well as genetic algorithms have been applied to the pumping scheduling of the water supply system of Campina Grande city, State of Paraíba, which has a population of 400,000 people. Changes in the pump scheduling solutions in addition to variation in processing time have been identified for different sets of initial data and maximum iteration stopping criterion. First, a performance comparison was made for the application of linear and nonlinear programming and genetic algorithm to a smaller pumping system, where the decision variables could take real values. Besides requiring quite different computational times, different initial conditions set to the decision variables resulted in different pumping scheduling solutions. Secondly, a comparison between two methods that results in binary integers for the decision variables has been performed. These methods are a two steps model, which applies a linear programming, and an integer linear programming optimization model, and a standard rule pumping scheduling simulation model. The results have shown a profit increase of 20,27% and a energy saving of 16,86% when applying a two steps model. Finally, in order to be able to solve large problems, another two steps model was applied to an extended number of pumping stations. This model is based on a linear programming, which generates a global optimum for cost minimization, and a quadratic programming, which minimizes maintenance costs as well as force real numbers, attained at the first step, to become binary integers. .

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 3.1. Regionais da CAGEPA Companhia de Água e Esgotos da Paraíba.	37
Figura 3.2. Vista da barragem Epitácio Pessoa (Boqueirão).	38
Figura 3.3. Adutoras e tomada de água na barragem ata (EEB).	39
Figura 3.4. Estação elevatória de água bruta (EEB).	39
Figura 3.5. Sistemas de chegada em barriletes na (EEAB) Boqueirão.	39
Figura 3.6. Sistema adutor principal.	40
Figura 3.7. Estação de tratamento de água de Gravatá.	41
Figura 3.8. Misturadores de sulfato ETA de Gravatá.	42
Figura 3.9. Estação elevatória de 800 mm de água tratada em Gravatá.	43
Figura 3.10. Tubulações de 800 mm na saída da elevatória de água tratada.	44
Figura 3.11. Sistema adutor principal simplificado.	49
Figura 5.1. Variação de Armazenamento do reservatório. R9	72
Figura 5.2. Relação de bombeamento e demanda para o R9.	72
Figura 5.3. Relação de bombeamento para a ETA.	73
Figura 5.4. Variação de Armazenamento no R9.	74
Figura 5.5. Relação de bombeamento e demandada do R9.	74
Figura 5.6. Relação de bombeamento para a ETA.	75
Figura 5.7. Relações entre o número de variáveis de decisão fracionárias com o aumento dos volumes mínimos do reservatório.	76
Figura 5.8. Relação entre o número de variáveis de decisão fracionária com a redução dos volumes máximos dos reservatórios.	76
Figura 5.9. Aumento no valor da função objetivo coma redução dos volumes máximos dos reservatórios.	77
Figura 5.10. Relação entre o número de variáveis de decisão fracionárias com, simultaneamente, um aumento nos volumes mínimos e redução nos volumes máximos dos reservatórios.	78
Figura 5.11. Relação entre o valor da função objetivo com os volumes iniciais dos reservatórios.	79
Figura 5.12. Número de variáveis de decisão fracionárias em função dos	79

volumes iniciais dos reservatórios.

Figura 5.13. Comportamento dos volumes nos reservatórios segundo modelo linear primeira etapa.

82

Figura 5.14. Comportamento dos volumes nos reservatórios segundo o modelo quadrático segundo etapa.

85

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1.1. Pontos de consumo de energia.	3
Tabela 3.1. Dados de vazão dos conjuntos motor-bomba.	45
Tabela 3.2. Consumo de energia elétrica EEAB (Boqueirão)	46
Tabela 3.3. Consumo de energia elétrica EEAT na ETA de Gravatá.	46
Tabela 3.4. Tarifas para energia.	47
Tabela 3.5. Descrição dos trechos do sistema adutor.	51
Tabela 3.6. Demandas do sistema de abastecimento.	52
Tabela 4.1. Regras de operação.	60
Tabela 4.2a. Resultado da primeira etapa para funcionamento de 2 conjuntos motor-bomba para um problema hipotético.	67
Tabela 4.2b. Resultado da primeira etapa para funcionamento de 2 conjuntos motor-bomba para um problema hipotético..	67
Tabela 5.1. Resultados gerais para os métodos contínuos.	70
Tabela 5.2. Resultados gerais na modificação do AG.	71
Tabela 5.3. Resultados do custo e consumo de energia diária.	73
Tabela 5.4a. Fração de funcionamento por hora dos conjuntos motor-bomba (CMB) de cada elevatória (resultados do modelo linear primeira etapa).	80
Tabela 5.4b. Fração de funcionamento por hora dos conjuntos motor-bomba (CMB) de cada elevatória (resultados do modelo linear primeira etapa).	81
Tabela 5.5a. Fração de funcionamento por hora dos conjuntos motor-bomba (CMB) de cada elevatória (resultado do modelo quadrático segunda etapa).	83
Tabela 5.5b. Fração de funcionamento por hora dos conjuntos motor-bomba (CMB) de cada elevatória (resultado do modelo quadrático segunda etapa).	84

LISTA DE SIGLAS

---

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SANEAR	Eficiência Energetica no Saneamento Ambiental
PNL	Programação Não Linear
PL	Programação Linear
PLI	Programação linear Inteira
PQ	Programação Quadrática
AG	Algoritmo Genético
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
EPANET	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)
GRG2	Código de Otimização Não linear
EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
ETA	Estação de Tratamento de Água
pH	Potencial Hidrogenionico
CV	Cavalo Vapor
V	Voltagem
mca	Metro de Coluna d'Água
A	Amperagem
KVA	kilo Volt Amper
KV	Kilo Volt
KW	Kilo Watt
KWh	Kilo Watt Hora
FP	Fora de Ponta
rpm	Rotação Por Minuto

# SUMÁRIO

---

## Capítulo I

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos Gerais	4
1.2. Objetivos Específicos	5

## Capítulo II

2. REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1. Operação de Sistemas de Abastecimento de Água	6
2.2. Operação de Bombas em Saneamento Básico	11
2.3. Modelos Hidráulicos	17
2.3.1. Modelos de Balanço de Massa	17
2.3.2. Modelos de Regressão	18
2.3.3. Modelos Hidráulicos Simplificados	19
2.3.4. Modelos Hidráulicos Complexos	19
2.4. Modelos de Otimização	20
2.5. Métodos de Programação Matemática	32
2.5.1. Programação linear	32
2.5.2. Programação não linear	32
2.5.3. Programação dinâmica	33
2.5.4. Métodos heurísticos	33
2.5.4.1. Algoritmos genéticos	33
2.5.4.2. Lógica fuzzy	34
2.5.4.3. Otimização heurística	34

## Capítulo III

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO	36
3.1. Introdução	36
3.2. Barragem	37
3.3. Captação	38
3.4. Tratamento	41
3.5. Estações Elevatórias	43
3.6. Reservatórios	47
3.7. Rede de Distribuição	48
3.8. Demanda	49

## Capítulo IV

4. METODOLOGIA	53
4.1. Generalidades	53
4.2. Otimização da Operação das Estações Elevatórias da CAGEPA	54
4.3. Métodos contínuos para análise de desempenho	56
4.3.1 Descrição matemática	56
4.3.2 Implementação da descrição matemática (1)	59
4.4. Métodos discretos para análise de desempenho	60
4.4.1 Via programações linear e linear inteira	61
4.4.2 Via simulação com uma regra padrão	62
4.4.3. Implementação da descrição matemática (2)	61
4.5. Modelo de Otimização para Reduzir, o Número de Acionamento dos Conjuntos Motor-Bomba Via Programação Linear e Programação Quadrática.	62
4.5.1 Função objetivo	63
4.5.2 Os modelos de otimização utilizados	64

## Capítulo V

5. RESULTADOS E ANÁLISES	69
5.1. Resultado da análise comparativa de métodos contínuos	69
5.2. Resultados da análise comparativa de métodos inteiros	73
5.3. Resultados do Modelo Programações Linear e Quadrática	75

## Capítulo VI

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
6.1. Conclusões	86
6.2. Conclusões da Comparação de Diferentes Modelos Contínuos (PNL, PL e AG)	86
6.3. Conclusões sobre o Modelo de Otimização Via Programação Linear Inteira	87
6.4. Conclusões Sobre a Aplicação da Programação Linear e Quadrática	88
6.5. Recomendações	88
Referência Bibliográfica	90

## 1. INTRODUÇÃO

As empresas de saneamento no Brasil necessitam, cada vez mais, de melhoras em seus resultados operacionais, reflexo de um mercado globalizado e competitivo. Logo após as despesas com pessoal, a energia elétrica já figura como uma das maiores.

É de amplo conhecimento dos gestores da área de saneamento que o grande consumo de energia elétrica é oriundo das grandes elevatórias de água bruta e tratada, como também das elevatórias de esgotamento sanitário com motores que chegam a superar 90% do total do consumo das empresas.

Outro fato importante a destacar é que, neste início do século XXI, nos deparamos com uma crise energética sem precedentes nas últimas décadas, principalmente por motivos hidrometeorológicos, que resultará em mudanças culturais nos diversos segmentos da sociedade.

Por outro lado, a cultura do desperdício já está com seus dias contados, pois o cidadão hoje, cliente de um serviço público ou privado, não admitirá do seu fornecedor uma forma de gestão que não seja aliada à eficácia e a eficiência.

Com grande ênfase dada à implantação de obras de saneamento, principalmente de sistema de abastecimento de água às populações urbanas, iniciada na segunda metade da década de 60 e intensificada nas décadas de 70 e 80 com um forte programa nacional de financiamento dessas obras liderado pelo Banco Nacional de Habitação e, mais recentemente, através de outros programas de financiamento, o país apresenta hoje, na maioria de suas regiões, elevados índices de abastecimento urbano de água potável.

De início, de modo a propiciar um bom serviço de abastecimento público de água à população, o fornecimento de energia elétrica para os sistemas de saneamento básico era fortemente subsidiado. A partir da década de 70 iniciou-se um processo de retirada gradativa do subsídio às tarifas de energia elétrica para o saneamento e as concessionárias dos serviços de água e

esgoto. Quem tem razoável parte de seus gastos de operação destinados ao pagamento das contas de energia elétrica, passaram a se preocupar em diminuir o peso de tais despesas em seus custos operacionais.

A Eletrobrás preocupada com os custos de eletricidade no setor de saneamento básico está investindo na redução do consumo de energia em parceria com a Secretaria de Saneamento Ambiental (SNSA) do Ministério das Cidades, que lançou recentemente uma chamada pública intitulada Eficiência Energética no Saneamento Ambiental (PROCEL – SANEAR). Esta última visa promover a conservação e o uso racional de energia elétrica e água em sistemas de abastecimento das empresas de saneamento. Com essa iniciativa a Eletrobrás espera reduzir em 10% o gasto de energia no setor, uma vez que o segmento está entre os que mais consomem eletricidade no país. Só para se ter uma idéia, o consumo de energia é de 8.890 Gwh/ano (PROCEL 2003), que representa 3,3% do consumo global de energia elétrica no Brasil.

A CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba, como empresa responsável pelo esgotamento sanitário e tratamento e distribuição de água potável no estado da Paraíba, tem em seu corpo técnico uma equipe, junto a Diretoria de Operação, responsável em estabelecer programas e metas no combate ao desperdício de energia elétrica. Essas ações ocorrem desde a conferência de todas as faturas de energia elétrica que chegam ao departamento de controle, e quando não conferem são devolvidas a concessionária de energia elétrica para o seu refaturamento.

Para melhorar a eficiência energética em sistemas de abastecimento de água pode-se:

- Trocar motores antigos com pouca eficiência por novos e modernos, onde é obtida uma melhor relação custo - benefício com essa troca,
- Corrigir o fator de potência dos motores, com a instalação de capacitores nas principais elevatórias de água e esgotamento sanitário,
- Reavaliar a demanda contratada junto à concessionária de energia elétrica e
- Mudar o horário de acionamento das máquinas para horários de tarifas de menor custo. Estabelecer para a maioria das elevatórias de água e esgotos um horário de ponta, período de três horas contínuas estabelecido pela concessionária de energia elétrica como o de maior

demanda e, conseqüentemente, com maior tarifa. Os horários considerados fora de ponta são as horas complementares as três horas consecutivas definidas no horário de ponta.

Com estas medidas, tomadas pelo Departamento de Controle de Energia Elétrica, a empresa apresenta, conforme Tabela 1.1 os percentuais de consumo de energia elétrica, nas unidades de água (elevatórias), unidades de esgotos (elevatórias) e unidades administrativas, aonde estas despesas com energia elétrica chegam a 25% do faturamento da empresa.

Tabela 1.1 – Pontos de consumo de energia

PONTOS DE CONSUMO DE ENERGIA (fevereiro 2003)			
Finalidade de Uso	Quantidade (unidade)	Despesa Energia (R\$)	Percentual
Água	512	1.967 700,00	93,7
Esgoto	63	73.500,00	3,5
Administração	81	58.800,00	2,8
Total	656	2.100.000,00	100

Fonte: Panorama de Uso de Energia na CAGEPA – fevereiro 2003.

Observa-se, no entanto, que a empresa necessita de uma política mais definida com relação ao controle operacional, ou seja, a operação e manutenção do sistema.

Não é admissível que hoje, com a grande escassez de água numa região como o semi-árido, 40% da água produzida deixem de chegar ao seu destino final, que é o cliente, em razão das perdas no sistema. Perdas físicas acarretam vários fatores, tais como: procura de novas fontes para exploração hídrica, projetos de expansão do sistema, consumo desnecessário de eletricidade no bombeamento de água para suprir as deficiências no abastecimento de água, desgaste na credibilidade da empresa junto a sociedade em virtude da intermitência do sistema na distribuição de água, etc.

Portanto há necessidade de tornar o controle operacional das elevatórias mais eficientes e modernos. Para isto é necessário disponibilizar a Empresa de recursos técnicos - científicos, já disponíveis no mercado, na forma de uma ferramenta de trabalho que seja importante no auxílio da operação e manutenção dos sistemas, resultando na redução dos custos operacionais.

No entanto, talvez por falta de recursos financeiros e tecnológicos, algumas idéias demorem a ser implantadas levando as empresas de saneamento do país a um distanciamento grande entre o desenvolvimento tecnológico e uma implantação prática. O que se deseja é a eficiência dos sistemas, mas, para isto, são necessárias que a direção das empresas de saneamento absorva estas novas tecnologias, alavancas fundamentais nas tomadas de decisões.

Com base nestas observações foi elaborado este trabalho com um objetivo de determinar normas e regras para operação e manutenção de elevatórias de água bruta e tratada buscando minimizar os custos com energia elétrica. Será analisado o comportamento real do sistema com o objetivo de se obter uma solução operacional ótima para o acionamento de conjuntos motor-bomba de estação elevatória no sistema de abastecimento de água da Empresa.

### **1.1. Objetivos gerais**

Buscar e testar novas tecnologias de apoio para determinação de normas e regras para a operação de conjuntos elevatórios nos sistemas de abastecimento de água potável minimizando os custos de energia elétrica e de manutenção dos sistemas

## 1.2. Objetivos específicos

- Aquisição (instrumentar e instalar equipamentos de medições de vazão, volumes e pressão) ou verificação de dados já existentes para o sistema em estudo (horas de bombeamento, volumes e vazões de adução e distribuição) para realizar simulações que sejam compatíveis com o sistema real.
- Estabelecer diretrizes para o desenvolvimento de um sistema que dê apoio ao controle operacional na determinação dos horários de funcionamento dos conjuntos motor-bomba, evitando o horário de ponta.
- Melhorar o processo de busca de uma solução ótima de métodos, através do desenvolvimento de algoritmos que forneça um bom ponto inicial de pesquisa, recorrendo-se a programação linear.
- Fazer uso deste ponto inicial, obtido via programação linear, para se determinar regras operativas ótimas quanto ao custo de manutenção, via programação inteira ou não linear.
- Analisar e diagnosticar a influência de diferentes cenários ou definições de estratégias no desempenho do funcionamento dos conjuntos elevatórios e na distribuição de água tratada ao sistema, tais como:
- Subsidiar regras de operação do sistema para garantir o fornecimento de água tratada ao abastecimento de Campina Grande e promover linhas de ação que visem o incremento na economia de eletricidade da Empresa, inclusive visando baixar o índice de perdas físicas, através transbordamentos, para níveis aceitáveis.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### **2.1. Operação de sistemas de abastecimento de água.**

No vasto campo da aplicação da Engenharia Sanitária e sua importância fundamental para a vida das comunidades, não se pode pensar em desenvolvimento urbano sustentável se não for condicionado à disponibilidade de água.

O crescimento desordenado das cidades, aliado à falta de financiamento para o setor de saneamento básico no Brasil, torna a operação dos sistemas de abastecimento de água uma tarefa complexa e difícil. Reconhece-se, no entanto, que tem aumentado a necessidade de melhorar a operação das estações elevatórias nos sistemas de abastecimento de água, por que é de fundamental importância que estes sistemas aumentem sua vida útil o máximo possível. Esta tendência deve continuar, principalmente no que se refere a escassez contínua de recursos hídricos e energéticos.

A população urbana, com seu crescimento rápido, e a industrialização, vem submetendo os recursos hídricos, em muitos centros urbanos, a graves pressões. Deste modo, faz-se necessário dedicar atenção especial aos efeitos crescentes da urbanização sobre a demanda e o consumo de água, exigindo das autoridades uma revisão pública, na gestão de abastecimento de água (Francato e Barbosa, 1999).

Mesmo com o grande crescimento da população urbana e o desenvolvimento industrial, o saneamento básico tem contribuído para uma melhoria na qualidade de vida dos menos favorecidos, principalmente nos países da América Latina.

Segundo Cabrera (1997), para que se consigam bons resultados em planejamento de recursos hídricos deve-se conciliar: uma boa ação política, um conhecimento adequado de engenharia e uma conclusão entre ambas atuações. Ormsbee e Reddy (1995) afirmam que o aumento nos níveis

urbanização nas últimas décadas, e a conseqüente demanda por água potável, tornou a operação dos sistemas de distribuição uma tarefa bastante complexa, exigindo dos serviços públicos de abastecimento de água grandes esforços nos âmbitos técnico-organizacional e financeiro, na tentativa de atender a demanda.

Diante desta problemática, ainda é insustentável a degradação dos mananciais, em virtude do desenvolvimento desordenado dos perímetros urbanos, que não respeitam as áreas de proteção ambiental, onde rios, reservatórios e mananciais, são engolidos por este desenvolvimento desenfreado, provocando, cada vez mais, uma procura por novas fontes de recursos hídricos a serem exploradas para atender a demanda. Com isto, recursos financeiros são alocados para a construção de novas estações de tratamento, adutoras, rede de distribuição e linhas de transmissão de energia elétrica, esta última sendo um dos insumos mais caros no tratamento e distribuição de água às populações, em virtude da energia elétrica gerada em nosso país, ser uma das mais caras do mundo.

Com todos estes problemas, os sistemas de abastecimento público de água do país não têm controle sobre as perdas físicas de grandes volumes de água produzida, que são desperdiçadas em quilômetros de redes de distribuição de água espalhadas por todo território nacional ou por extravasamento dos reservatórios de água. As perdas implicam em despesas desnecessárias com energia elétrica no bombeamento de água tratada e, conseqüentemente, produtos químicos utilizados no tratamento de água. Ainda requer investimentos prematuros no que se refere à expansão dos sistemas.

Com o Programa de Modernização dos Sistemas de Saneamento (PMSS), existe uma preocupação, dos gestores e técnicos ligados à área de saneamento básico, em propor soluções no sentido de minimizar os custos operacionais no bombeamento e distribuição de água tratada, uma vez que o insumo energia elétrica é um peso muito grande nas despesas de produção de água tratada pelas empresas de saneamento básico. Isto sem levar em consideração que o pagamento pelo uso da água em algumas regiões do país, ainda não é uma realidade.

O ideal seria que o controle operacional tivesse programas de eficiência energética usando a otimização na operação dos sistemas de água e esgotos,

associado a uma política de planejamento na automação destes sistemas. O ideal, também, seria que as redes de distribuição fossem separadas por zonas de pressão ou área de influencia dos reservatórios tornando, desta forma mais viável as análises quanto ao comportamento das redes. Além disso, vale salientar que as maiorias das empresas de saneamento do país não dispõem de dados confiáveis como: pressões máximas e mínimas noturnas, vazões e outros gradientes hidráulicos, para que se possam fazer simulações mais representativas, com diferentes estratégias operacionais para o presente e o futuro.

Nas últimas décadas as técnicas de pesquisa operacional vêm ganhando destaque na análise dos sistemas de recursos hídricos, o que facilita a execução de análises mais realistas dos problemas operacionais. Com o uso de computadores, pode-se utilizar, no gerenciamento de sistemas, técnicas de pesquisas operacionais tais como: programação linear, programação não linear, programação dinâmica, programação inteira e uso de algoritmos heurísticos na otimização do controle operacional.

As decisões são sempre representadas por uma variável de decisão, desta forma a evolução da busca da solução para o problema, via um modelo de programação, é função das variáveis de decisão, conhecida como função objetivo. Segundo Francato (2002), na realização da modelagem matemática do problema, faz-se necessário o estabelecimento de relações lógico-matemáticas a fim de tornar um problema físico em um problema matemático.

As técnicas de pesquisa operacional já vêm sendo utilizadas há mais de três décadas e são ferramentas de grande utilidade quando usadas para reduzir custos operacionais, consumo de energia elétrica e a exploração dos recursos hídricos, como a demanda atendida pelos sistemas de abastecimento de água potável.

Só agora é que algumas empresas de saneamento básico despertaram para utilizar estas técnicas e, junto com a automação, virou panacéia para todos os males e está presente em quase todas as empresas e autarquias de saneamento básico do país.

Projetos são elaborados por empresas terceirizadas, que cobram um alto custo e, na maioria das vezes, não são implantados por faltam de recursos para compra de equipamentos, que, na maioria, são importados. A iniciativa

privada, que através das empresas multinacionais, utiliza seus representantes junto às empresas de saneamento para venderem equipamentos que são instalados sem planejamento e sem projetos, ficando, desta forma, uma grande dificuldade em operar estes equipamentos, por falta de treinamento e transferência de novas tecnologias.

Em sistemas de abastecimento de água geralmente há várias estações elevatórias, tanto para recalque de água bruta como para o recalque de água tratada. Também é comum encontrar a estação elevatória tipo booster, que se destina a aumentar a pressão em redes de distribuição. Em problemas relativos a operação de sistemas de distribuição de água, contendo várias elevatórias, adutoras, reservatórios e válvulas reguladoras, vários métodos podem ser utilizados para simulação hidráulica e otimização do sistema. A interface entre os modelos de simulação hidráulica, de otimização e de definição de regras operacionais deve ser cuidadosamente elaborada, no sentido de dar transparência ao modelo de forma a facilitar a introdução de inequações restritivas e facilitar a obtenção dos valores da função objetivo, nos sucessivos passos requeridos pelo otimizador. Com a ampliação dos objetivos de análise de um sistema de distribuição, o algoritmo de otimização deve ser escolhido de forma a facilitar o seu uso e, ao mesmo tempo, permitir a análise de problemas complexos, envolvendo critérios de múltiplos objetivos.

Técnicas de otimização vêm sendo tradicionalmente usadas no dimensionamento de unidades de sistemas de distribuição água, objetivando menor custo. Segundo Righetto (2002), a interface entre o modelo de simulação hidráulica e o modelo de otimização deve ser cuidadosamente elaborada no sentido de dar transparência ao modelo, de forma a facilitar o seu uso e, ao mesmo tempo, permitir a análise do problema complexo, envolvendo múltiplos objetivos.

O objetivo da operação de sistemas de abastecimento de água é o atendimento, com riscos aceitáveis, das necessidades de consumo e minimização dos custos operacionais e, de maneira implícita, um melhor aproveitamento do sistema de transporte e reservação de forma a retardar investimentos com ampliação. A operação é a seqüência de manobras exercidas sobre os elementos ativos do sistema, como válvulas e bombas, de forma a atender os objetivos.

As operações integradas entre bombas, válvulas e reservatórios devem ser empregadas para obtenção do máximo desempenho do sistema (Xu e Goulter, 1999). O maior problema dos sistemas de abastecimento público de água é a natureza multiobjetivo da operação aliada às incertezas na previsão de demanda e custos. Em geral, considera-se como principal objetivo a diminuição dos custos de produção e operação, porém com garantia de um serviço adequado priorizando a confiabilidade em termos de atendimento qualitativo do consumidor.

As maiorias dos modelos desenvolvidos para sistemas de distribuição de água consideram apenas um objetivo, o custo de operação e manutenção. Isso acontece pela complexidade computacional envolvida quando são considerados outros objetivos como confiabilidade hidráulica e mecânica, flexibilidade e qualidade de água.

As regras operacionais para uma estação elevatória de água bruta ou tratada consistem em um conjunto de normas ou diretrizes que indicam quando uma bomba ou conjuntos de bombas deve ser ligado ou desligado para um determinado tempo. O plano de ação ótimo de bombas é definido com o registro do bombeamento que resultará no mais baixo custo de operação para um dado conjunto de condições, como a demanda do sistema, a tarifa elétrica, e os níveis desejados nos reservatórios de distribuição (Ormsbee et al, 1989).

Por outro lado, já existe uma grande quantidade de técnicas desenvolvidas e em desenvolvimento na área de otimização, principalmente nas universidades, onde a solução para os problemas operacionais nas empresas de saneamento pode ser analisada via técnicas de otimização. Estas técnicas poderiam sair do campo da pesquisa teórica e serem utilizadas, de fato, na prática, principalmente no campo da Engenharia Sanitária, é claro que se resguardando de alguns cuidados especiais, quando da formulação do problema e bem como na análise de seus resultados. Ainda, a tradicional abordagem na busca de alternativas para o planejamento em sistemas de abastecimento de água, no que se refere ao bombeamento de água bruta e tratada e na sua distribuição, fundamentalmente baseada na análise custo - benefício, tem cedido lugar a uma análise mais abrangente considerando múltiplos objetivos.

## 2.2. Operação de bombas em saneamento básico

Segundo Tarquin e Dowdy (1989), um dos itens mais caros nos orçamentos das empresas de saneamento básico, são os custos provenientes com o bombeamento de água para distribuição. Segundo Pezeshk e Heluway (1966), a otimização das operações de bombeamento pode gerar economias significativas, as quais, no caso de grandes sistemas poderão atingir a ordem de centenas de milhares de dólares anualmente, por que se a energia elétrica é um insumo que custa caro, deveria ser bem utilizada.

Em países, como Estados Unidos, Austrália e Espanha são possíveis encontrar experiências bem sucedidas com aplicação de técnicas de pesquisa operacional como meio de reduzir os gastos com energia elétrica e custos operacionais em sistemas de abastecimento de água.

Nos Estados Unidos, Brasiley e Jacobs (1989) relatam que aproximadamente 7% da energia elétrica consumida naquele país é utilizada pelas empresas de saneamento, podendo estimar que 90% deles são referentes ao tratamento e bombeamento de água bruta. Clingenpeel (1963) afirma que mais de 50% dos custos anuais das empresas de saneamento são com energia elétrica, nos quais 95% do orçamento de energia elétrica pode ser associado com os custos de bombeamento.

Em Melbourne, Austrália foi montado um modelo computacional e uma tecnologia de monitoramento para o planejamento e operação do sistema de abastecimento de água (Cosgriff et al, 1985). Com este modelo computacional houve uma melhora no acerto hidráulico quanto a operação e manutenção do sistema, com consideráveis economias nos custos operacionais. Experiências feitas por Brion e Mays (1991), na cidade de Austin, Texas, com modelo de otimização e simulação aplicado no sistema de bombeamento, conseguiram uma redução de 17,3% nos custos operacionais. Leon et al (2000) desenvolveram um sistema híbrido para gerenciar o sistema de abastecimento de água da cidade de Sevilha, Espanha, e os resultados têm fornecido uma economia de 25% no consumo de energia elétrica.

As primeiras pesquisas que tratam do registro ótimo de bombas foram realizadas na década de setenta, aplicando programação dinâmica, (Lansey e Awumah, 1994) seguido por uma série de trabalhos utilizando esse método

(Jolland e Cohen, apesar de muito destes algoritmos terem sido desenvolvidos para sistemas relativamente simples, também tem se utilizado em tempo real para sistemas mais complexos).

Vários autores como Lannuzel e Ortolano (1989), Dandy (1997), Ormsbee e Reddy (1995) e Pezeshk (1996), baseados em experiências de operadores de elevatórias, investigaram possíveis economias potenciais que podem resultar de uma modificação na operação de bombas utilizando recursos de pesquisa operacional acoplados aos modernos recursos de informática, incluindo métodos heurísticos. Dentre estes se podem citar: programação dinâmica (Ormsbee et al, 1989, Zessler e Shamir, 1989, Yeh et al, 1992; Lansey e Awumah, 1994, Nitvattananon et al, 1996): programação linear (Little e McCrodden, 1989; Jowit e Xu, 1990) e programação não linear (Brion e Mays, 1991; Santana, 1999).

Usando uma metodologia aplicável a um sistema de distribuição de água complexo, com separação de zona de influência de reservatórios e com várias estações elevatórias e um único reservatório de distribuição, Ormsbee et al, (1989) utilizou uma metodologia para operação de bombas no qual concluiu duas etapas: a primeira com um desenvolvimento de uma trajetória ótima do reservatório, e a outra com o desenvolvimento de regras de operação ótima de bomba, para alcançar a trajetória ótima. A trajetória ótima utilizando programação dinâmica, enquanto, para a associação de bombas usou um método de enumeração explícita. Este trabalho foi desenvolvido e usado no sistema de distribuição de água de Washington, Estados Unidos.

Zessler e Shamir (1989), após analisarem o funcionamento de redes de distribuição de água, chegaram a conclusão que para um resultado ótimo na operação de bombas, reservatórios e válvulas teriam que fazer uma análise num período de (24 horas) de tal forma que a demanda seja atendida, as condições de pressão satisfeitas e o custo total minimizado. Debateram a utilização da programação dinâmica com ação lógica, porém definiram as limitações práticas do tamanho do problema, em relação ao tamanho da rede.

Este trabalho de técnicas operacionais, proposto pelos autores, foi utilizado na parte norte de Israel. A rede de distribuição foi dividida em dois subsistemas, na qual um dos subsistemas teria que ter uma estação elevatória entre dois reservatórios. Um simulador hidráulico foi usado para estudar cada

subsistema, determinando as condições de vazão, pressão e os níveis dos reservatórios. No outro subsistema foi considerado o anterior como fixo e, adotando a mesma técnica para toda a rede, construindo para cada intervalo de tempo a curva custo em função do bombeamento. Ajustando estas curvas a uma função parabólica para cada estação elevatória e o tempo, e adotando como variável de decisão, na programação dinâmica, os volumes dos reservatórios desta forma a solução poderá ser encontrada.

Segundo Righetto (2002), sistemas de médio e grande porte são projetados e operados com base numa eficiência global, envolvendo questões como: confiabilidade, distribuição de pressão, demandas, consumo de energia elétrica, minimização de perdas, etc. Segundo esta abordagem global, questões relativas à eficiência numérica associada à obtenção de respostas às questões operacionais complexas, vêm impulsionando os pesquisadores a desenvolverem técnicas numéricas apropriadas que permitam resolver o problema específico ou geral de alta complexidade.

Koelle (1996) ressalta que, para a solução do modelo matemático, entendido como sendo o conjunto completo e consistente de equação que representam o sistema físico real, é necessária a inserção de parâmetros complementares obtidos, em geral por via empírica, visando a obtenção de resultados numéricos significativos.

Bao e Mays (1990) dita que a confiabilidade é uma medida da performance (desempenho) do sistema. A performance hidráulica depende das condições ideais que viabilizam fatores como: a) interação entre o sistema de transporte, conservação da capacidade de armazenamento, conservação da capacidade de distribuição, sistema de segurança como funcionamento adequado das válvulas reguladoras e bombas. b) confiabilidade dos componentes individuais do sistema: e c) variação espacial e temporal da demanda.

A confiabilidade pode ser descrita considerando-se dois tipos de falhas: mecânicas e hidráulicas. Falhas mecânicas são do tipo: rompimento de tubulação, falhas no bombeamento, falhas no controle de válvulas, perda de potência, entre outras. É considerado como falhas hidráulicas, as ocorrências de vazões e pressões inadequadas, para um ou mais pontos de demanda do sistema.

Na tentativa de melhorar a eficiência da operação de bombas, Brion e Mays (1991) propuseram três diferentes aspectos: ineficiência das combinações das bombas, registro da operação ineficiente das bombas e bombas ineficientes. Os autores utilizaram um modelo de programação não linear acoplado a um simulador para determinação da operação de custo mínimo em uma rede de abastecimento de água. Considerando que o ótimo global não é garantido, desta forma desenvolveram uma análise de sensibilidade de vários parâmetros do modelo, de modo a estabelecer a combinação que produza a solução ótima.

Usando a linearização das equações e restrições da rede, Jowitt e Germanopoulos (1992) desenvolveram um método usando programação linear para otimizar a operação de bombeamento, num período de 24 horas no sistema de Buckinghamshire Inglaterra. Os autores analisaram os custos da energia elétrica no bombeamento, considerando esta maior componente da operação e, no funcionamento da rede, foram determinados os parâmetros para linearização do sistema.

De acordo com Ulanicki et al (1993), as decisões de seleções de bombas determinaram as condições posteriores de operação e, neste sentido, dominaram as decisões de controle operacional. Um bom procedimento de projeto deveria, portanto, usar um modelo de rede funcionando em condições operacionais ótima. Assim sendo, projetos de estações e seleções de bomba têm recebido ampla cobertura na literatura como Alperovits e Shamir (1997), Ormsbee e Wood (1986), Lansey e Mays (1989).

Os métodos para a determinação de um registro ótimo para operação de bombas em sistemas de distribuição de água foram apresentados por Lansey e Awumah (1994). A metodologia utilizada minimiza o custo de energia elétrica consumida, o modelo inclui restrições quanto ao número de bombas que são ligadas durante certo período, restrições para o nível dos reservatórios, quando há modificação ou variação dos níveis de coluna de água, onde as características hidráulicas do sistema são analisadas, gerando uma simplificação hidráulica e funções de custo para a operação on-line. As funções obtidas para cada combinação de bombas podem ser analisadas rapidamente através de um algoritmo de otimização de programação dinâmica.

Foi analisado por Yu et al, (1994) um setor industrial, quando utilizada a tarifação pela demanda mensal em certo período de tempo (15 a 30 minutos). Foi utilizado o sistema de tarifa de energia elétrica deste setor industrial e verificou-se que a análise da operação ficou mais complexa em relação a um período de 24 horas. Foram, portanto, avaliadas as técnicas de simulação utilizadas, principalmente no que se refere à programação dinâmica, porém limitada a poucos reservatórios na rede de distribuição.

Foram analisados por Ormsbee e Lansey (1994) quais seriam os componentes básicos para um controle ótimo em operação de bombeamento, nos sistemas de abastecimento de água. Inicialmente foram discutidos e examinados vários tipos de modelagens hidráulicas, aplicadas em rede de distribuição para uma posterior avaliação dos modelos de otimização. Foram discutidas as características da estrutura de custo, enfatizando a avaliação apenas dos custos associados ao consumo médio e diário. As restrições quanto à operação foram também avaliadas, principalmente quanto aos níveis de reservatórios.

Existe uma grande quantidade de técnicas operacionais, utilizando algoritmos para o controle ótimo, em sistemas de bombeamento para abastecimento de água. Ormsbee e Lansey (1994) acreditam que novas pesquisas poderiam ser feitas utilizando tecnologias como sistemas de redes neurais onde o campo ainda é vasto na implementação de estratégias para o controle ótimo de operação de bombas.

As estações elevatórias de água bruta e tratada, e também as estações de tratamento de água, são operadas por operadores, que tomam a maioria das decisões usando a sua própria intuição e experiência para decidir ações mais adequadas a cada momento (Leon et al, 2000) baseado em experiências dos operadores. Lannuzel e Ortolano (1989) desenvolveram um método heurístico operacional. As regras provenientes dos operadores experientes foram então combinados a um modelo de simulação num sistema neural.

As dificuldades do uso da programação dinâmica e a complexidade dos modelos de programação não linear foram avaliadas por Ormsbee e Reddy (1995), no que se refere ao número elevado de variáveis de decisão, quando considera a operação de cada bomba a cada intervalo de tempo. Assim sendo desenvolveram um modelo heurístico visando reduzir o número de variáveis de

decisão, adotando, para cada estação de bombeamento, uma única variável a cada período de tempo.

No Brasil, algumas empresas de produção de águas potáveis e Universidades públicas começaram a utilizar técnicas de otimização como a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que apresentou um trabalho com técnicas de otimização intitulado 'Conservação e Uso Racional de Energia Elétrica e Água no Sistema de Distribuição de Água', que será aplicado no Setor de Santana na região norte da Cidade de São Paulo. Este trabalho foi apresentado no IV SEREA Seminário Hispano Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, por técnicos da Diretoria e Planejamento da SABESP, em João Pessoa, em novembro de 2004.

Corrijo e Reis, (2004), descreveram um método onde utilizam Regras Operacionais Ótimas de Sistema de Distribuição de Água Através de Algoritmos Genéticos e Aprendizado de Máquina. O trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo computacional direcionado ao controle operacional ótimo de sistemas de macro distribuição de água potável utilizando o simulador Epanet 2 e algoritmos genéticos multiobjetivo como ferramenta para otimização e um algoritmo de aprendizado de máquina para extração de regras operacionais para o sistema. Este modelo será aplicado no sistema macro distribuidor de água da cidade de Goiânia.

O trabalho de Firmino et al, 2004, consiste na aplicação de uma metodologia de otimização no funcionamento dos conjuntos de motor-bomba, via programação não-linear. Esta metodologia foi aplicada ao sistema adutor principal do abastecimento de água da cidade de Campina Grande, e observou-se que houve bons resultados na redução do consumo de energia elétrica nas unidades de elevação de água tratada.

Os controles operacionais dos sistemas de abastecimento de água são onde os objetivos de um modelo de otimização estão mais envolvidos e, segundo Jarrige (1993), apud Francato e Barbosa (1999), são voltados para a busca do custo mínimo, na qual experiências mostram produzir uma redução de 5 a 20% no consumo de energia elétrica. Nos últimos anos as pesquisas têm demonstrado que a otimização é o caminho que dará as ferramentas e as condições na melhora do controle operacional nos sistemas de abastecimento

de água. As despesas com energia elétrica têm sido as maiores frações dos custos das autarquias e as empresas públicas de saneamento básico. Cabe, portanto, aos pesquisadores aprimorar estas técnicas na tentativa de reduzir o consumo de energia elétrica dos sistemas de distribuição de água potável, e conseqüentemente buscando uma melhor eficiência na operação das elevatórias de água.

### **2.3. Modelos hidráulicos**

Para avaliar as restrições operacionais associadas a alguns tipos de modelo matemáticos, Ormsbee e Lansey (1994) destacaram diferentes modelos para a simulação de uma rede hidráulica classificando-os como: modelos de balanço de massa, modelos de regressão, modelos hidráulicos simplificados e modelos hidráulicos complexos.

#### **2.3.1. Modelos de balanço de massa**

Um balanço simples de massa de um sistema de abastecimento de água simples, com um único reservatório, a vazão no interior do sistema é igual à demanda mais a razão de variação do total armazenado no reservatório. A pressão exigida para o fluxo alcançar o interior do reservatório é omitida e é assumido pela combinação das bombas disponível é que alcança a variação desejada no total armazenado. As pressões exigidas nos nós são, geralmente, assumidas como satisfeitas se o volume restante no reservatório estiver dentro de um limite desejado. Quando se utiliza balanço de massa a um dado fluxo de água, uma vez que o custo de operação está relacionado com a vazão e a energia adicionada para o fluxo.

Modelos multidimensionais de balanço de massa também têm sido desenvolvidos. Tais modelos consistem de importantes relações funcionais entre o nível do reservatório e a vazão bombeada. As influências associadas com relações funcionais podem ser determinadas usando regressão linear ou a partir da linearização de uma rede não linear.

As vantagens destes modelos de balanço de massa é que a resposta do sistema pode ser determinada mais rapidamente do que a partir de modelos de

simulação. Deste modo, eles são bem adaptados para uso com estratégias de otimização que requerem grande número de análises de simulação. Em geral, modelos de balanço de massa são mais apropriados para sistemas de abastecimento regionais no qual o fluxo é conduzido, principalmente, por tubulações maiores (recalques) do que redes de distribuição onde a hidráulica é comumente dominada por sistemas de tubulações malhadas (Jolland e Cohen, 1980).

### **2.3.2. Modelos de regressão**

A não utilização de um simples modelo de balanço de massa se aplica quando a natureza não linear dos sistemas hidráulicos pode ser mais bem representada usando um conjunto de equações obtido através de uma regressão não linear. As exigências das informações para a construção de tais modelos, podem ser obtidas de várias maneiras: curvas de regressão podem ser geradas pela execução intensiva de um modelo de simulação calibrado para diferentes níveis em um reservatório e diferentes condições de operação (Ormsbee et al, 1987) ou pelo uso de informações provenientes das condições atuais de operação para formar uma base de dados sobre a rede, relacionando pressões, vazões de bombeamento, os níveis dos reservatórios, e demandas do sistema (Tarquin e Dowdy, 1989).

Estes modelos têm a vantagem, de serem capazes de incorporar algum grau de não-linearidade do sistema enquanto produzem um mecanismo eficiente para a avaliação da sua resposta. As curvas de regressão e base de dados apenas contêm informações para uma dada rede para uma dada série de demanda. Se a rede muda em relação às demandas previstas e estão fora da série da base de dados tal método dará resultados errados. Além disso, as curvas de regressão são aproximações da resposta do sistema. A não ser que as curvas sejam bem próximas da resposta real, erros podem acumular-se durante o curso da operação, o que pode afetar desfavoravelmente o algoritmo de otimização e a exatidão e aceitabilidade desses resultados.

### **2.3.3. Modelos hidráulicos simplificados**

Os modelos hidráulicos simplificados podem ser usados como um intermediário entre um modelo de regressão não-linear e um modelo hidráulico complexo não-linear. Nestes casos, a rede pode ser aproximada ou analisada usando um modelo de rede macroscópico que usa um sistema de equações hidráulicas linearizadas. Modelos macroscópicos representam o sistema pelo uso de uma rede simplificada. Tipicamente apenas uma bomba, um fator de resistência para a tubulação e uma demanda constante é incluído.

Um modelo linear simples pode representar um sistema em que o limite do sistema seja independente da vazão de bombeamento. Jowit e Germanopoulos (1992) usaram um modelo aproximado para um sistema dominado por cargas de bombas elevadas. Neste caso, pequenas variações nos níveis dos reservatórios não influenciaram significativamente na operação das bombas. Em uma aplicação similar, Little e Mecrolden (1989) desenvolveram um modelo linear simples para um sistema de abastecimento de água no qual a carga para controle do reservatório foi mantida constante. Os coeficientes para os dois tipos de modelos citados podem ser determinados após uma extensa análise do sistema. Como resultado tais modelos devem ser avaliados em uma base dependente do sistema para julgar a sua credibilidade.

### **2.3.4. Modelos hidráulicos complexos**

As técnicas de modelagem hidráulicas complexas têm capacidade para modelar a dinâmica não-linear de um sistema de distribuição de água, através de um conjunto de equações de fluxo quase permanente (Ormsbee e Lansey, 1994). As equações que analisam um sistema de distribuição de água incluem equações da conservação de energia da grade da rede. Estas equações podem ser solucionadas pelo ajuste dos fatores dos nós das grades (Shamir e Howard, 1968), taxa de fluxo na malha (Epp e Fowler, 1970) a taxa de fluxo na tubulação (Wood e Charles, 1972).

Ao contrário dos modelos de balanço de massa e regressão, os modelos hidráulicos complexos são adaptáveis a mudanças no sistema e variações de

demanda. Por exemplo, se um reservatório subitamente for fechado (desacoplado) do sistema, um modelo complexo de simulação, calibrado, forneceria uma resposta das condições do sistema modificado. Um modelo de balanço de massa ou de regressão, por outro lado, requereria modificações da base de dados ou curvas de regressão para considerar as mudanças na resposta do sistema. Embora modelos hidráulicos de simulação sejam mais robustos do que modelos de balanço de massa ou de regressão, eles geralmente requerem mais dados na sua formulação. Eles também requerem muito trabalho para serem calibrados. Como este tipo de modelo demanda um grande suporte computacional quando comparado com os modelos de balanço de massa e de regressão, eles são geralmente mais usados com formulação de controle ótimo que requerem um número mínimo de avaliações do sistema (Ormsbee e Lansey, 1994).

#### **2.4. Modelos de otimização**

A complexidade da otimização de um sistema de distribuição de água reside na dinâmica e quantidade de parâmetros e variáveis envolvidas. Vários estudos têm sido desenvolvidos nas últimas décadas visando adequar estas dificuldades à realidade operacional dos sistemas. Para facilidade de aplicação do processo, vários pesquisadores têm implementado modelos de otimização para componentes isolados do sistema (estações de bombeamento, redes de distribuição, válvulas, reservatórios), considerando a variação das demandas ao longo do dia e os diferentes custos de energia elétrica, buscando uma confiabilidade adequada, em termos de atendimento ao consumidor. Há autores que preferem considerar as unidades do sistema (bombas, válvulas, reservatórios, entre outros) conjuntamente no modelo de otimização, tratando o problema com múltiplos objetivos. Estes objetivos podem ser: a confiabilidade hidráulica e mecânica, os custos de operação e manutenção e os benefícios hidráulicos. Em geral, grande parte dos sistemas de abastecimento de água já está implantada e em plena operação por alguns anos ou até décadas. Em função disso, a otimização da reabilitação dessas unidades tem sido um dos temas apresentados na literatura especializada em desenvolvimento de ferramentas para a melhoria dos sistemas.

Zessler e Shamir (1989) desenvolveram um modelo de otimização progressivo baseado em Programação Dinâmica na operação de um sistema de abastecimento de água para determinar a regra de operação de bombeamento ótima. A aplicação do modelo de otimização se deu no Sistema Ein Ziv, em Israel, que abastece uma área de aproximadamente 180Km<sup>2</sup>. O sistema é composto por sete estações elevatórias e oito reservatórios. O consumo de água que o sistema atende é de  $5,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup> por ano dos quais 68% servem a agricultura e 32% para uso doméstico. O principal manancial está localizado a cerca de 100 m de altitude e a extremidade do sistema está próximo de 900 m de altitude, gerando um grande consumo de energia, com aproximadamente  $13 \times 10^6$  kWh/ano e a média de 2,4kWh/ m<sup>3</sup> abastecidos.

O modelo utiliza as condições necessárias para uma simulação hidráulica, a variação do custo de energia ao longo do dia e uma previsão de demanda para um período de 24 horas a partir de curvas de demanda mediam em intervalo de tempo de uma hora. O algoritmo tem por função objetiva minimizar o custo de energia em função da vazão de entrada do reservatório, do volume armazenado no reservatório e da demanda de consumo no intervalo de tempo, admitindo um controle operacional centralizado em tempo real.

O autor utilizou-se de um modelo de previsão de demanda de consumo de água. Além disso, para cada hora simulada com a demanda prevista construiu-se uma curva da relação vazão e energia gastam para cada estação elevatória.

O algoritmo desenvolvido divide o sistema de abastecimento em seis subsistemas com duas zonas de pressão cada um e cria ciclos de interação sobre os intervalos de tempo até convergir a uma solução ótima local inicial. O ótimo global é alcançado admitindo sua convergência, e é praticamente garantido em todo o sistema.

Mais recentemente, segundo Lippai et al. (1999), modelos de otimização baseados em técnicas como Programação Linear, Não-linear e Dinâmica tem encontrado recursos limitados na área de sistemas de abastecimento.

Muitos modelos de otimização, que surgiram em meados da década de 1990, foram utilizado para reduzir custos de operação e para aperfeiçoar o dimensionamento da tubulação (Cesário- 1995). Coulbeck e Orr (1990),

realizaram um estudo de caso sobre os resultados da implantação de um modelo de otimização, em tempo real, numa cidade da Inglaterra. O modelo priorizava a redução de custos de energia elétrica no bombeamento, utilizando um modelo de previsão de demanda de consumo de água e um modelo simulador. Os autores concluíram, a partir dos resultados, que a implantação trouxe benefícios incluindo: um custo de bombeamento mínimo, um sistema de operação automatizado, instantâneo e com introdução de um sistema de previsão.

Mais recentemente, novos métodos foram propostos para a minimização de custos através de regras operacionais de bombeamento que combinam considerações de qualidade da água ao custo operacional de bombeamento em sistemas de distribuição de água como Sakarya e Mays (2000).

É comum encontrar como Função Objetivo, num processo de otimização a minimização dos custos de energia elétrica. Entretanto, no caso do sistema adutor de grande porte, outro fato é ainda de maior preocupação, o melhor atendimento à demanda apesar da limitação de oferta.

Percebem-se que é importante compreender as condições locais, para estabelecer as variáveis envolvidas e entender que se pode obter ganhos na aplicação de regras operacionais evoluindo para uma operação ótima. Dessa forma, a operação do abastecimento de água tende a aproveitar vantagens cada vez maiores com o crescente desenvolvimento de modelos de otimização.

Os modelos de simulação hidráulica representam ferramentas poderosas para a determinação das características hidráulicas de um sistema de abastecimento de água. Esses modelos podem ser usados para a determinação das principais características do sistema (pressões, operação das estações elevatórias, níveis de água nos reservatórios, etc.), porém, não podem determinar o ótimo funcionamento ou os custos mínimos de operação e manutenção (Mays e Yeoh-Koung, 1992).

A principal função de um sistema de distribuição de água é atender as demandas com pressões adequadas. A principal função do projetista e do operador é determinar um custo mínimo para a operação e manutenção do sistema de forma atender adequadamente o usuário. Em geral, o problema é determinar o custo inicial que pode incluir investimentos em tubulações, reservatórios, válvulas, bombas e os custos com energia elétrica das estações

elevatórias. De forma geral, o problema de otimização de sistemas de distribuição de água potável pode ser descrito da seguinte forma:

Minimizar: custos de investimentos+ custos de energia elétrica+impostos

Sujeitos a:

Restrições hidráulicas

Atendimento das demandas de água

Pressões adequadas

A literatura reporta diversos modelos de otimização aplicados à operação de sistemas de abastecimento de água expresso na forma linear (Shamir, 1974; Alperovits e Shamir, 1977; Quindry et al.; 1981; Morgan e Goulter, 1985 Carrijo, 1989).

Como visto, os problemas de otimização apresentam uma estrutura clássica, em que se procura maximizar ou minimizar uma função objetiva, respeitando um conjunto de uma ou mais equações ou inequações conhecida como restrições. As funções objetivas e as restrições envolvem variáveis de decisão, de estado e os parâmetros de processamento. Elas representam uma forma de medir o desempenho do modelo especificado através dos valores das variáveis de decisão, as quais definem como sistema será operado. As restrições para problema de sistemas de abastecimento de água podem ser divididas em três grupos (Ormsbee e Lansey, 1994):

Limitações físicas dos sistemas (capacidade dos reservatórios, capacidade dos mananciais, configuração das bombas, etc.);

Leis físicas (conservação de massa nos nós da rede, conservação de energia nos anéis, etc.); e

Requisitos externos (atendimento da demanda, manutenção dos níveis de pressão aceitáveis, etc.).

Um sistema de distribuição de água é composto de vários elementos que, em conjunto, determinam a operação confiável ou não das estações de bombeamento, adutoras, reservatórios, válvulas de controle e redes de distribuição.

Várias técnicas tem sido apresentadas pela literatura para otimização de sistemas de distribuição de água. Righetto (2002) propôs a utilização dos algoritmos genéticos para otimização de regras operacionais, para um sistema de distribuição de água composto de reservatórios, estações de bombeamento, válvulas e rede de distribuição. O autor sugeriu a adoção de parâmetros de performance ótima, relacionadas com o consumo mínimo de energia elétrica, máxima confiabilidade, máximo atendimento da demanda e a minimização das perdas do sistema através da adoção de pressões adequadas nos nós de demanda. Para implementação do método e atendimento dos objetivos propostos, o autor sugeriu um modelo hidráulico e de otimização combinados baseado no método das características, nos algoritmos genéticos com a utilização de ranqueamento para a seleção das soluções e na definição de parâmetros para obtenção da regra operacional mais adequada para a operação do sistema hipotético proposto.

Métodos evolucionários, como algoritmos genéticos, têm sido usados com grande frequência em otimização de projetos e operação de sistemas de distribuição. Um algoritmo de otimização denominado Ant Colony Optimization Algorithms (ACOAs) foi proposto por Maier et al. (2003). ACOAs são métodos evolucionários baseados no procedimento utilizado pelas formigas para busca de alimentos. Os autores propuseram a utilização do referido método na implementação de um modelo de otimização de projetos de sistemas de distribuição. Os resultados obtidos com a aplicação dos ACOs foram comparados com os obtidos com aplicação dos algoritmos genéticos. Os ACOAs mostraram-se de acordo com os autores, mais eficientes, tanto em termos de tempo de processamento computacional quanto em termos de habilidade para a obtenção de soluções próximas das ótimas globais.

Com o objetivo de resolver um problema de otimização multicriterial, na determinação de uma estratégia ótima para o controle de um sistema em tempo real, Bhattacharya et al (2003) propuseram a utilização de técnicas de aprendizado de máquina (machine learning) como uma rede neural artificial (artificial neural network-ANN) e aprendizado reforçado (reinforcement learning-RL). Segundo os autores, a programação não linear e/ou a dinâmica poderiam ser usadas para a obtenção da solução, porém, para sistemas complexos, esta técnica consumiria um tempo computacional extremamente elevado. Na

proposição, o RL usado para diminuir o erro do componente baseado no ANN. O modelo foi testado no controle ótimo da operação de um complexo sistema de abastecimento de água da Holanda e os resultados, de acordo com os autores, foram bastante satisfatórios.

Com o objetivo de aprimorar a utilização dos algoritmos genéticos na otimização operacional de sistemas de distribuição de água, Zyl et al. (2004) propuseram a utilização de um método híbrido que combinava o algoritmo genético com uma estratégia de busca hillclimber. Segundo os autores, as estratégias hillclimber completavam os algoritmos genéticos a eficiência na busca de um ótimo local. Foram investigadas duas estratégias diferentes: o método de Hooke e Jeeves e o de Fibonacci. O método híbrido provou ser melhor que o algoritmo genético puro na busca rápida da solução ótima, tanto para um sistema teórico simples quanto para um sistema real complexo.

Dentre as unidades de um sistema de abastecimento de água, as estações de bombeamento são as que apresentam maior complexidade com relação às questões de custos, confiabilidade, benefícios hidráulicos e flexibilidade. Em função disso, vários autores têm preferido desenvolver modelos de otimização considerando exclusivamente o funcionamento desta unidade.

Bombas aparentemente operadas com eficácia são similares àquelas que desperdiçam energia elétrica. O problema maior é identificar quais bombas são ineficientes e por que. A melhor abordagem depende da utilidade e do orçamento. Walski (1993) enumerou uma série de causas que podem levar uma bomba a operar de forma a não atender uma condição de custo ótimo:

- Seleção incorreta da bomba;
- Limitação na capacidade de transmissão-distribuição do sistema
- Inadequação na operação do tanque hidropneumáticos
- Incompatibilidade dos equipamentos de telemetria
- Incapacidade de controle automático ou remoto de bombas e válvulas
- Inexistência de uma política adequada de energia elétrica;
- Não verificação da demanda ou da potência;
- Equívocos por parte do operador; e
- Não atendimento das condições ótimas na definição das estratégias de controle.

O desenvolvimento de uma metodologia para otimizar a operação de bombas em um sistema de abastecimento de água, através da diminuição dos custos de energia elétrica, foi apresentado por Ormsbee et al. (1989). Os autores propuseram uma metodologia envolvendo duas fases básicas: o desenvolvimento de uma trajetória ótima de nível de água no reservatório e desenvolvimento de uma política operacional ótima da bomba para encontrar uma trajetória (curva) ótima global. A trajetória ótima do nível de água no reservatório foi determinada utilizando programação dinâmica, enquanto a política associada á bomba foi determinada através da utilização de enumeração explícita. O modelo foi aplicado a um setor da rede de distribuição de Washington D.C. e possibilitou uma diminuição no custo anual de energia elétrica de 6,7%, quando comparado ao custo previsto em projeto. Utilizando uma abordagem similar, porém considerando curvas diferentes para diversas combinações de conjuntos motor-bomba, Lansey e Awumah (1994) propuseram uma análise do problema via programação dinâmica, com restrição no número de bombas em funcionamento. Diferentemente de Ormsbee et al (1989) desenvolveram curvas para cada combinação de bombas, possibilitando uma maior versatilidade com relação á operação do sistema.

Nas últimas décadas, os responsáveis pela administração dos serviços de saneamento têm buscado novas tecnologias no sentido de aprimorar a operação diária dos sistemas de distribuição de água, diminuindo os custos operacionais. Seguindo esta premissa, Ormsbee e Reddy (1995) enfatizaram que um dos componentes de maior custo nos sistemas é a estação de bombeamento. Visando a diminuição dos custos de operação deste componente do sistema, os autores propuseram uma política operacional para uma estação de bombeamento. Utilizando o sistema SCADA e um software de apoio de controle operacional, o modelo definia regras para a operação diária dos conjuntos motor-bomba de uma determinada estação. A política ótima de bombeamento foi definida como aquela que resultava no menor custo operacional total para um dado conjunto de condições limites e restrições hidráulicas do sistema. Os referidos autores desenvolveram uma heurística não-linear para obtenção das políticas de bombeamento de baixo custo. Como não foram apresentados resultados da aplicação da técnica, em um sistema

real de distribuição de água, não é possível avaliar a validade do modelo proposto.

Considerando que os custos da energia elétrica em sistemas de distribuição de água representavam a maior parte dos custos totais relativos às despesas operacionais, Jowitt e Germanopoulos (1992) implementaram um modelo baseado em programação linear para determinação do custo ótimo(mínimo) em estações de bombeamento com base em 24 horas de funcionamento. Os autores consideraram os custos relativos à energia consumida e à demanda. Foram enumeradas as restrições operacionais, as características hidráulicas do sistema, o perfil de demanda e a política tarifária local de energia elétrica. O modelo foi aplicado a um pequeno sistema de uma cidade da Inglaterra, porém os resultados com relação a otimização não foram apresentados, pois a preocupação maior dos autores era com relação ao tempo de processamento. Também com a preocupação de reduzir o tempo de processamento do modelo de otimização, Pezeshk e Helweg (1996) propuseram um método chamado algoritmo de busca por ajuste, para otimizar a operação de uma estação de bombeamento de água. Este algoritmo era um modelo discreto de otimização por busca, que selecionava uma das bombas para ser ligada ou desligada, usando uma combinação de coeficientes de influência e leituras de pressão na rede. Os autores ressaltaram que atingiram valores ótimos após três ou quatro iterações e orientaram para a utilização do modelo no controle de sistemas em tempo real.

Com o objetivo de otimizar a operação de estações de bombeamento em sistemas de distribuição de água, através da redução dos custos de energia elétrica, Brion e Mays (1991), Yu et al. (1994), Pezeshk et al. (1994) e Kadar e Bariudin (2001), McCormick e Powell (2003), implementaram modelos utilizando programação não linear, devido ao formato do problema, em termos do número das variáveis de decisão e de suas características não-lineares.

Com a proposta de gerar uma regra geral para a operação de estações de bombeamento em tempo real, considerando dificuldades como complexa política tarifária, variação de demanda, vazões de bombeamento discretas entre restrições hidráulicas, Nitivattananon et al. (1996) propuseram um modelo de otimização progressiva. O modelo dividia o sistema em vários subsistemas no tempo e espaço, planejando intervalos dentro dos períodos operacionais. A

otimização progressiva era aplicada para resolver o modelo de programação dinâmica. As vazões das bombas eram discretizada e rearranjadas através de métodos heurísticos, com o objetivo de reduzir o período de tempo em que as bombas estavam em operação. O modelo foi aplicado ao sistema de abastecimento de água da cidade de Pittsburgh e a solução ótima apresentou uma redução de 20% nos custos de operação das estações de bombeamento, quando comparados com os custos reais.

Utilizando a qualidade da água como parâmetro, Sakarya e Mays (2000) desenvolveram uma metodologia para a determinação da operação ótima de bombas de um sistema de distribuição da água. Na metodologia proposta, a solução do problema de otimização era obtida utilizando uma interface entre o simulador hidráulico e de qualidade *EPANET* e um código de otimização não linear denominado *GRG2*. As variáveis de estado eram incorporadas como restrições na função objetivo usando método de penalidade Langrangeando. Foram consideradas três funções objetivo no problema: minimização dos desvios entre as concentrações atuais e desejadas de um constituinte em particular, minimização do tempo total de operação das bombas e distribuição de água hipotética. Segundo os autores, foi possível encontrar uma política ótima de funcionamento das bombas, com considerações de qualidade da água, atendendo aos três objetivos.

A relação entre a operação das bombas na estação das bombas na estação elevatória e os níveis dos reservatórios para atendimento das demandas diárias, tem sido a preocupação de vários pesquisadores nos procedimentos de otimização da operação de um sistema de água. Ko et al. (1997) utilizaram uma técnica de análise multiobjetivo para determinar a operação ótima de bombas e reservatórios em sistema de distribuição. Os autores definiram três objetivos distintos: econômico, em termos de minimização dos custos de energia elétrica na estação de bombeamento, estabilidade na operação das bombas e confiabilidade no atendimento de demandas que variam aleatoriamente. Estes três objetivos foram avaliados, baseados no tempo total em que as bombas estavam ou não em operação, no custo total requerido de energia e no nível mínimo de água requerido nos reservatórios. Um algoritmo de programação dinâmica foi aplicado para encontrar a solução ótima para o problema multiobjetivo discretizado. A

metodologia foi testada no sistema de distribuição de água da cidade de Kumi na república da Korea. Segundo os autores os resultados da otimização multiobjetivo indicaram um potencial melhoramento da operação do sistema quando comparada às operações históricas. Considerando, da mesma forma, a relação entre estações de bombeamento e reservatórios, Kazantzis et al. (2002) propuseram uma metodologia para a otimização da operação de uma estação elevatória considerando dois objetivos maximização do bombeamento no período de tarifa mínima e minimização das cargas das bombas com a racionalização dos níveis dos reservatórios. Foi desenvolvida uma ferramenta de otimização utilizando algoritmos genéticos para encontrar os controles ótimos para uma faixa de demandas diárias. A nova metodologia foi testada em parte do sistema de abastecimento de água de Murray Bridge na Austrália. Segundo os autores, os resultados apresentaram uma redução entre 15 e 20% nos custos relativos a energia elétrica do sistema em questão.

Em termos de otimização de sistemas de abastecimento de água, a literatura apresenta vários trabalhos nos quais é considerado o sistema como um todo, não adotando uma metodologia específica para unidades isoladas. Nessa linha de verificação, termos como confiabilidade do sistema, custos operacionais, benefícios, flexibilidade, reabilitação, entre outros, são considerados nos objetivos definidos para o processo de otimização. Trabalhos propondo metodologia de otimização para confiabilidade de sistemas de água foram apresentados por Su et al. (1997), Ormsbee e Kessler (1990), Xu e Goulter (1999), Shinstine et al. (2002), Tolson et al. (2004) e Prasad e Park (2004), considerando a maximização de benefícios hidráulicos para o sistema foram sugeridos por Walters et al. (1999), Walski (2001) e Wu (2002) e considerando a reabilitação de sistemas de distribuição de água, podem ser encontrados em trabalhos propostos por Cheung et al. (2003) e Cheung (2004).

Um modelo para otimizar a operação de um sistema de abastecimento de água, utilizando a otimização progressiva, num método de programação dinâmica iterativa, foi implementado por Zessler e Shamir (1989). Dados, demandas para um período de 24 horas, condições iniciais e finais dos reservatórios, propriedades hidráulicas de todos os elementos do sistema e os custos de energia elétrica ao longo do dia encontra(m)-se o(s) ponto(s) ótimo(s) de trabalho do(s) conjunto(s) moto-bomba(s). os autores afirmaram que

o processo convergia para um ótimo global ( sob certas condições definidas nas funções) quando valores ótimos não mudavam de uma geração para outra.

Com o objetivo de desenvolver uma ferramenta suporte para obtenção de política operacionais ótimas em sistemas de distribuição de água para o período estendido de 24 horas, Almeida e Barbosa (2002) desenvolveram um modelo hidráulico de otimização estruturada na forma de um problema de programação não-linear inteira mista de grande escala, cuja solução foi obtida pela associação do algoritmo do gradiente reduzido generalizado com algoritmo de programação inteira, o branch and bound. O modelo proposto foi utilizado para avaliar as insuficiências das condições iniciais de reservação de um sistema de distribuição de água com relação ao consumo de energia elétrica de uma estação de bombeamento tipo booster. Os resultados indicaram economia na ordem de 36% no consumo de energia elétrica, quando se alteravam as condições iniciais dos reservatórios do sistema. Os autores sugeriram que o modelo era capaz de fornecer subsídios para as tomadas de decisão com relação a operação de sistemas de abastecimento de água.

Francato (2002) apresentou um modelo que utilizava uma metodologia baseada no método da teoria linear para otimização da operação de um sistema de distribuição de água. Para a abordagem multiobjetiva do problema, o autor sugeriu a utilização do método dos pesos. Devido ao grande numero de variáveis e da necessidade de geração de conjunto de soluções não dominadas, o autor optou pela utilização de programação linear para a otimização.

Um sistema de distribuição de água deve ser operado na base diária com o menor gasto de energia elétrica e de manutenção, fornecendo para cada nó da rede de distribuição a demanda de consumo à pressão desejada. Além disso, deve ser confiável no sentido de permitir o suprimento de água em condições anormais ocasionadas por avarias em componentes do sistema. Com objetivo de atender a estes requisitos, Righetto (2002) propôs uma metodologia para encontrar a operação ótima de sistema de distribuição de água, envolvendo parâmetros relacionados com o consumo de energia elétrica, confiabilidade operacional, satisfação quanto ao atendimento da demanda e controle das pressões nos nós. O modelo de otimização foi baseado em algoritmo genético. O autor utilizou cinco índices para avaliar a performance

das regras operacionais ao longo de 24 horas de funcionamento do sistema: índice de consumo de energia elétrica, índice de nível de água de reservatório, índice de atendimento de demanda, índice de adequação da pressão média e índice de mudanças operacionais. O modelo foi aplicado a um sistema hipotético simples, com o objetivo de ilustrar o procedimento para a determinação das regras operacionais desejadas, apresentando eficácia nesta aplicação.

O principal objetivo de um sistema de abastecimento de água é satisfazer a demanda dos consumidores. Para que isto ocorra, deve haver equilíbrio entre a adução e os diversos componentes do sistema, como estações de bombeamento, válvulas e reservatórios. Na maioria dos modelos de otimização para sistemas de abastecimento de água, a minimização dos custos é o critério básico adotado, Klempous et al. (1997) propôs um modelo baseado em três níveis:

- o primeiro era controle direto das unidades de bombeamento, ajustes das válvulas de controle, cargas e vazões de um sistema. Nesse nível, baseado num algoritmo de controle, era determinado o número de bombas em funcionamento. Assim como a posição desejada de regulação de válvulas. Os valores recomendados de carga e vazão eram fornecidos como parâmetros do algoritmo de controle, a partir do segundo nível de modelo.

- O segundo, determinava os valores dos parâmetros descritos anteriormente (carga vazão) que garantiam a implementação da demanda aos usuários. Os valores desses parâmetros eram obtidos da minimização dos custos de energia elétrica. Como resultado deste nível, obtém-se um gráfico ilustrando a cooperação entre estações de bombeamento e reservatório.

- O terceiro nível determinava um gráfico ótimo para enchimento dos reservatórios. Este era baseado no histograma previsto de demanda dos consumidores. O algoritmo garantia o atendimento da demanda e a minimização dos custos de energia considerando a variação dos preços de energia elétrica.

Por falta destes conhecimentos, é que muitas técnicas, na área de otimização tem deixado de ser aplicadas em saneamento básico numa dimensão real em virtude de uma falta de aproximação maior entre os que fazem pesquisas e os gestores do saneamento básico deste país. As

universidades estão cheias de pesquisadores e trabalhos já realizados neste campo, as bibliotecas são ricas em bibliografia desta natureza. Infelizmente ainda não temos uma lei que regulamenta o saneamento básico no Brasil, estamos esperando por projetos neste sentido desde 1968.

## **2.5. Métodos de programação matemática**

### **2.5.1. Programação linear**

Programação linear é largamente usada como técnica de otimização operacional de sistemas de distribuição de água. Geralmente é utilizada para resolução de um tipo específico de problema, onde as relações entre as variáveis, tanto nas restrições como nas funções objetivo são lineares.

Sob estas condições, problemas não lineares podem ser linearizados e resolvidos por interação ou procedimento de aproximação usando programação linear. Para que seja obtido um resultado satisfatório na aplicação, é necessária a utilização de funções custo convexas, e funções benefícios côncavas.

### **2.5.2. Programação não linear**

Programação não linear não tem sido utilizada com muita freqüência em otimização de sistemas de distribuição de água. Isto ocorre, particularmente, devido o fato do processo de otimização ser usualmente lento e depende de um tempo computacional longo quando comparado com outros métodos.

A programação não linear pode, entretanto, oferecer uma formulação matemática mais geral que a programação dinâmica e pode fornecer uma fundamentação para análise por outros métodos. A programação não linear inclui a programação quadrática, a programação geométrica e, num caso especial, a programação separável que pode ser usada interativamente como um programa mestre ou um subprograma na aplicação em grandes sistemas.

### **2.5.3. Programação dinâmica**

Programação dinâmica é um procedimento utilizado para otimização de processos de decisão multi-estágio e bastante aplicado em sistemas de distribuição de água. A popularidade e o sucesso desta técnica podem ser atribuídos ao fato de que as características não lineares e estatísticas, que caracterizam a maior parte dos sistemas de água, podem ser traduzidas na formulação da programação dinâmica (Yeh, 1985).

Para aplicação da programação dinâmica na otimização de sistemas de distribuição de água, o problema deve ser decomposto em um determinado número de estágios e analisado, de um estágio para o próximo, para todos os estados operacionais. Na finalização dos resultados, aquele que apresentar o valor mais econômico é selecionado como solução do problema.

### **2.5.4. Métodos heurísticos**

#### **2.5.4.1. Algoritmos genéticos**

De acordo com Goldberg e Kuo (1987), tanto a programação matemática como os métodos gradientes têm aplicação restrita quando considerados tamanho e tipo de problemas encontrados em sistemas de abastecimento público de água. Os autores sugeriram como métodos de otimização, para estes casos, os algoritmos genéticos, por apresentarem as seguintes vantagens:

- Têm uma orientação mais global que muitos outros métodos usados em engenharia;
- São eficientes e robustos;
- Têm grande aplicação em várias áreas de engenharia;
- Trabalha com o código dos parâmetros e não com os parâmetros propriamente ditos;
- Realiza a busca em uma população de pontos e não em um único ponto;
- Utilizam informação apenas da função objetivo, não necessitando de derivadas ou de outras informações, e,

- Usam regras de transição probabilísticas e não determinísticas na identificação de soluções alternativas.

No entanto, vale salientar que os algoritmos genéticos e similares (ant colony, simulated annealing, etc.) são mais utilizados para problemas que apresentem descontinuidade de funções ou tenham características altamente não lineares, aonde outros métodos falham, devido ao elevado tempo computacional para se achar uma resposta ótima.

#### **2.5.4.2. Lógica fuzzy**

Angel et al. (1999) desenvolveram um sistema expert baseado em lógica fuzzy para um decisor de operação de um sistema de distribuição de água. O sistema usava o conhecimento derivado da experiência de operadores e dados do sistema SCADA. Eram coletados dados, em diferentes intervalos de tempo, da variação dos níveis de água nos reservatórios e estes eram usados no sistema experimental para desenvolver decisões operacionais na manutenção dos níveis ótimos.

#### **2.5.4.3. Otimização heurística**

É possível desenvolver métodos de otimização operacional heurístico, baseados em custos e desempenho de diferentes pontos de funcionamento de elementos de um sistema hidráulico. Ormsbee e Reddy (1995) desenvolveram um modelo utilizando esta idéia. Eles primeiramente programaram combinações viáveis de bombas com base num custo padrão de operação para cada combinação. As variáveis de decisão consistiam de uma variável simples (correspondente a uma combinação de bomba) para cada estação de bombeamento, em cada intervalo de controle. Um modelo de simulação do sistema foi acoplado ao método para verificação da acurácia do processo. Os resultados mostraram que o método poderia fornecer um conjunto de soluções factíveis em termos de custo e eficiência.

Um outro método heurístico foi proposto por Pezeshk e Helweg (1996). Eles usaram um método de otimização de busca adaptado para otimizar o funcionamento de bombas de um sistema com combinações simples e tarifa de

energia elétrica fixa. Primeiramente uma boa combinação de bombas era selecionada. Esta combinação era testada num simulador hidráulico e as vazões e pressões no sistema eram comparadas com as requeridas e inseridas no sistema. Um coeficiente de influencia era determinado para cada ponto monitorado e estação de bombeamento. Este coeficiente fornecia uma indicação do impacto na variação de pressão no ponto monitorado, quando a estação de bombeamento estava em operação. A estação de bombeamento com o maior coeficiente era selecionada para o sistema. O processo era repetido até que a seleção da bomba satisfizesse a pressão requerida para o sistema.

## Capítulo III

---

### 3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM ESTUDO

#### 3.1. Introdução

A Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), é responsável pelo atendimento de água tratada a mais de 90% da população do estado da Paraíba e é dividida em regionais. Conforme mostra a Figura 3.1, a sede de cada regional fica localizada na principal cidade de cada região e é descentralizada com autonomia de decisões. Desta forma, a companhia presta um melhor atendimento não só ao cliente, mas também uma melhor assistência na operação e manutenção dos sistemas.

A CAGEPA tem como atribuições a captação de água em rios, barragens e lençóis subterrâneos e, em seguida, submete a um tratamento compatível com suas características para torná-la própria para consumo humano. Um serviço de abastecimento água, não pode ser deficitário por que põe em risco a saúde da população servida. A Empresa tem como objetivo principal tratar água em quantidade e qualidade, mantendo um serviço contínuo e com um custo acessível ao cliente. Um sistema de abastecimento de água é normalmente constituído das seguintes unidades: manancial de superfície ou subterrâneo, reservatório, captação, estações elevatórias, tratamento, distribuição e ligações domiciliares.

A produção de água potável exige altos investimentos e insumos diversos para sua purificação. A qualidade da água é de fundamental importância para a saúde pública, quando distribuída em condições que atendam o consumo humano. Para alcançar essas metas, devem ser cumpridas normas técnicas que abrangem parâmetros físicos, químicos e microbiológicos de tal forma que a água esteja livre de organismos patogênicos ou substâncias que possam prejudicar a saúde da população.



Figura 3.1 – Regionais da CAGEPA. - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba. Com a sede na principal cidade de cada regional. Cidades sede: Litoral João Pessoa, Brejo Guarabira, Borborema Campina Grande, Espinharas Patos, Rio do Peixe Sousa, Alto Piranhas Cajazeiras.

O objeto deste estudo é o sistema de abastecimento de água de Campina Grande, cidade paraibana, 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 de água é administrado pela CAGEPA, Empresa pública estatal. O sistema em estudo esta relacionada à macro distribuição principal que é constituído por quatro reservatórios, seis estações elevatórias e uma estação de tratamento de água (ETA).

### 3.2. Barragem

Os sistemas de abastecimento de água, na sua concepção, são extremamente variáveis em função do porte da cidade, topografia e sua posição em relação aos mananciais.

A Barragem Epitácio Pessoa, Figura. 3.2, fica a uma distância de 44 km a jusante de Campina Grande PB e é conhecida, também, como açude de Boqueirão. Está localizada no município de Boqueirão, numa região de clima semi-árido com precipitação pluvial média anual de 540 mm (DNOCS, 1999). Sua área 12.400 Km<sup>2</sup> de drenagem engloba parte da bacia do rio Paraíba. Apesar de possuir uma bacia hidrográfica relativamente grande, o rio não é perene, apresentando vazão nula em diversos meses do ano.



Figura 3.2 – Vista da Barragem Epitácio Pessoa (Boqueirão)

### 3.3. Captação

A água bruta é captada através de uma torre de captação Figura 3.3 que funciona precariamente, em virtude de só operar com a última comporta. No interior da barragem localiza-se uma tubulação de aço de 1.500mm e, através de uma derivação nessa tubulação, sai duas adutoras, também em aço de 900 mm e 1.100 mm, conduzindo a água bruta até um barrilete de sucção na estação elevatória de água bruta (EEAB) Figura 3.4. A vazão média aduzida da barragem até a ETA é de 1,3 m<sup>3</sup>/s, que é bombeada por uma estação elevatória, mostrada na Figura 3.5, que através de conjuntos motor-bomba recalca a água bruta. A água é transportada através de duas adutoras, de 800 e 900 mm, até a ETA de Gravatá, conforme esquema na Figura 3.6.



Figura 3.3 – Torre de captação na barragem de Boqueirão



Figura 3.4 – Barriletes de sucção de água bruta EEAB



Figura 3.5 – Elevatória de água bruta EEAB

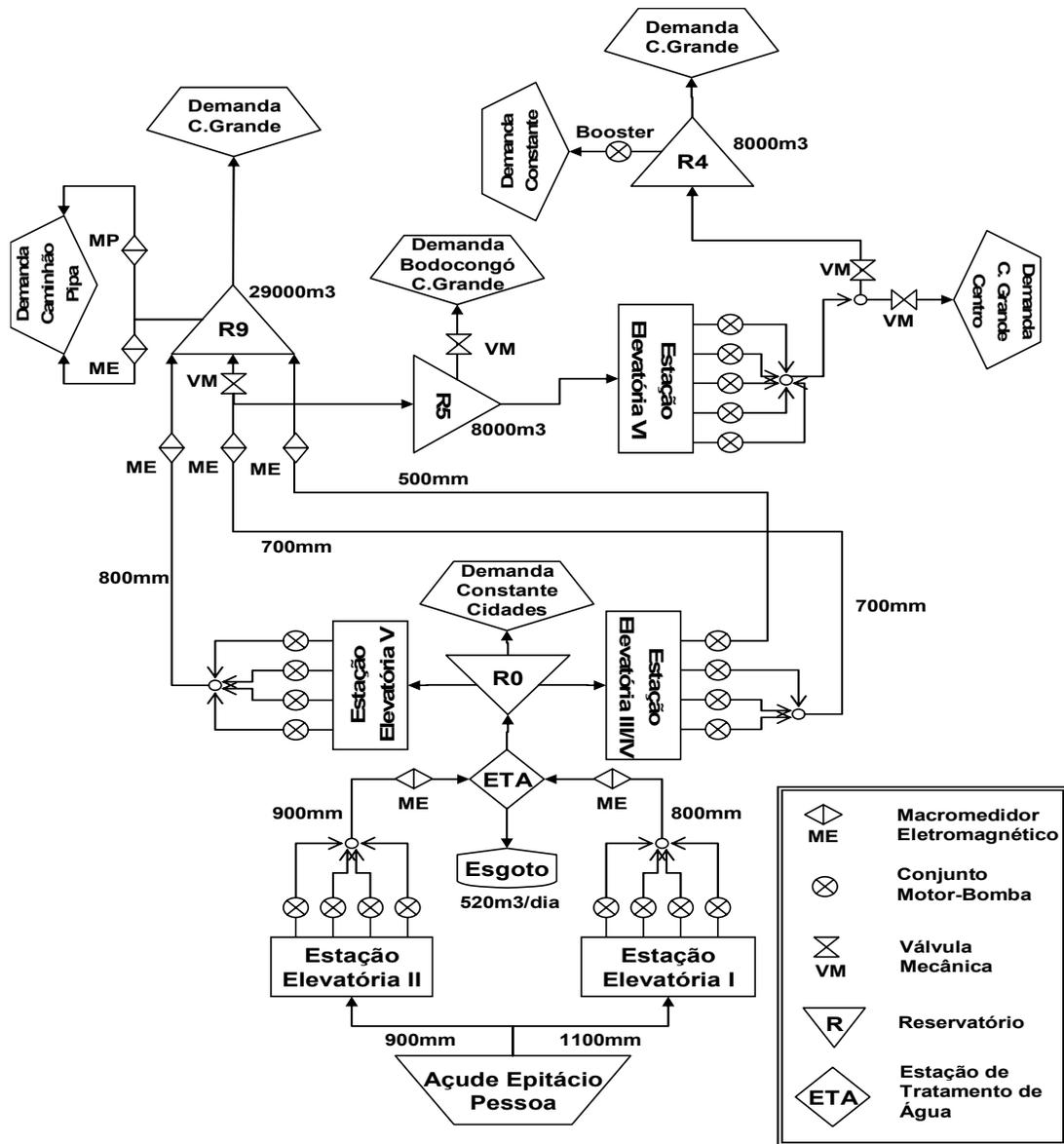


Figura 3.6 – Sistema Adutor Principal

### 3.4. Tratamento

As ETAS são unidades operacionais dos sistemas de abastecimento de água que devem fornecer às comunidades água potável, ou seja, água de boa qualidade que atenda as normas e padrões de potabilidade vigente no país.

A tecnologia utilizada no tratamento de água no sistema de abastecimento de Campina Grande, pela ETA de Gravatá Figura 3.7 inicia-se pela filtração seguida de coagulação, floculação, decantação, filtração descendente e desinfecção por cloro.

A estação de tratamento, com capacidade de tratamento de até  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , recebe, em média,  $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$  de água bruta, onde o processo de tratamento começa pela mistura rápida com adição de sulfato de alumínio líquido e cal. O primeiro é um reagente químico responsável pela floculação e o segundo é um elemento químico que corrige o pH da água.

O processo de floculação, mostrado na Figura 3.8, se realiza após a mistura rápida. A água coagulada passa por floculadores mecânicos de eixo verticais tipo paletas, mostrado na Figura 3.8. Na ETA de Gravatá existem vinte quatro unidades e, devido a agitação proveniente destes equipamentos, os flocos tendem a aderir uns aos outros se tornando pesados, para posterior separação na decantação.



Figura 3.7 – Estação de tratamento de água de Gravatá

A etapa seguinte é a decantação. A água floculada passa por onze unidades de decantação do tipo escoamento horizontal, com tempo de detenção de 2,5 horas com uma produção de água decantada de 7.611,8 metros cúbicos dia por unidade de decantação.



Figura 3.8 – Misturadores de sulfato ETA de Gravatá

A filtração rápida e descendente é a mais utilizada no tratamento de água em todos os sistemas de abastecimento de água no Brasil. Esta tecnologia de filtração é utilizada pela CAGEPA. A ETA de Gravatá possui onze filtros rápidos com uma área total de 475 m<sup>2</sup>, com uma taxa de filtração máxima de 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dia, filtrando em média 142.500 m<sup>3</sup>/dia, onde este volume filtrado corresponde à vazão máxima da ETA, que é a de projeto. A taxa de filtração hoje em operação é de 176 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dia, que corresponde a 83.600 m<sup>3</sup>/dia, sendo a vazão de produção da ETA. Os filtros geralmente são de seção quadrada com meio filtrante com dupla camada de areia e antracito, sendo a camada suporte com três subcamadas de pedregulho e fundo com sistema de canalizações perfuradas. Depois da filtração, a água passa para uma galeria de contato, onde recebe a desinfecção com cloro gasoso, etapa final do processo de tratamento.

Após de todas estas etapas no processo de tratamento, a água é encaminhada para dois reservatórios: lavagem de filtros e poço de sucção onde é bombeado para o sistema de distribuição.

### 3.5. Estações elevatórias

Em sistemas de abastecimento de água há várias estações elevatórias tanto para o recalque de água bruta, como para o recalque de água tratada. O sistema adutor de Campina Grande é constituído de dois subsistemas um de água bruta e outro de água tratada, conforme mostram as Figuras 3.9 e 3.10. Para este último, subsistema adutor de água bruta, compreende duas linhas adutoras com diâmetro de 800 e 900 mm em aço, que veiculam uma vazão de  $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$  a uma distância de 21 km até a ETA de Gravatá. As duas elevatórias possuem oito conjuntos elevatórios, tendo quatro conjuntos em cada elevatória. Os conjuntos elevatórios possuem motores de marca Toshiba de 650 CV, que funcionam a uma amperagem de 150 A com uma voltagem de 2.300V. As bombas são de fabricação Worthington com uma vazão média de  $1547 \text{ m}^3/\text{h}$  a uma altura manométrica de 150 mca, aonde o rendimento destes conjuntos elevatórios chega a 98% de sua eficiência. Essas bombas funcionam em paralelo como descrito na Tabela 3.1.



Figura 3.9 – Estação elevatória de 800 mm de água tratada em Gravatá.

Por sua vez o subsistema adutor de água tratada é constituído de três linhas adutoras com diâmetros de 500, 700 e 800 mm. Sendo que a primeira elevatória a de 500 mm possui motor de marca General Eletric de 650 CV, que

funciona a uma amperagem de 115 A com uma voltagem de 2.300V. A bomba de fabricação Worthington com uma vazão média de 689 metros cúbicos por hora a uma altura 130 mca, aonde o rendimento desse conjunto elevatório chega 98% de sua eficiência.



Figura 3.10 – Tubulação de 800 mm na saída da elevatória de água tratada.

A elevatória para a adutora de 700 mm, que corresponde à segunda adutora de água tratada, possui seis conjuntos motor-bomba, conectados como 3 pares de conjuntos motor-bomba ligados em paralelo. Cada par de tem seus conjuntos motor-bomba ligados em série. Os motores são da marca Toshiba de 650CV, amperagem de 140 A, voltagem de 2.300 V e com uma eficiência também de 98%. As bombas são da marca Worthington com uma vazão média de 2.153 metros cúbicos por hora e uma altura manométrica de 150 mca, como descrito na Tabela 3.1.

A última elevatória do subsistema adutor de água tratada é para a adutora de 800 mm, que possui quatro conjuntos elevatórios ligados em paralelo, com motores de fabricação Toshiba de 900 CV, que trabalha com uma corrente de serviço de 145 A uma tensão de 2.300 V. As bombas são, também, da marca Worthington com vazão média de 1472 metros cúbicos por hora a uma altura 159 mca. Geralmente opera-seo com um conjunto elevatório e dependendo da demanda podendo operar com mais de um conjunto elevatórios em sistema intercalado. A eficiência destes conjuntos chega a 98%

do seu rendimento. Essas bombas funcionam em paralelo como descrito na Tabela 3.1.

A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de conjuntos motor-bomba ligados em paralelo, Quantidade, e a vazão total gerada por estes conjuntos, Vazão.

Tabela 3.1 – Dados de vazão dos conjuntos motor-bomba em paralelo

Elevatória	I				II			
Quantidade	1	2	3	4	1	2	3	4
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	1.376	2.356	2.989	3.094	1.419	2.355	2.778	3.903
Elevatória	III	IV			V			
Quantidade	1	1	2	3	1	2	3	4
Vazão(m <sup>3</sup> /h)	689	1.428	2.153	2.803	1.472	2.416	3.375	3.681

O sistema elétrico para o abastecimento de água de Campina Grande é composto por duas subestações: Uma na elevatória de água bruta em Boqueirão com uma potencia instalada de 6.000 kVA – 69kV sendo três transformadores de 2.000kVA, 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 69 kV) 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 ponta em período úmido e seco;

O horário de ponta para a CELB é das 18h 00min às 21h 00min horas, totalizando três horas corridas. Analisando as Tabelas 3.2 e 3.3, temos um consumo diário médio de 5.275 kWh no horário de ponta e 84.751 kWh no horário fora de ponta. A CELB aplica a tarifa de R\$ 0,11324 por kWh no horário

de consumo de 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\$ 6.819,30 por dia.

Tabela 3.2 – Consumo de Energia Elétrica EEAB (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

Tabela 3.3 – Consumo de Energia Elétrica EEAT na 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

Na tarifa convencional o custo da energia é o mesmo durante todo o período, 24 horas, enquanto que na tarifa horo-sazonal azul tem-se custos diferentes para os períodos de ponta e fora de ponta, e ainda são consideradas as estações seca e úmida. Neste estudo, para o cálculo do custo na tarifa horário sazonal, considerou-se a estação seca (Tabela 3.4). Todas as tarifas são calculadas em termos de dois fatores: consumo (kWh) e fator de demanda máxima mensal (kW). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2000).

Tabela 3.4 - Tarifas para energia elétrica

	No horário de ponta	Fora do horário de ponta
Horas	18h 00min às 21h 00min	Demais horas
Valor R\$/kWh	0,11324	0,07338

### 3.6. Reservatórios

Os reservatórios de distribuição de água são dimensionados para satisfazer as seguintes condições: funcionar como condutor da distribuição, atendendo a variação horária e diária do consumo de água e assegurar uma reserva de água para combate a incêndios manter uma reserva para atender as condições de emergência (acidentes, reparo nas instalações, interrupções da adução e outros) e manter da pressão na rede de distribuição.

O reservatório apoiado R9 (ver Figura 3.6) é um dos principais centros 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 900 km de rede de distribuição de água, com um total de 83.500 ligações domiciliares e uma demanda média de 103.536 m<sup>3</sup>/ dia. O reservatório R9 tem capacidade de armazenar um volume de 39.000 metros cúbicos de água, dividido em quatro câmaras assim distribuído (C1 = 13.000 m<sup>3</sup>; C2 = 9.500 m<sup>3</sup>; C3 = 9.200 m<sup>3</sup> e C4 = 7.300 m<sup>3</sup>) está localizado no bairro de Santa Rosa em Campina Grande na cota 547 em relação à elevatória de água tratada em Gravatá, que fica na cota 442 tendo um desnível geométrico de 105 m. Sua vazão média de distribuição ao sistema é de 695,03 l/s, que corresponde a 58% da distribuição de água tratada a todo sistema de abastecimento.

Tem-se, também, o reservatório R5, que é semi-enterrado, localiza-se no bairro da Prata e está na cota 567 em relação á elevatória de água tratada em Gravatá, tendo um desnível geométrico 125 m, com uma capacidade de armazenamento de 8000 metros cúbicos dividido em duas câmaras com 4000 metros cúbicos cada uma. Este reservatório é abastecido pela linha de adução de 700 mm, que parte do R0, fazendo uma derivação no R9 chegando ao R5

com uma vazão média de 503,3 l/s. Este reservatório tem dupla função: a de distribuição e a de poço de sucção. Como distribuição é responsável pelo abastecimento dos bairros da Prata, e de Bodocongó, através de distribuição por gravidade numa tubulação de 500 mm, com uma vazão média de 66,38 l/s. Como poço de sucção é responsável pelo abastecimento do centro da cidade, num bombeamento em marcha, com uma vazão média de 194,44 l/s. É, também, bombeado, numa linha de recalque com 500 mm de diâmetro e uma vazão média de 155 l/s para o reservatório R4 no bairro da Palmeira. Esta elevatória que parte do R5, tem cinco conjuntos motor-bomba, que trabalham afogados, sendo os motores de marca WEG de 150 CV com uma corrente de 195 A de 1760 rpm, bomba MARK PEELESS com uma altura manométrica de 32 mca. Estes conjuntos motor-bomba trabalham 24 horas por dia, podendo trabalhar até três conjuntos simultaneamente, num sistema de barriletes dependendo da demanda.

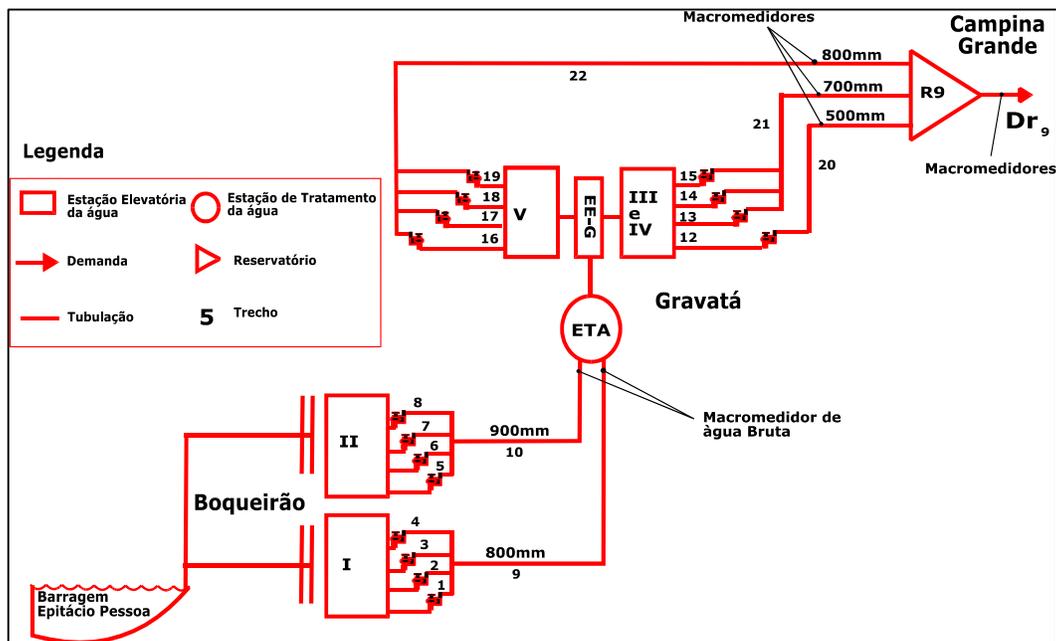
### **3.7. Rede de distribuição**

É a unidade do sistema constituída por um conjunto de tubulações que conduz a água para os pontos de consumo. As redes de distribuições distinguem-se por dois tipos de tubulações: as principais e as secundárias. As principais são as tubulações que formam os anéis principais e que vão alimentar os distribuidores e estas as ligações domiciliares, que são as tubulações secundárias.

A rede de distribuição do sistema de abastecimento de Campina Grande tem extensão de 900 km de vários tipos como ramificadas, malhadas e mistas, com pressões variando entre a dinâmica mínima de 10 mca, e a máxima estática de 50 mca. Às vezes estes limites de pressão variam em virtude dos reservatórios não serem divididos por zona de pressão ou simplesmente a falta de instalação de válvulas redutoras de pressão.

Esta rede distribui 3.106.000 metros cúbicos mês de água, (Fonte Divisão de Controle Operacional da CAGEPA). Atendendo 83500 ligações domiciliares, com 93% de medição, relativa a uma população de 450.000 habitantes, conforme o cadastro comercial da CAGEPA.

Finalmente o subsistema adutor de água tratada, possui 21 km de adutoras transportando água através destas três linhas de tubulações de 500 mm e 700 mm em aço e a de 800 mm em ferro desde a ETA de Gravatá até o principal reservatório de distribuição o R9 em Campina Grande, Figura 3.11 e Tabela 3.5.



A Figura 3.11 - Sistema Adutor Principal Simplificado

### 3.8. Demanda

A demanda principal do Sistema de Abastecimento de Água de Campina Grande vem dos reservatórios de distribuição R9 e R5 que tem a finalidade de atender as variações de consumo e garantir o fornecimento de água a população em quantidade e qualidade adequada. O reservatório R9 por ser de montante, recebe água através de três adutoras de 500 700 e 800 mm aonde a água deveria chegar antes ao reservatório, para depois ser distribuído por uma tubulação central de 900 mm a rede de distribuição. Tem ainda a finalidade de atender a variação de consumo nas horas de maior demanda e, ainda, contém reserva de água para combate a incêndio e atender emergências como: acidentes nas instalações de recalque e garantir a pressão adequada na rede.

As adutoras de 700 e 800 mm antes de chegarem ao reservatório R9 abastecem através de uma derivação em 250 mm o reservatório elevado R6, responsável pelo atendimento do distrito industrial de Campina Grande. A adutora de 500 mm, antes de chegar ao reservatório R9, vai abastecer o conjunto Nenzinha Cunha Lima.

O reservatório R5, também de montante, recebe parte da descarga da adutora de 700 mm e, além de atender a demanda de todo o centro da cidade Campina Grande, opera como poço de sucção através da estação elevatória VI que vai suprir o R4. O R0 ou poço de sucção que funciona na ETA de Gravatá tem a finalidade de receber a demanda da ETA e através de três linhas de recalque, as adutoras de 500, 700, e 800 mm, vai abastecer o principal reservatório o R9 e por sua vez vai alimentar outros reservatórios e estações elevatórias e toda rede de distribuição, conforme a demanda Tabela 3.6.

Tabela 3.5 – Descrição dos trechos do sistema adutor

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	300(R5)	226(R5)	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	21000	Ferro Fundido
21	700	21000	Aço
22	800	21000	Ferro Fundido

Tabela 3.6 Demanda do sistema de abastecimento

Hora	Demanda no R0 (m <sup>3</sup> /h):	Demanda no R9 (m <sup>3</sup> /h):	Demanda no R5 (m <sup>3</sup> /h):	Demanda no R4 (m <sup>3</sup> /h):	Demanda do Centro (m <sup>3</sup> /h):
1	4910,82	2.065,00	1.659,58	486,36	699,88
2	4966,71	2.068,00	1.658,71	540,00	700,00
3	4970,73	2.079,00	1.659,58	534,00	698,15
4	5003,88	2.089,00	1.659,16	555,84	699,88
5	4862,26	2.100,00	1.660,03	402,23	700,00
6	5095,40	2.250,00	1.659,16	486,36	699,88
7	5296,04	2.450,00	1.660,16	486,00	699,88
8	4767,78	1.860,00	1.658,78	551,00	698,00
9	4945,29	2.030,00	1.661,45	555,84	698,00
10	4880,16	2.035,00	1.659,16	486,00	700,00
11	5335,07	2.490,00	1.658,71	486,36	700,00
12	5263,54	2.500,00	1.661,43	402,23	699,88
13	5318,58	2.421,00	1.659,58	540,00	698,00
14	4763,07	1.920,00	1.658,71	486,36	698,00
15	4900,00	2.500,00	1.659,58	486,00	696,00
16	5398,04	1.930,00	1.659,16	540,00	698,88
17	4870,03	1.970,00	1.660,03	540,00	700,00
18	4900,00	1.865,00	1.659,16	486,00	698,00
19	4708,16	1.871,00	1.660,16	540,00	700,00
20	4780,02	1.935,00	1.658,78	486,36	699,88
21	4857,33	1.941,00	1.661,45	555,00	699,88
22	4755,52	1.910,00	1.659,16	486,36	700,00
23	4810,59	1.912,00	1.658,71	540,00	699,88
24	4802,67	1.995,00	1.661,43	486,36	699,88

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. Generalidades**

O controle operacional, da CAGEPA, que demanda hoje todos os dados de vazão, pressão, nível de reservatório e a operação das elevatórias de água bruta e tratada, são feitos precariamente. Estes dados são transmitidos através de sistema de radio e anotados por um operador num boletim de operação, que mensalmente é feito o cálculo do volume produzido ao sistema pelo número de horas de bombeamento e comparado com a macro medição que nem sempre os resultados batem com os volumes macro medidos, estes dois dados mostram a não confiabilidade do sistema e a da própria macro medição. Com isto, geram-se informações não confiáveis como os índices de perdas físicas no sistema de distribuição e outros gradientes hidráulicos importantes na operação de adução e distribuição do sistema de abastecimento de água.

O desenvolvimento do modelo proposto visa produzir uma ferramenta útil e prática que fornece subsídios de apoio a decisão para o delineamento de normas simples para a operação de conjuntos elevatórios e, ao mesmo tempo, minimizar os custos de energia elétrica. Com a redução dos custos na energia elétrica a Empresa poderá investir em equipamentos como válvulas de controle de pressão e vazão, compra de computadores e de um programa de transmissão de dados via on-line, treinamento para os operadores, que serão beneficiados por intervirem subjetivamente no sistema e onde executam tarefas de acordo com o grau de experiência pessoal adquirida no exercício de suas atividades diárias.

A metodologia de otimização proposta, neste trabalho, leva em consideração uma função objetivo, que é representada, numa primeira etapa, pelos custos energéticos de bombeamento de acordo com o sistema tarifário em vigor, ou seja, a minimização de custos operacionais decorrentes do

consumo de energia elétrica, e, numa segunda etapa, os custos com manutenção, representados pelo número de liga-desligas dos conjuntos motor-bomba, são minimizados nas estações de bombeamento. Associadas a busca pela minimização de custos, existe o requerimento de satisfazer as restrições técnicas-operacionais e, entre elas, se destaca os modelos de simulação hidráulica.

Os modelos de simulação de redes de distribuição de água consistem basicamente do equacionamento das vazões nos trechos de uma rede e das cargas hidráulicas nos nós entre trechos consecutivos. A simulação hidráulica avalia as respostas do sistema em termos das suas variáveis de estado: pressão, vazão e níveis nos reservatórios, face as diversas conjunturas operacionais. É, portanto, uma ferramenta essencial à avaliação dos objetivos estabelecidos. A solução é obtida por análises sucessivas, com alterações impostas pelos usuários, ou em combinação com modelos de otimização, onde a solução é obtida automaticamente. Neste trabalho, o simulador utilizado é o Matlab com o toolbox de otimização.

O Matlab (que abrevia Matrix Laboratory – Laboratório de Matrizes) é um programa de computador de uso específico, otimizado para executar cálculos científicos e de engenharia. Ele nasceu como um programa para operações matemáticas sobre matrizes, mas ao longo dos anos transformou-se em um sistema computacional flexível capaz de resolver essencialmente qualquer problema técnico. O programa Matlab faz uso de uma linguagem específica, similar a outras linguagens de programação, e oferece uma ampla biblioteca de funções predefinidas para que a programação técnica se torne mais fácil e eficiente.

#### **4.2. Otimização da operação das estações elevatórias da CAGEPA**

As técnicas de otimização vêm sendo utilizadas na busca de soluções ótimas para problemas operacionais específicos. Se o objetivo for, por exemplo, o mínimo custo operacional, a função custo estará associada à tarifa de energia elétrica, ao rendimento das bombas, às perdas de carga nas instalações, etc. Por outro lado, há restrições impostas pelo próprio sistema,

tais como, níveis máximos e mínimos dos reservatórios, limites de pressão e de potencia e quantidade de água disponível.

Algumas dificuldades decorrem da utilização das técnicas de otimização para a solução do problema do controle. Estas dificuldades estão associadas ao grande número de equações a serem resolvidas, à dificuldade de formulação do problema geral, ao tratamento de restrições operacionais não explícitas e à aquisição e manutenção de dados. Além disso, os algoritmos desenvolvidos, normalmente, requerem um alto tempo computacional para atingir uma solução, que, geralmente, não é um ótimo global. Dentro deste contexto, foram testadas algumas metodologias baseadas em programações linear, linear inteira e não linear e algoritmo genético, além de um método puramente heurístico, para efeitos comparativos, no sentido de delinear a busca de uma melhor metodologia para resolver o problema. Portanto, será apresentada neste capítulo a formulação matemática de cinco metodologias que foram usadas para analisar os seus desempenhos com relação à aplicação em um subproblema, que não envolve os reservatórios R4 e R5 e seus sistemas adutores, da descrição apresentada no Capítulo III. Num primeiro teste de desempenho, usando programação linear, não linear e algoritmo genético, permite-se que as variáveis de decisão assumam valores fracionários. Num segundo teste, aplicam-se programação linear inteira as variáveis de decisão da programação linear com intuito de as tornarem inteiras e compara-se os resultados com um método heurístico que foi usado por Machado *et. al.* (2005) e Barbosa (2001).

Em face dos testes realizados, optou-se por resolver o problema geral em duas etapas: na primeira etapa o resolve via programação linear, assumindo que as variáveis de decisão podem assumir valores fracionários e minimizando os custos operacionais, e na segunda etapa resolve via programação quadrática, minimizando o número de operações liga-desliga, ao mesmo tempo em que procura converter valores fracionários de tempo em valores inteiros. Nesta segunda etapa, reduz-se, naturalmente, o número de variáveis fracionárias e tem-se como função objetivo uma função quadrática, que apresenta uma bom desempenho computacional.

### 4.3. Métodos contínuos para análise de desempenho

Na análise de desempenho do sistema por métodos contínuos para as variáveis de decisão foi aplicado as técnicas de programação linear (PL), não-linear (PNL) e algoritmo genético (AG). Na utilização das três técnicas foi utilizado o mesmo formalismo, descrito no item seguinte.

#### 4.3.1. Descrição matemática

A função objetivo assumida foi à minimização do custo de energia tendo como base a tarifa horária de operação. Dessa forma, representa-se, no período de 24 horas, o custo do sistema por:

$$Z = \sum_{i=1}^{ne} \sum_{j=1}^{nb(i)} \sum_{t=1}^{24} X(i, j, t) \times T(t) \times P(i, j) \quad (4.1)$$

sendo

$Z$  - custo diário de energia do sistema de abastecimento (R\$);

$ne$  - o número de estações elevatórias do sistema;

$nb(i)$  - número de conjuntos motor-bomba da estação elevatória  $i$ ;

$t$  - intervalo de tempo ao longo de um dia ( $1 \leq t \leq 24$ );

$T(t)$  - a tarifa de consumo (R\$/kWh) no período de análise  $t$ ;

$X(i, j, t)$  - o tempo (h) que indica o funcionamento do conjunto motor-bomba  $j$  da estação elevatória  $i$  está ligada durante o intervalo de tempo  $t$ ;

$P(i, j)$  - é a potencia (KW) quando se liga o conjunto motor-bomba  $j$ , que é dado por:

$$P(i, j) = \frac{9,81}{\eta(i, j)} Qf(i, j) \times H(i, j) \quad (4.2)$$

onde

$\eta(i, j)$  - é o rendimento do conjunto motor-bomba  $j$  da estação elevatória  $i$ ;

$Qf(i, j)$  - é a vazão firme provocado por ligar o conjunto motor-bomba  $j$  da estação elevatória  $i$ , em ( $m^3/s$ ) e

$H(i, j)$  - é a altura manométrica, ou seja, altura de elevação mais o acréscimo de perdas devido ao aumento da vazão em (mca).

As vazões horárias nas adutoras são caracterizadas pelo funcionamento em paralelo de conjuntos motor-bomba. O cálculo da vazão é estabelecido pelo

acréscimo de vazão no acionamento de mais de um conjunto na mesma adutora. Na caracterização física do sistema faz-se necessário verificar os volumes horários dos reservatórios, os quais obedecem ao princípio da conservação de massa:

$$V(k,t) = V(k,t-1) + \sum Q_s(k,t) - D(k,t)\Delta t \quad (4.3)$$

em que,

$V(k,t)$  é o volume do reservatório  $k$  no instante  $t$ ;

$V(k,0)$  é igual ao volume inicial do reservatório  $k$ ;

$D(k,t)$  é a demanda ( $m^3/h$ ) do reservatório  $k$  no intervalo  $t$ ;

$\sum Q_s(k,t)$  é a soma dos volumes correspondentes as vazões que chegam ou deixam o reservatório  $k$  no instante  $t$  por bombeamento e é dada por:

$$\sum Q_s(k,t) = \sum_{i=1}^{ne} \left\{ C \times \sum_{j=1}^{nb} \left[ (Q(i,j) - Q(i,j-1)) \times X \left( i, j + \sum_{j=1}^i nb(i-1), t \right) \right] \right\} \quad (4.4)$$

onde

$Q(i,j)$  é a vazão ( $m^3/h$ ) da quantidade de bombas funcionando em paralelo na estação elevatória  $i$ ,  $Q(j,0)=0$ ;

$C$  é característica da estação elevatória em relação ao reservatório, igual a +1 se estiver enviando água para o reservatório, -1 se estiver tirando água e 0 (zero) se não assumir nenhuma das características já citadas;

$nb(i)$  é o número de conjuntos motor-bomba da estação elevatória  $i$ ,  $nb(0)=0$ .

Assim, as restrições do problema podem ser formuladas:

1. Fração do intervalo de funcionamento de cada conjunto motor-bomba, que caracteriza a variável de decisão do problema de otimização, é dada por:

$$0 \leq X(i,j,t) \leq 1 \quad (4.5)$$

2. Capacidade mínima e máxima dos reservatórios, ou seja, o volume armazenado nos reservatórios no instante  $t$  devem ser maiores que o requerimento mínimo ( $Vmin(k)$ ) adotados e menores que sua capacidade máxima ( $Vmax(k)$ ).

$$Vmin(k) \leq V(k,t) \leq Vmax(k) \quad (4.6)$$

3. O somatório das vazões bombeadas ( $\sum Qentra(r,t)$ ) para a Estação Tratamento de Água  $r$  no intervalo  $t$  deve ser menor do que a capacidade máxima de tratamento ( $C_{ETA}$ ).

$$\sum Q_{entra}(r,t) \leq C_{ETA} \quad (4.7)$$

4. Volume de cada reservatório  $k$  no início do dia ( $Vinicial(k)$ ) é igual ao do final do dia anterior, i.e.,  $V(k, 24)$ .

$$Vinicial(k) = V(k,24) \quad (4.8)$$

5. A Equação (4.4) é responsável pela discretização das vazões transformando o comportamento não linear em linear. Por conseguinte, tem-se o aumento no número de restrições, descritas pela Equação (4.9). No funcionamento em paralelo dos conjuntos motor-bomba, é necessário que só se ligue o conjunto seguinte quando acionado o anterior em uma mesma estação elevatória.

$$X(i, j, t) \leq X(i, j-1, t) \quad (4.9)$$

Na aplicação da programação não-linear as Equações (4.4) e (4.9) não são utilizadas, sendo substituídas por um algoritmo de determinação da vazão no trecho, descrito abaixo:

*[resposta]= Rotina (w(1), w(2),..., w(n), q(1), q(2),..., q(n))*  
*{Colocar o tempo de funcionamento e a vazão " q " de cada conjunto em ordem crescente}*

*Para f:=1 até n*

*min: = f*

*Para g:= f+1 até n*

*Se (w(g)<a(min))*

*min:= g*

*Fim do se*

*Fim do para*

*aux:=w(f)*

*w(f):= w(min)*

*w(aux): = q(f)*

*q(f):= q(min)*

*q(min): = aux*

*Fim do para*

*{Calculo da vazão horária no trecho}*

*h: = n*

*Resposta: = 0*

*Para f: = 1 até n*

*Resposta: =  $q(h) \times w(h) + resposta$*

*h: = h-1*

*Fim do para*

*Fim da Rotina*

As vazões horárias nas adutoras são caracterizadas pelo funcionamento em paralelo dos conjuntos motor-bomba, que apresentam comportamento não linear. O cálculo da vazão também no modelo não-linear foi determinado segundo as características de medição. Assim com a utilização do algoritmo reduz o número de restrições do problema resolvido por programação não-linear.

#### **4.3.2 Implementação da descrição matemática**

Utilizando o mesmo dados do sistema adutor simplificado de Campina Grande, (Figura 3.11 do Capítulo 3), foi feita a comparação métodos contínuos, assim os métodos utilizam a formulação do problema com intervalo de acionamento contínuo. Os métodos são implementados no ambiente de programação do MATLAB.

Na aplicação da programação linear utiliza-se a rotina “linprog”, do *toolbox* de otimização do MATLAB. Esta funciona em dois módulos: o de larga escala, com o método de ponto interior primal-dual; e o de média escala, que utiliza o método Simplex. Ainda, a escolha do modulo é automática através do algoritmo “predictor-corrector”.

A aplicação não linear utiliza a rotina “fmincon” do MATLAB, que também possui dois módulos: o de larga escala, com o método de Newton e o módulo de média escala, que utiliza o método de programação quadrática seqüencial.

O algoritmo genético (AG) utilizado é executado no MATLAB para problemas de otimização com restrições lineares, desenvolvido por Celeste et al (2004). O AG pode minimizar funções lineares ou não lineares sujeitas à restrições lineares, usa cromossomo de representação real, amostragem estocástica universal e ordenamento de aptidão, assim como operadores de

crossover e mutação. As equações não lineares serão linearizadas para a aplicação da PL e do AG.

#### 4.4. Métodos discretos para análise de desempenho

Na análise de desempenho do sistema por métodos discretos para as variáveis de decisão foi aplicados as técnicas via Simulação com uma regra padrão (SP) e um método dividido em duas etapas com técnica de programação linear (PL) e linear inteira (PLI).

##### 4.4.1. Via programações linear e linear inteira

Opta-se, aqui, por dividir o processo de otimização em duas etapas, com intervalo de análise horário, para reduzir o número de acionamento dos conjuntos motor-bomba, evitando futuros gastos com manutenção. Na primeira etapa, utiliza-se a programação linear considerando o intervalo de acionamento contínuo, assim garante-se o ótimo global para os intervalos de tempo de acionamento das máquinas e o volume inicial ótimo. A descrição matemática é estabelecida pelas Equações de (4.1) a (4.9).

A segunda etapa terá como meta atingir no mínimo o volume ótimo determinado na primeira etapa, mas com as bombas funcionando durante todo o período de tempo definido. Assim, a programação linear inteira é aplicada.

Na segunda etapa a função objetivo é:

$$Z = \sum_{i=1}^{ne} \sum_{j=1}^{nb(i)} \sum_{t=1}^{24} \alpha(i, j, t) \times T(t) \times P(i, j) \quad (4.10)$$

Sendo  $\alpha(i, j, t)$  um número binário (0 ou 1) que indica se o conjunto motor-bomba  $j$  da estação elevatória  $i$  está ligado (1) ou não (0) durante o intervalo de tempo  $t$ ; assim o acionamento é contínuo.

Além da Equação (4.7) da capacidade da ETA, têm-se as restrições na segunda etapa, dadas por:

1. O volume armazenado nos reservatórios no instante “ $t$ ” devem ser maiores que o requerimento ótimo determinado na primeira etapa ( $Voti(k)$ ) e menores que sua capacidade máxima ( $Vmax(k)$ ).

$$Voti(k) \leq V(k,t) \leq Vmax(k) \quad (4.11)$$

2. No funcionamento em paralelo dos conjuntos motor-bomba, que o conjunto seguinte só pode ser acionado depois do anterior em uma mesma adutora.

$$\alpha(i,j,t) \leq \alpha(i,j-1,t) \quad (4.12)$$

#### 4.4.2. Via simulação com uma regra padrão

Para tentar reproduzir o procedimento operacional normalmente adotado em sistemas de abastecimento de água, um conjunto de regras foi definido por Machado *et. al.* (2005) e Barbosa (2001), cujo o fundamento básico é bombear o máximo possível nos períodos fora de ponta, mantendo um nível mínimo ou máximo do reservatório de distribuição e sem desperdícios de água e energia. As regras de operação são detalhadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Regras de Operação

<b>Nível do tanque receptor</b>		<b>Tempo que falta para horário de ponta &gt; 2 horas</b>	<b>Tempo que falta para horário de ponta ≤ 2 horas</b>	<b>Horário de ponta</b>
<b>1º Terço</b>	<b>Enchendo</b>	<i>Mantém a programação</i>	Liga-se uma bomba*	<i>Mantém a programação</i>
	<b>Secando</b>	Liga-se uma bomba		Liga-se uma bomba*
<b>2º Terço</b>	<b>Enchendo</b>	<i>Mantém a programação</i>	Desliga-se uma bomba**	Desliga-se uma bomba**
	<b>Secando</b>	<i>Mantém a programação</i>		
<b>3º Terço</b>	<b>Enchendo</b>	Desliga-se uma bomba**	<i>Mantém a programação</i>	<i>Mantém a programação</i>
	<b>Secando</b>	<i>Mantém a programação</i>		

\* Escolhe-se a bomba que está a mais tempo inativa

\*\* Escolhe-se a bomba de maior vazão.

#### 4.4.3. Implementação da descrição matemática (2)

Utilizando os mesmo dados do sistema adutor simplificado de Campina Grande, (Figura 3.11 do Capítulo 3), foi feita a comparação métodos discreto. Os métodos são implementados no ambiente de programação do MATLAB.

Na aplicação da programação linear utiliza-se também a rotina “linprog”, do *toolbox* de otimização do MATLAB. Para a implementação da técnica linear inteira utiliza-se “binprog”.

#### 4.5. Modelo de otimização para reduzir o número de acionamento dos conjuntos motor-bomba via programação linear e programação quadrática.

Com o aumento da demanda e crescente limitação na oferta de energia o objetivo deste trabalho é o de minimizar os custos com energia elétrica, no uso principalmente em sistemas de abastecimento de água. Com os dados existentes do sistema de abastecimento de Campina Grande, acrescenta-se para o modelo de otimização, mais uma elevatória a de número VI e mais dois reservatórios o R4 e R5, já descrito no Capítulo 3, para otimizar o número de acionamento dos conjuntos motor-bomba, nas seis principais elevatórias do sistema em estudo, evitando futuros gastos com manutenção. A demanda principal do sistema de abastecimento de Campina Grande vem dos Reservatórios de Distribuição “R9 e R5”. A descrição completa do sistema adutor principal é observado na Figura 3.6 do Capítulo 3. A distribuição da demanda horária média é representada pela Tabela 3.6.

O desenvolvimento da metodologia final, que venha a ser aplicada neste modelo de otimização, venha ter um baixo requerimento de tempo computacional, para se obter uma solução que seja próximo do ótimo global (que geraria valores fracionários). Dentro deste contexto numa primeira etapa é aplicada a metodologia envolvendo programação linear, com a finalidade de se obter uma solução ótima global. Numa segunda etapa, procura-se, via programação quadrática, aproximar os valores fracionários para números inteiros binários, procurando-se manter os custos obtidos na primeira etapa e satisfazendo as restrições físicas e operacionais do sistema.

Opta-se, aqui, por dividir o processo de otimização em duas etapas, com intervalo de análise horário, para reduzir o número de acionamentos dos conjuntos motor-bomba, evitando futuros gastos com manutenção. Na primeira etapa, utiliza-se a programação linear considerando o intervalo de acionamento contínuo, assim garante-se o ótimo global para os intervalos de tempo de acionamento das máquinas e o volume inicial ótimo.

#### 4.5.1. Função objetivo

A função objetivo relativa a minimização do custo de energia tem, como base, a tarifa horária de operação. Dessa forma, representa-se, para um período de 24 horas, o custo energético requerido pelo sistema o qual é dado pela Equação (4.10).

Observa-se, portanto, que num processo de minimização dos custos com os gastos com energia, os coeficientes dos primeiros segmentos da função vazão versus número de conjuntos motor-bomba serão ativados primeiro, ou seja, buscar-se-á a maior vazão (e, portanto, maior declividade da reta numa programação linear) pelo menor custo.

Quando o custo de energia é a mesma para todos os motor-bomba, quer estejam ligados isoladamente ou em paralelo com outros, a função objetivo 1, pode não vir a funcionar, ou seja, não consegue 'distinguir' qual deles deve ser ligado primeiro. Como os coeficientes da função objetivo são iguais (apenas custos energéticos) para conjuntos motor-bomba de uma mesma elevatória, esta situação, também, exige que se inclua, entre as restrições, a condição que  $\alpha(i,j,t) \geq \alpha(i,j+1,t)$ , ou seja, só ligar o motor-bomba  $j+1$  quando o motor-bomba  $j$  estiver ligado. Para forçar a escolha dos que produzem maior vazão como sendo os primeiros a serem ligados, deve-se dar preferência àqueles cujo custo por unidade de vazão seja menor (pode, também, ser conseguido via a atribuição de um peso), ou seja:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{ne} \sum_{j=1}^{nb(i)} \sum_{t=1}^{24} \alpha(i, j, t) \cdot \omega^{j-1} \cdot \frac{T(t) \times P(i, j)}{\Delta Q(i, j)} \quad (4.13)$$

Sendo:

$\omega^{j-1}$  - o valor constante (peso, ex:  $10^{i-1}$ ) atribuído à escolha do  $j$ -ésimo motor-bomba;

$\Delta Q(i, j)$  - acréscimo de vazão da colocação do  $j$ -ésimo conjunto motor-bomba em paralelo na estação elevatória  $i$ ;

$\frac{T(t) \cdot P(i, j)}{\Delta Q(i, j)}$  - custo de energia por unidade de vazão do  $j$ -ésimo conjunto motor-bomba em paralelo na estação elevatória  $i$  no instante  $t$ .

#### 4.5.2. Os modelos de otimização utilizados

##### 1ª Etapa

Levando em consideração as ponderações sobre a função objetivo e as variáveis de decisão, poder-se-á usar uma simples programação linear, numa primeira etapa, como ponto de partida para se determinar o ponto de operação ótimo. Isso porque o resultado obtido via programação linear, reproduzem o que seria um ótimo global. O problema, a ser resolvido numa segunda etapa, está em se determinar uma metodologia para transformar os parâmetros  $\alpha(ijt)$  que são fracionários em valores binários 0 ou 1, que significa, fisicamente, que o sistema motor-bomba estar desligado ou ligado, respectivamente. Portanto, na primeira etapa o problema pode ser formulado da seguinte forma:

Função objetivo, minimizar:

$$\begin{aligned}
 Z = & \underbrace{\sum_{j=1}^4 \sum_{t=1}^{24} \left[ \frac{T(t) \cdot E(1, j)}{\Delta Q(1, j)} \cdot 10^{j-1} \right] \cdot \alpha(1, j, t)}_{\text{EE-I}} + \underbrace{\sum_{j=1}^4 \sum_{t=1}^{24} \left[ \frac{T(t) \cdot E(2, j)}{\Delta Q(2, j)} \cdot 10^{j-1} \right] \cdot \alpha(2, j, t)}_{\text{EE-II}} + \\
 & + \underbrace{\sum_{t=1}^{24} \left[ \frac{T(t) \cdot E(3, 1)}{\Delta Q(3, 1)} \cdot 10^0 \right] \cdot \alpha(3, 1, t)}_{\text{EE-III}} + \underbrace{\sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^{24} \left[ \frac{T(t) \cdot E(4, j)}{\Delta Q(4, j)} \cdot 10^{j-1} \right] \cdot \alpha(4, j, t)}_{\text{EE-IV}} + \\
 & + \underbrace{\sum_{j=1}^4 \sum_{t=1}^{24} \left[ \frac{T(t) \cdot E(5, j)}{\Delta Q(5, j)} \cdot 10^{j-1} \right] \cdot \alpha(5, j, t)}_{\text{EE-V}} + \underbrace{\sum_{j=1}^5 \sum_{t=1}^{24} \left[ \frac{T(t) \cdot E(6, j)}{\Delta Q(6, j)} \cdot 10^{j-1} \right] \cdot \alpha(6, j, t)}_{\text{EE-VI}}
 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Restrições:

Balanço hídrico no reservatório R0:

$$\begin{aligned}
 V_{R0}(t) = & V_{R0}(t-1) + \underbrace{\sum_{j=1}^4 \Delta Q(1, j) \cdot \alpha(1, j, t)}_{\text{entrada adutora 800 da EE-I}} + \underbrace{\sum_{j=1}^4 \Delta Q(2, j) \cdot \alpha(2, j, t)}_{\text{entrada adutora 900 da EE-II}} \\
 & - \underbrace{\Delta Q(3, 1) \cdot \alpha(3, 1, t)}_{\text{saída adutora 500 da EE-III}} - \underbrace{\sum_{j=1}^3 \Delta Q(4, j) \cdot \alpha(4, j, t)}_{\text{saída adutora 700 da EE-IV}} \quad ; \forall t \quad (4.15) \\
 & - \underbrace{\sum_{j=1}^4 \Delta Q(5, j) \cdot \alpha(5, j, t)}_{\text{saída adutora 800 da EE-V}} - \underbrace{D_{R0}(t)}_{\text{demanda no R0}}
 \end{aligned}$$

Balanço hídrico no reservatório R9:

$$\begin{aligned}
 V_{R9}(t) = & V_{R9}(t-1) + \underbrace{\Delta Q(3, 1) \cdot \alpha(3, 1, t)}_{\text{entrada adutora 500 da EE-III}} + \underbrace{\sum_{j=1}^4 \Delta Q(5, j) \cdot \alpha(5, j, t)}_{\text{entrada adutora 800 da EE-V}} \quad ; \forall t \quad (4.16) \\
 & - \underbrace{D_{R9}(t)}_{\text{demanda no R9}}
 \end{aligned}$$

Balanço hídrico no reservatório R5:

$$\begin{aligned}
 V_{R5}(t) = & V_{R5}(t-1) + \underbrace{\sum_{j=1}^3 \Delta Q(4, j) \cdot \alpha(4, j, t)}_{\text{entrada adutora 700 da EE-IV}} - \underbrace{\sum_{j=1}^5 \Delta Q(6, j) \cdot \alpha(5, j, t)}_{\text{saída adutora 500 da EE-VI}} \quad ; \forall t \quad (4.17) \\
 & - \underbrace{D_{R5}(t)}_{\text{demanda no R5}}
 \end{aligned}$$

Balanço hídrico no reservatório R4:

$$\begin{aligned}
 V_{R4}(t) = & V_{R4}(t-1) + \underbrace{\sum_{j=1}^5 \Delta Q(6, j) \cdot \alpha(5, j, t)}_{\text{entrada adutora 500 da EE-VI}} - \underbrace{D_{R4}(t)}_{\text{demanda no R4}} \quad ; \forall t \quad (4.18)
 \end{aligned}$$

Restrições quanto a limitações operacionais volumétricas para os reservatórios:

$$V_{R0}^{\min} \leq V_{R0}(t) \leq V_{R0}^{\max} ; \forall t \quad (4.19)$$

$$V_{R9}^{\min} \leq V_{R9}(t) \leq V_{R9}^{\max} ; \forall t \quad (4.20)$$

$$V_{R5}^{\min} \leq V_{R5}(t) \leq V_{R5}^{\max} ; \forall t \quad (4.21)$$

$$V_{R4}^{\min} \leq V_{R4}(t) \leq V_{R4}^{\max} ; \forall t \quad (4.22)$$

sendo  $V_{Ri}$  o volume do reservatório  $i$  no instante  $t$ .

Restrições de limites quanto ao número de bombas que trabalham em cada estação (neste caso foi usado o número máximo de motores-bomba em cada estação elevatória menos um, que poderá estar em manutenção, exceto para a EE-III, que só tem uma bomba e não entra nestas restrições):

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^4 \alpha(1, j, t) &= 3 ; \forall t & \sum_{j=1}^4 \alpha(5, j, t) &= 3 ; \forall t \\ \sum_{j=1}^4 \alpha(2, j, t) &= 3 ; \forall t & \sum_{j=1}^5 \alpha(6, j, t) &= 4 ; \forall t \\ \sum_{j=1}^3 \alpha(4, j, t) &= 2 ; \forall t & & \end{aligned} \quad (4.23)$$

## 2ª Etapa:

A metodologia usada neste trabalho para tentar fazer com que os  $\alpha(i, j, t)$  fracionários venham a convergir para os valores binários 0 ou 1, de forma a se minimizar o número de liga-desligas, é baseada na programação quadrática. No entanto, durante este processo, procurar-se-á alcançar uma situação operacional que chegue o mais próximo do custo ótimo global obtido via PL. Portanto, após obtido um resultado via programação linear, que fornece um dos valores ótimos globais (o problema ter infinitos pontos ótimos de operação e apresentar vários  $\alpha(i, j, t)$  fracionários, quer sejam no horário de ponta ou no horário fora de ponta), para a minimização do custo energético, reformula-se o problema da seguinte forma:

Tem-se como variáveis de decisão somente os  $\alpha(i, j, t)$  fracionários (além disso, tem-se que conhecer os valores de seus imediatos antecessores e sucessores no tempo, quer sejam iguais a zero ou um para ter a possibilidade de manter-se a bomba subsequente em um estado de 'ligado' ou 'desligado');

A nova função objetivo, de natureza quadrática, que visa minimizar o número de liga-desligas e transformar os  $\alpha(i,j,t)$  fracionários iguais a 0 ou 1, é dada por:

$$\max_{\alpha} \quad fo = \sum_k \sum_l \sum_t \alpha(k,l,t) + \sum_i \sum_j \sum_t \alpha(i,j,t)\alpha(i,j,t+1) \quad (4.24)$$

para  $\forall ijt | 0 < \alpha(i,j,t) < 1$  e  $\alpha(k,l,t) \in \Gamma$

sendo  $\Gamma$  o subespaço das variáveis de decisão onde  $\alpha(k,l,t-1)=1$  ou  $\alpha(k,l,t+1)=1$ , ou seja, seu sucessor ou antecessor no tempo que não é uma variável de decisão para este problema, seja um número inteiro e igual a 1.

Para se ter uma idéia de como funciona o termo quadrático deste processo, toma-se como exemplo um problema que tenha, como resultado da PL, os valores  $\alpha(i,j,1)=0,5$ ,  $\alpha(i,j,2)=0,7$  e  $\alpha(i,j,3)=0,8$  (resultando numa  $fo=0,91$ ). Observe que o máximo número de horas para uma combinação de valores dos  $\alpha(i,j,t)$  fracionários é igual a 2 (soma), caso contrário aumenta-se o número de horas em que o sistema está ligado e, conseqüentemente, o valor do gasto com energia. Portanto, os prováveis resultados, que maximizam a função objetivo  $fo$  acima, serão dados na forma seqüencial dos  $\alpha(i,j,t)$ , a não ser por limitações físicas dos reservatórios ou outros componentes físicos, pois qualquer outra combinação gerará uma  $fo$  menor que 1, ou seja,  $\alpha(i,j,1)=1,0$ ,  $\alpha(i,j,2)=1,0$  e  $\alpha(i,j,3)=0,0$  com a  $fo=1$  ou  $\alpha(i,j,1)=0,0$ ,  $\alpha(i,j,2)=1,0$  e  $\alpha(i,j,3)=1,0$  com a  $fo=1$ .

O termo linear da função objetivo tem a função de vincular ao estabelecimento de um sistema motor-bomba, que não é variável de decisão, ligado ( $\alpha(k,l,t) \in \Gamma$ ) a ligação do mesmo sistema motor-bomba num tempo anterior ou posterior, evitando-se mais uma operação de liga-desliga. Para ilustrar tal comportamento, tendo-se como base Tabela 4.2 a e b (Firmino et al., 2006), onde apresenta os resultados oriundos da aplicação da primeira etapa, para uma estação elevatória.

Observa-se nessa tabela que a soma dos valores fracionários do sistema motor-bomba  $j=1$  no período fora de ponta é igual a 1,6 horas ( $\alpha(i,j,8)=0,3$ ,  $\alpha(i,j,9)=0,2$ ,  $\alpha(i,j,14)=0,4$  e  $\alpha(i,j,15)=0,5$ ). A soma dos valores fracionários do sistema motor-bomba  $j=2$ , no período considerado como fora de ponta, é igual a 3,6 horas ( $\alpha(i,j,1)=0,2$ ,  $\alpha(i,j,2)=0,3$ ,  $\alpha(i,j,4)=0,3$ ,  $\alpha(i,j,5)=0,5$ ,

$\alpha(i,j,7)=0,4$ ,  $\alpha(i,j,10)=0,3$ ,  $\alpha(i,j,11)=0,5$ ,  $\alpha(i,j,12)=0,6$ ,  $\alpha(i,j,13)=0,1$ ,  $\alpha(i,j,24)=0,4$  .

A soma dos valores fracionários do sistema motor-bomba  $j=1$  no horário de ponta é igual a 0,9 horas ( $\alpha(i,j,18)=0,4$ ,  $\alpha(i,j,19)=0,5$ ,  $\alpha(i,j,21)=0,2$ ). Com isso, para manter o custo de energia elétrica, obtido na primeira fase, se faz necessário impor as seguintes restrições ao problema, nesta segunda fase:

$$\alpha(i,j,8)+\alpha(i,j,9)+\alpha(i,j,14)+\alpha(i,j,15)\leq 1,6 \text{ para } i=l \text{ e } j=1 \quad (4.25)$$

$$\alpha(i,j,1)+\alpha(i,j,2)+\alpha(i,j,4)+\alpha(i,j,5)+\alpha(i,j,7)+\alpha(i,j,10)+\alpha(i,j,11)+\alpha(i,j,12)+\alpha(i,j,13)+\alpha(i,j,24)\leq 3,6 \text{ para } i=l \text{ e } j=2 \quad (4.26)$$

$$\alpha(i,j,18)+\alpha(i,j,19)+\alpha(i,j,21)\leq 0,9 \text{ para } l=1 \text{ e } j=1 \quad (4.27)$$

Tabela 4.2a – Resultado da primeira etapa para o funcionamento de 2 conjuntos motor-bomba para um problema qualquer.

Elevatória	Bomba	Horas de Funcionamento (minutos)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		FORA DE PONTA											
I	1	1	1	1	1	1	1	1	0,3	0,2	1	1	1
I	2	0,2	0,3	0	0,3	0,5	1	0,4	0	0	0,3	0,5	0,6

Tabela 4.2b – Resultado da primeira etapa para o funcionamento de 2 conjuntos motor-bomba para um problema qualquer.

Elevatória	Bomba	Horas de Funcionamento (minutos)											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		FORA PONTA						PONTA			FORA PONTA		
I	1	1	0,4	0,5	1	1	0,4	0,5	1	0,2	1	1	1
I	2	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4

Com relação aos elementos da função objetivo relativos aos antecessores ou sucessores às variáveis de decisão fracionárias temos que:

- os  $\alpha(i,j,t)$  constantes e iguais a 0 ou 1, antecessores ou sucessores às variáveis de decisão com números fracionários, segundo os resultados da 1ª Etapa, deveriam ser variáveis de decisão na programação quadrática e entrar na função objetivo para permitir ver se o antecessor ou sucessor está ligado ou desligado para ligar ou desligar o  $\alpha(i,j,t)$  fracionário e minimizar o número de liga-desligas;
- para evitar incluir os  $\alpha(i,j,t)$  inteiros antecessores e sucessores como variáveis de decisão (pois já se sabe os seus valores), leva-se em consideração o seu valor na hora de se estabelecer a função objetivo da seguinte forma: se o antecessor  $\alpha(i,j,t) = 1$ , adicionar  $\alpha(i,j,t).\alpha(i,j,t+1)=$

$\alpha(i,j,t+1)$  na função objetivo, caso contrário ( $\alpha(i,j,t) = 0$ ) o termo  $\alpha(i,j,t) \cdot \alpha(i,j,t+1) = 0$ , ou seja, não se adiciona nada, e a mesma regra se aplicará ao sucessor de uma variável de decisão fracionária obtida como solução na 1ª Etapa.

Dentro deste contexto, inclui-se na função objetivo, para este problema, a seguinte soma:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \quad f_o = & \alpha(1,1,8) + \alpha(1,1,9) + \alpha(1,1,14) + \alpha(1,1,15) + \alpha(1,1,18) + \alpha(1,1,19) + \\ & \alpha(1,1,21) + \alpha(1,2,5) + \alpha(1,2,7) + \sum_i \sum_j \sum_t \alpha_{ij,t} \alpha_{ij,t+1} \quad \text{para } \forall ijt | 0 < \alpha_{ijt} < 1 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Observe que este tipo de programação quadrática tem um número bem reduzido de variáveis de decisão e apresenta restrições lineares, portanto, espera-se que o processo de convergência para um (de vários possíveis) ótimo (global) seja bem rápido.

Têm-se como restrições operacionais:

- As limitações das variáveis de decisão  $\alpha(i,j,t)$  ( 0 ou 1 )
- Os balanços hídricos e capacidades operacionais dos componentes hidráulicos, que se mantêm (observe que os balanços hídricos vão ter que considerar como constantes as vazões oriundas de conjuntos motor-bomba considerados ligados na 1ª Etapa),
- Para se ter o mesmo número de horas ligado, para cada sistema motor-bomba, em horário de ponta (e fora de ponta), tem-se que incluir que a soma dos  $\alpha(i,j,t)$  no horário de ponta (e fora de ponta) como sendo igual a soma de seus valores obtidos via PL. Esta restrição manterá o custo energético ótimo obtido na PL.

Se desejar que não se tenha número fracionário para funcionamento dos sistemas motor-bomba, basta aproximar a soma dos  $\alpha(i,j,t)$  fracionários para um número inteiro imediatamente superior e relaxar, principalmente, as restrições volumétricas (que podem forçar a geração de números fracionários).

---

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados das técnicas de otimização, apresentadas no Capítulo IV, aplicadas ao sistema principal de abastecimento de água de Campina Grande PB. A primeira análise, onde é feita uma comparação entre a aplicação das programações linear, não linear e algoritmo genético, é realizada considerando a possibilidade das variáveis de decisão admitir valores fracionários (métodos contínuos). Uma segunda análise é realizada quando da comparação do desenvolvimento de um modelo baseado em programação linear e linear-inteira com um método baseado no estabelecimento de regras de decisão (métodos inteiros). Finalmente, é feita uma análise do algoritmo proposto, que é baseado na aplicação de um modelo de programação linear na primeira etapa e de programação quadrática na segunda etapa.

### 5.1. Resultado da análise comparativa de métodos contínuos

Os dados utilizados no subsistema de abastecimento de Campina Grande, mostrado na Figura 3.11, para o funcionamento das metodologias foi de essencial importância para os resultados e o sucesso dos métodos de otimização. Análises efetuadas na comparação entre os métodos de Programação Linear, Não Linear e Algoritmo Genético, no sistema principal de abastecimento de Campina Grande.

Ressalta-se que as análises aqui efetuadas consideram um período de simulação de 24 horas, iniciando na zero hora. Como essa avaliação considera um plano para obtenção da melhor regra operacional para as 24 horas subseqüentes, optou-se por impor que os níveis de água nos reservatórios, no final do período de análise, sejam idênticos aos considerados no início da simulação.

Foi utilizado o mesmo modelo matemático, no ambiente de programação do MATLAB. Sendo que na programação linear utilizou-se a rotina “linprog” do toolbox de otimização do MATLAB.

A formulação da programação linear e do algoritmo genético produziu 1154 restrições, enquanto que a programação não-linear produziu 890 restrições. Como esperado a linearização aumentou o número de restrições. Tanto a programação

linear quanto a não linear estão representadas por um problema numérico de larga escala que foi resolvido pelo método do ponto interior primal-dual e pelo método de Newton, respectivamente.

Na utilização da otimização linear não foi necessária à entrada de valor inicial de iteração, o que facilita bastante a análise do problema. Os resultados de custo do consumo de energia elétrica, tempo de funcionamento dos conjuntos, número de iterações ou gerações, tempo de processamento dos testes e a estabilidade, i.e., quando não ocorrem mais mudanças no valor da função objetivo, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados gerais para os métodos contínuos

	Linear	Não Linear	Não Linear	Não Linear	AG	AG	AG
Energia na Ponta (kWh)	2855	2855	2855	2855	2655	2658	781
Energia Fora de Ponta (kWh)	35387	35386	35386	35386	45265	46056	47138
Tempo na Ponta (h)	9,00	9,00	9,00	9,00	5,00	5,01	1,23
Tempo Fora de Ponta (h)	95,98	95,98	95,98	95,98	90,20	91,74	112,78
Custos (R\$)	2920	2920	2920	2920	3622	3681	3547
Dado Inicial	---	OR	SB	SP	OR	SB	SP
Tempo de Processamento (s)	6	10.366	92	2.905	12.537	15.109	13.095
Iteração ou Geração	11	26	3	14	14	14	14
Estabilidade	9	16	2	11	2	12	11
Tamanho da População Inicial	---	---	---	---	50	50	50

OR – Operação Real; SB – Solução Básica; SP – Simulação Padrão; AG – Algoritmo Genético

Na Tabela 5.1, observa-se que, em média, a programação linear leva 0,55 segundos para gerar uma solução, enquanto que a PNL e o AG levam 310,77 e 970,02 segundos, respectivamente.

Como a função objetivo do algoritmo genético não alcançou valores equivalentes aos obtidos nas programações lineares e não linear, aumentou-se o número de gerações. Ainda, determinou-se a população inicial a partir dos dados iniciais usados para as otimizações da operação real (OR), simulação padrão (SP), solução básicos (SB) e dados gerados pela fatoração LU (ver Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Resultados Gerais na modificação do AG

	AG	AG	AG
Energia na Ponta (kWh)	0	0	0
Energia Fora de Ponta (kWh)	42708	42708	42708
Tempo na Ponta (h)	0,00	0,00	0,00
Tempo Fora de Ponta (h)	93,66	93,66	93,66
Custos (R\$)	3133	3133	3133
Dado Inicial	OR, SB, SP,LU	OR, SB, SP,LU	OR, SB, SP, LU
Tempo de Processamento (s)	90.812	194.514	634.257
Iteração ou Geração	150	300	1000
Estabilidade	27	262	550
Tamanho da População Inicial	50	50	50

OR – Operação Real; SB – Solução básica; SP - Simulação Padrão; LU – Fatoração LU.

A variação de volume do reservatório de distribuição do R9 é representada na Figura 5.1, para a PL, PNL e o AG, esse com os dados iniciais da OR, SB, SP, LU. Ainda, a Figura 5.2 apresenta o bombeamento do sistema em relação à demanda para o R9 e a Figura 5.3 mostra o bombeamento para a estação de tratamento.

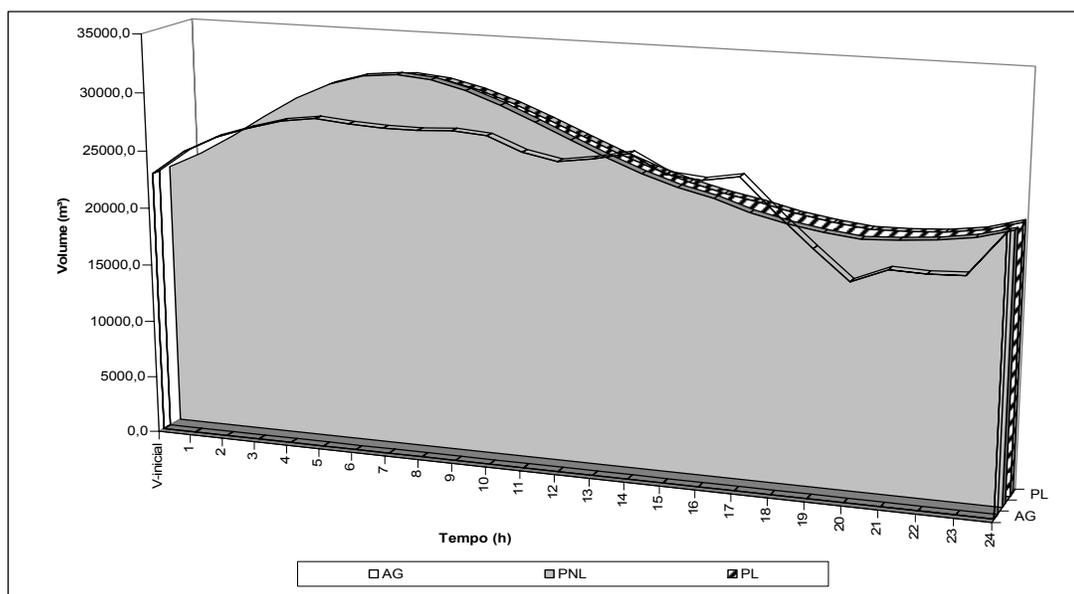


Figura 5.1 - Variação de Armazenamento no Reservatório R9

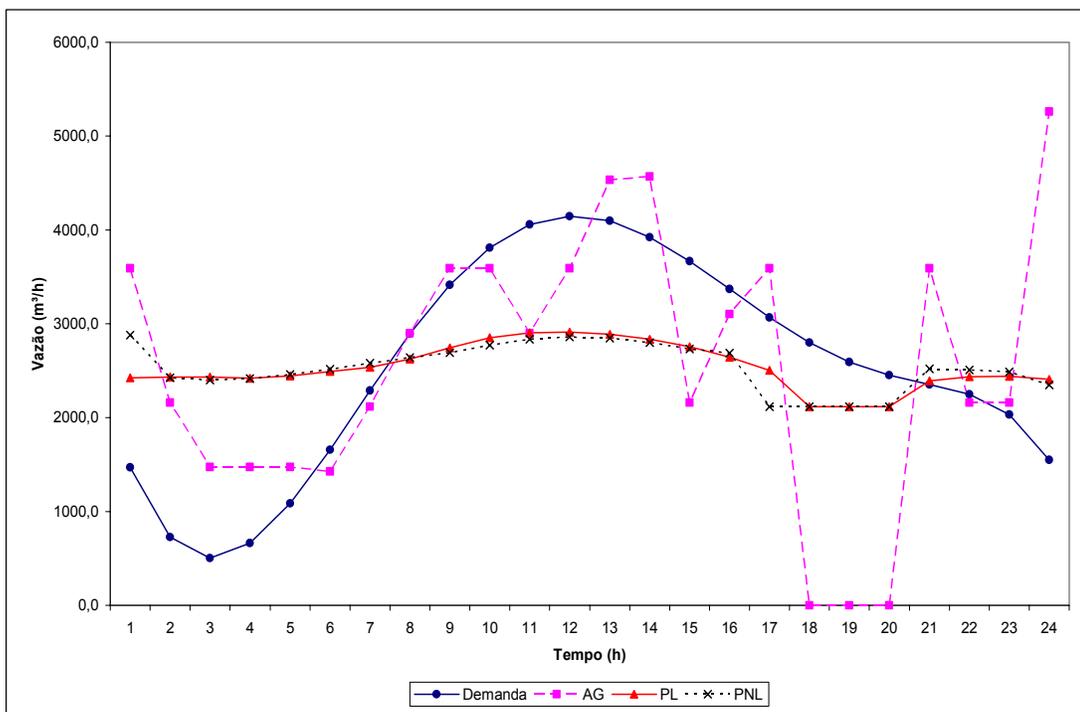


Figura 5.2 – Relação de Bombeamento e Demanda para o R9

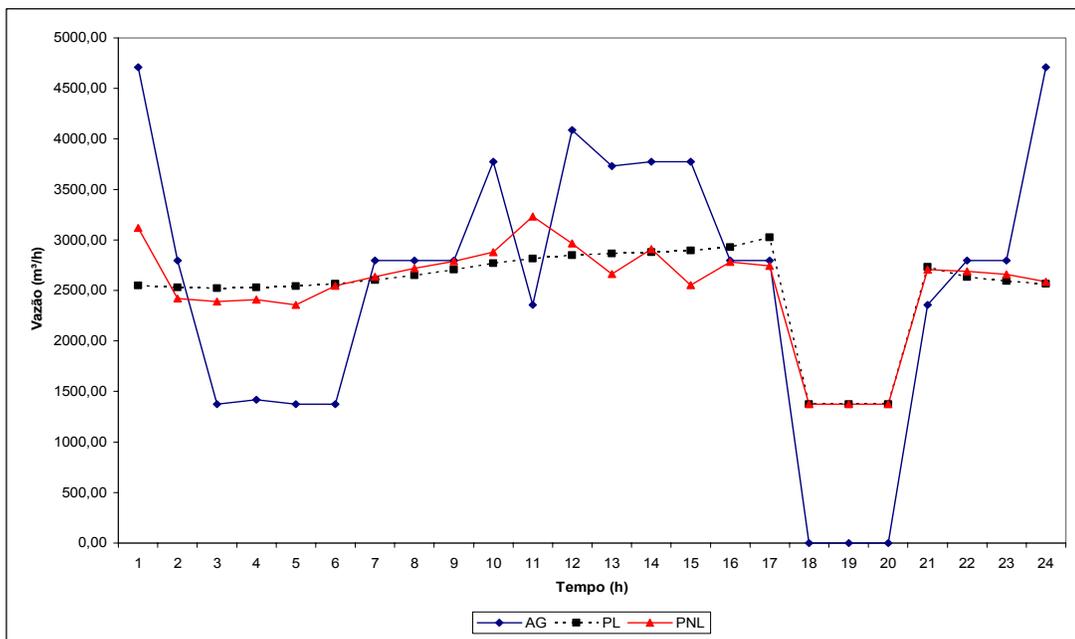


Figura 5.3 - Relação de Bombeamento para ETA

## 5.2. Resultados da análise comparativa de métodos inteiros

Os resultados de custo e consumo de energia elétrica, para o subsistema de abastecimento de Campina Grande dado pela Figura 3.11, obtidos via otimização e simulação do sistema é apresentada na Tabela 5.3. A variação de volume do reservatório de distribuição de Campina Grande “R9” é representada na Figura 5.4. Na primeira etapa volume inicial do “R0” foi de 42,6% da sua capacidade, que representa 997 m<sup>3</sup>, e 57,20% da capacidade do “R9”, que representa 22.308 m<sup>3</sup>. Ainda as Figuras 5.5 e 5.6 mostram o bombeamento do sistema para o R9 e para a ETA, respectivamente, em relação à demanda de Campina Grande

Tabela 5.3 – Resultados do custo e consumo de energia diária

	1º Etapa	2º Etapa	Simulação
Energia na Ponta (kWh)	2.855,20	2.667,54	1.252,98
Energia Fora de Ponta (kWh)	35.387,52	38.221,64	47.931,34
Tempo na Ponta (h)	9,00	8,00	2,00
Tempo Fora (h)	95,98	100,00	114,00
Custos (R\$)	2.920,06	3.106,78	3.896,792

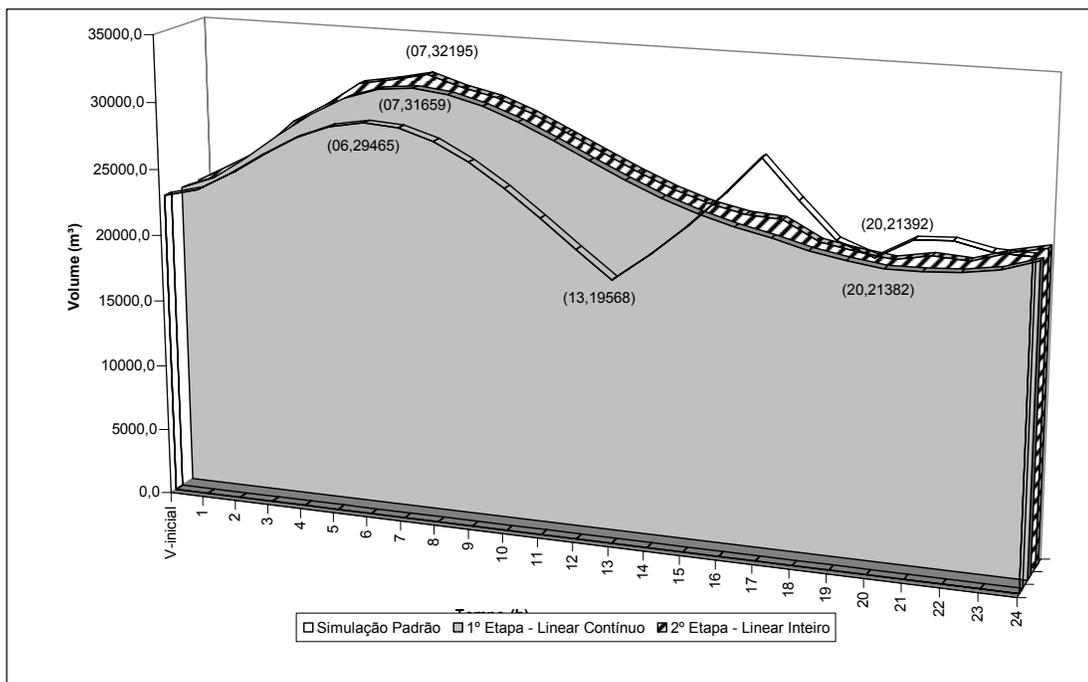


Figura 5.4 – Variação de Armazenamento no R9

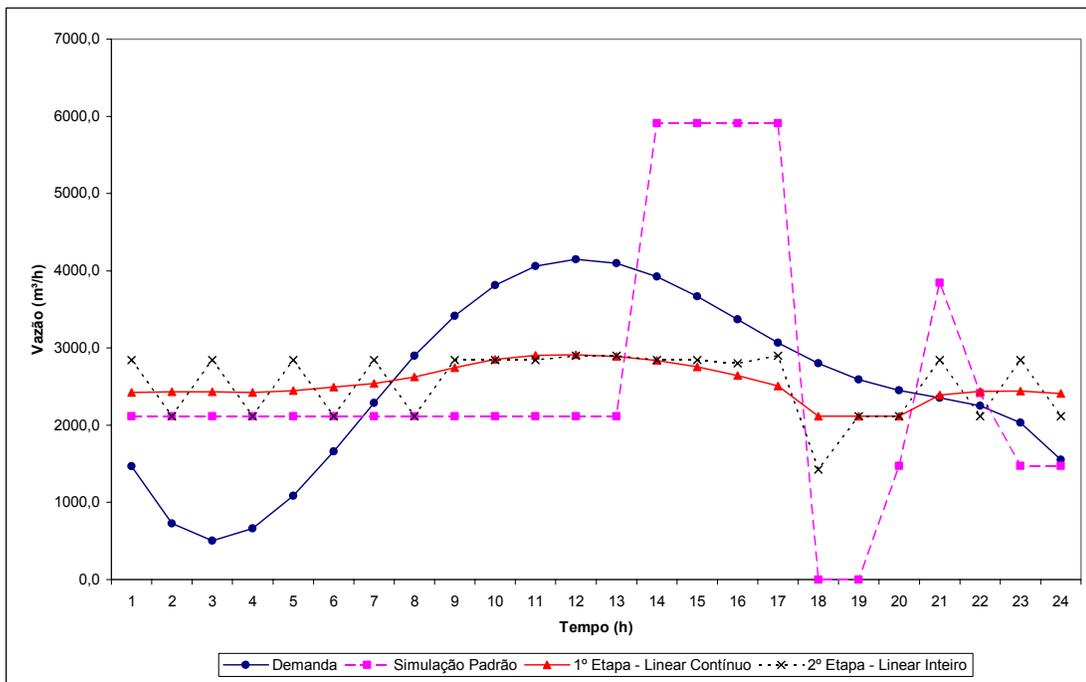


Figura 5.5 – Relação de Bombeamento e Demanda do R9

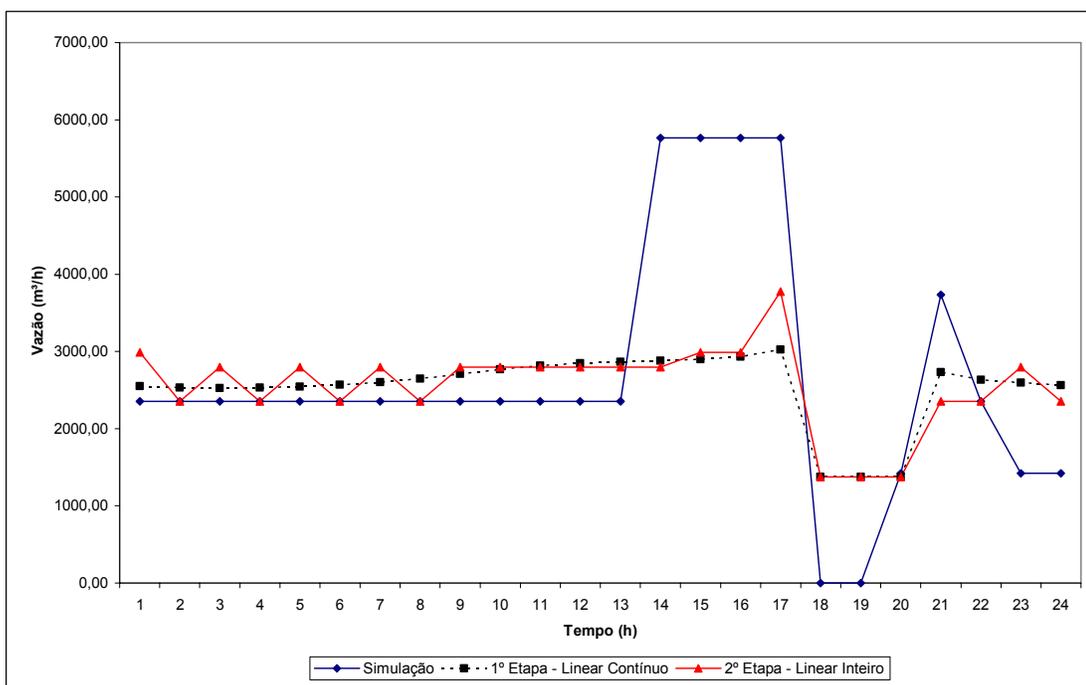


Figura 5.6 – Relação de Bombeamento para a ETA

### 5.3. Resultados do modelo programações linear e quadrática

A metodologia descrita na Seção 4.5 foi aplicada ao sistema de abastecimento de água de Campina Grande, operado pela CAGEPA, dado na Figura 3.6. Em uma primeira análise, verificou-se como o sistema se comporta quando da definição de diferentes volumes máximos e mínimos operacionais para os reservatórios, assim como para suas condições iniciais (e, conseqüentemente, a sustentabilidade hídrica).

A Figura 5.7 mostra o número de variáveis de decisão fracionárias quando se variam os volumes mínimos dos reservatórios de 0 a 30% de suas capacidades, mantendo-se os volumes iniciais e máximos em 50% e 100% da capacidade dos reservatórios, respectivamente. Observa-se que o menor número de variáveis fracionárias é obtido quando os volumes mínimos são iguais a 20% de suas capacidades máximas. Também se observou que o valor da função objetivo (163,44) permaneceu o mesmo para os volumes mínimos considerados.

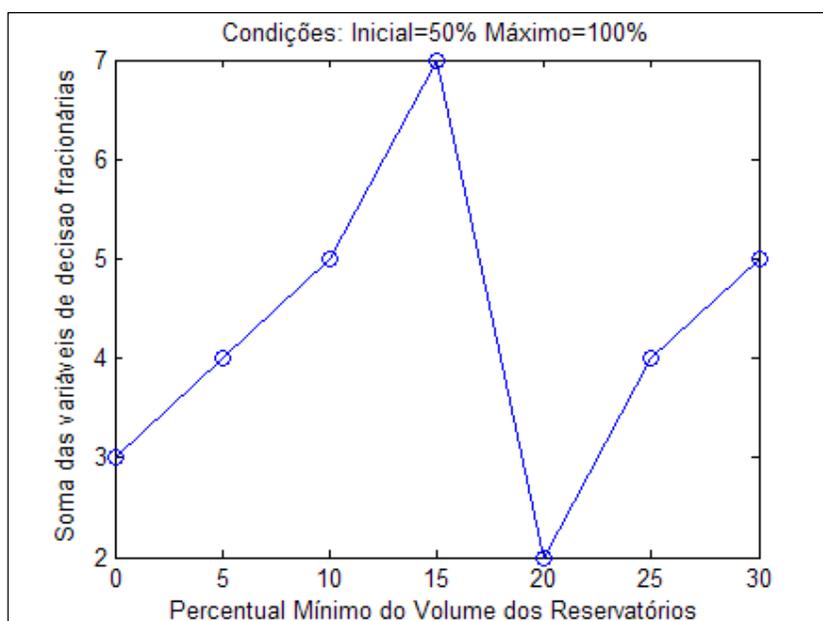


Figura 5.7 – Relação entre o número de variáveis de decisão fracionárias com o aumento dos volumes mínimos reservatórios

A Figura 5.8 mostra a sensibilidade da solução quanto ao número de variáveis de decisão fracionárias quando se diminuem os volumes máximos do reservatório em até 30% de suas capacidades, mantidos os volumes iniciais e mínimos em 50% e 0% de suas capacidades, respectivamente. Observa-se que existe uma tendência de aumentar o número de variáveis de decisão fracionárias com a redução dos volumes máximos dos reservatórios.

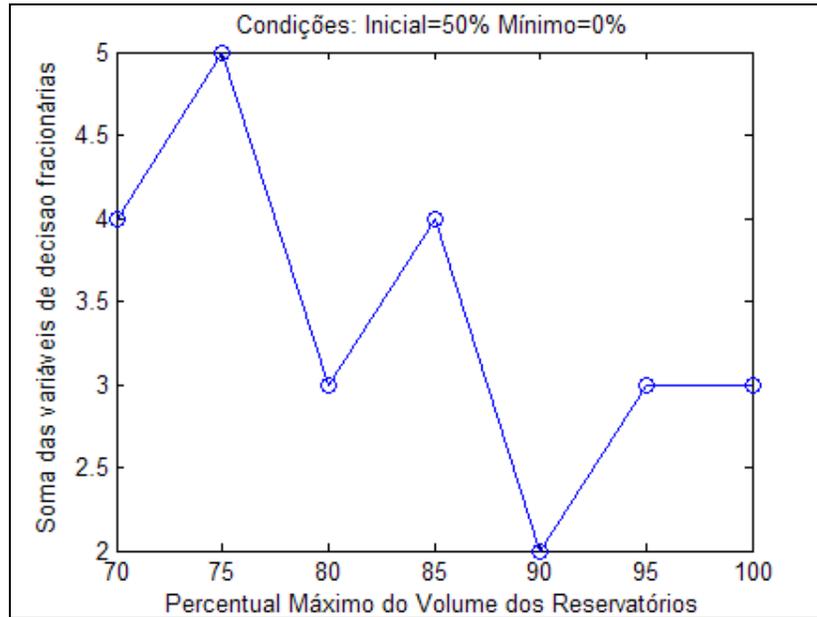


Figura 5.8: Relação entre o número de variáveis de decisão fracionárias com a redução dos volumes máximos dos reservatórios.

A Figura 5.9 mostra os valores da função objetivo quando se aumentam os volumes mínimos e, simultaneamente, diminuem os volumes máximos operativos dos reservatórios, em 5% de cada vez, até 30% da capacidade máxima, mantendo-se os volumes iniciais em 50% de suas capacidades. Observa-se que o valor da função objetivo aumenta na medida em que se diminuem os volumes dos reservatórios. Com a informação da Figura 5.10, ainda, pode-se verificar a existência de diferentes pontos de ótimos globais.

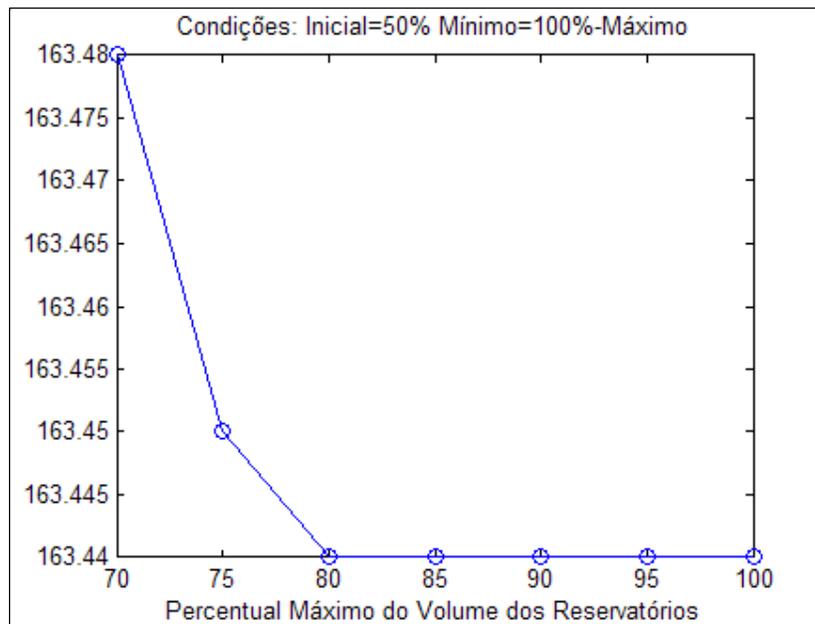


Figura 5.9 – Aumento no valor da função objetivo com a redução dos volumes máximos dos reservatórios

Mantidos os volumes iniciais fixos em 50% das capacidades dos reservatórios, a Figura 5.10 mostra que há um aumento no número de variáveis de decisão fracionárias na medida em que, simultaneamente, diminuem-se os volumes máximos e aumentam-se os volumes mínimos dos reservatórios.

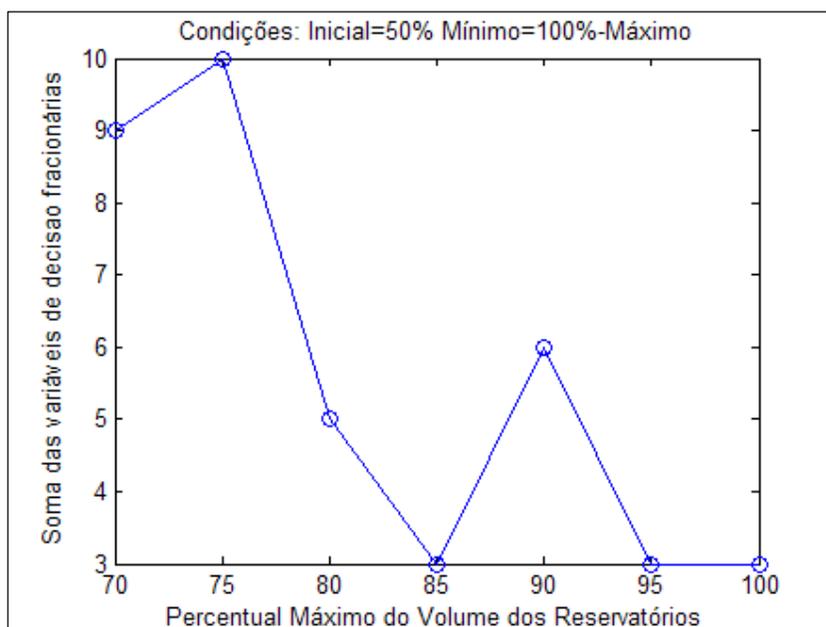


Figura 5.10 – Relação entre o número de variáveis de decisão fracionárias com, simultaneamente, um aumento nos volumes mínimos e redução nos volumes máximos dos reservatórios.

Observa-se, na Figura 5.11, que o sistema de abastecimento não é muito sensível, em termos de função objetivo, à variação dos valores atribuídos aos volumes iniciais (e, conseqüentemente, aos volumes finais, devido a condição de sustentabilidade hídrica), quando os volumes mínimos e máximos operacionais foram fixados em 10% e 90% das capacidades máximas dos reservatórios. No entanto, pela Figura 5.12, pode-se observar que se obtêm apenas 2 variáveis de decisão fracionárias quando se adota volumes iniciais iguais a 65% das capacidades dos reservatórios.

Sendo os valores adotados para os volumes iniciais, mínimos e máximos como 65%, 10% e 90% das capacidades dos reservatórios, os resultados obtidos para a operação dos conjuntos motor-bomba das estações elevatórias, via aplicação da programação linear, na 1ª Etapa, são apresentados na Tabela 5.4. Os comportamentos volumétricos dos reservatórios são mostrados na Figura 5.13.

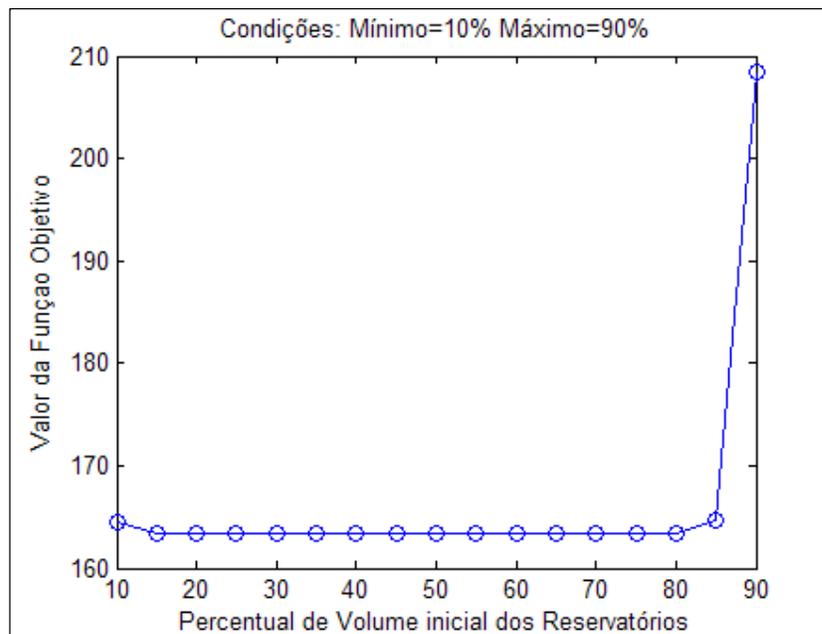


Figura 5.11 - Relação entre o valor da função objetivo com os volumes iniciais dos reservatórios

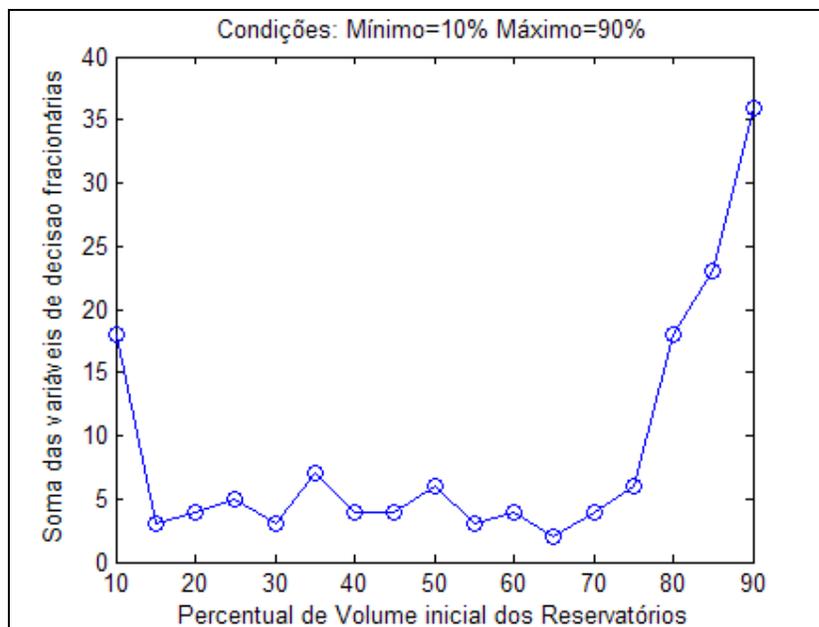


Figura 5.12 - Número de variáveis de decisão fracionárias em função dos volumes iniciais dos reservatórios

Tabela 5.4a – Fração de funcionamento por hora dos conjuntos motor-bomba (CMB) de cada elevatória (resultados do modelo linear- 1ª Etapa)

Hora	Elevatória I			Elevatória II			Elevatória III
	CMB1	CMB2	CMB3	CMB1	CMB2	CMB3	CMB1
1	1	1	0	1	1	0	0,480
2	1	1	0	1	1	0	0,417
3	1	1	0	1	1	0	0,404
4	1	1	0	1	1	0	0,373
5	1	1	0	1	1	0	0,360
6	1	1	0	1	1	0	0,354
7	1	1	0	1	1	0	0,351
8	1	1	0	1	1	0	0,348
9	1	1	0	1	1	0	0,344
10	1	1	0	1	1	0	0,339
11	1	1	0	1	1	0	0,331
12	1	1	0	1	1	0	0,319
13	1	1	0	1	1	0	0,302
14	1	1	0	1	1	0	0,278
15	1	1	0	1	1	0	0,248
16	1	1	0	1	1	0	0,211
17	1	1	0	1	1	0	0,164
18	1	0	0	1	0,546	0	0
19	1	0	0	1	0,973	0	0
20	1	0	0	1	0,847	0	0
21	1	1	0	1	1	0	0,120
22	1	1	0	1	1	0	0,132
23	1	1	0	1	1	0	0,135
24	1	1	0	1	1	0	0,129

Tabela 5.4b – Fração de funcionamento por hora dos conjuntos motor-bomba (CMB) de cada elevatória (resultados do modelo linear- 1ª Etapa)

Hora	Elevatória IV		Elevatória V			Elevatória VI		
	CMB1	CMB2	CMB1	CMB2	CMB3	CMB1	CMB2	CMB3
1	1	0,725	1	0	0	1	1	0,316
2	1	0,708	1	0	0	1	1	0,313
3	1	0,702	1	0	0	1	1	0,309
4	1	0,698	1	0	0	1	1	0,306
5	1	0,696	1	0	0	1	1	0,302
6	1	0,697	1	0	0	1	1	0,299
7	1	0,699	1	0	0	1	1	0,296
8	1	0,701	1	0	0	1	1	0,292
9	1	0,702	1	0	0	1	1	0,288
10	1	0,703	1	0	0	1	1	0,283
11	1	0,704	1	0	0	1	1	0,278
12	1	0,704	1	0	0	1	1	0,272
13	1	0,704	1	0	0	1	1	0,266
14	1	0,701	1	0	0	1	1	0,259
15	1	0,693	1	0	0	1	1	0,251
16	1	0,676	1	0	0	1	1	0,243
17	1	0,634	1	0	0	1	1	0,233
18	1	0	1	0	0	1	1	0
19	1	0	1	0	0	1	1	0
20	1	0	1	0	0	1	1	0
21	1	0,628	1	0	0	1	1	0,213
22	1	0,659	1	0	0	1	1	0,214
23	1	0,671	1	0	0	1	1	0,214
24	1	0,651	1	0	0	1	1	0,213

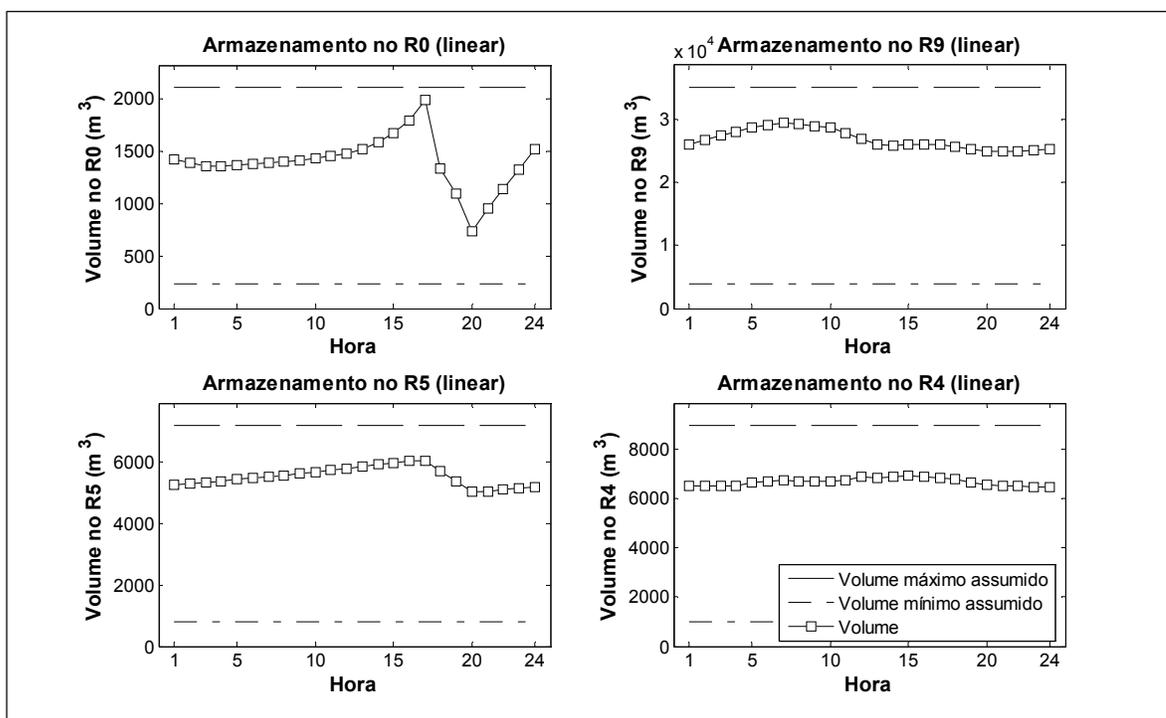


Figura 5.13 – Comportamento dos volumes nos reservatórios segundo o modelo linear (1ª Etapa)

Observa-se, pela Tabela 5.4, que, das 360 variáveis de decisão do problema, a solução ótima encontrada gerou 66 variáveis de decisão fracionárias. Além disso, no período das 18 às 20 horas, considerado horário de pico, houve uma diminuição no número de conjuntos motor-bomba ligados (todas as estações elevatórias, exceto a V, apresentaram redução no horário de ponta).

Por outro lado, pode-se observar nos gráficos da Figura 5.13 que os reservatórios R4, R5 e R9 trabalham com folga, tanto para mais ou para menos. Além disso, observa-se, como fator restritivo, uma provável inadequação da operação de uma hora inteira de conjuntos motor-bomba ligados ao reservatório R0, por motivos de baixa capacidade de acumulação e pode requerer valores fracionários.

Pode-se inferir, também, que esta solução é um dos ótimos globais para o problema em questão, ou seja, pequenas variações nestes valores são possíveis, desde que as restrições físicas e operacionais do problema sejam satisfeitas.

Os dados obtidos na 2ª Etapa, considerados como regra operacional para os conjuntos motor-bomba das estações elevatórias, são apresentados na Tabela 5.5 e os comportamentos volumétricos dos reservatórios são apresentados na Figura 5.14.

Tabela 5.5a – Fração de funcionamento por hora dos conjuntos motor-bomba (CMB) de cada elevatória (resultados do modelo *quadrático* – 2ª Etapa)

Hora	Elevatória I			Elevatória II			Elevatória III
	CMB1	CMB2	CMB3	CMB1	CMB2	CMB3	CMB1
1	1	1	0	1	1	0	0
2	1	1	0	1	1	0	0,127
3	1	1	0	1	1	0	0
4	1	1	0	1	1	0	1
5	1	1	0	1	1	0	1
6	1	1	0	1	1	0	1
7	1	1	0	1	1	0	1
8	1	1	0	1	1	0	1
9	1	1	0	1	1	0	0
10	1	1	0	1	1	0	0
11	1	1	0	1	1	0	0
12	1	1	0	1	1	0	0
13	1	1	0	1	1	0	0
14	1	1	0	1	1	0	0
15	1	1	0	1	1	0	0,152
16	1	1	0	1	1	0	0
17	1	1	0	1	1	0	0
18	1	0	0	1	1	0	0
19	1	0	0	1	1	0	0
20	1	0	0	1	1	0	0
21	1	1	0	1	1	0	0
22	1	1	0	1	1	0	0
23	1	1	0	1	1	0	0
24	1	1	0	1	1	0	1

Tabela 5.5b– Fração de funcionamento por hora dos conjuntos motor-bomba (CMB) de cada elevatória (resultados do modelo quadrático – 2ª Etapa)

Hora	Elevatória IV		Elevatória V			Elevatória VI		
	CMB1	CMB2	CMB1	CMB2	CMB3	CMB1	CMB2	CMB3
1	1	1	1	0	0	1	1	0
2	1	1	1	0	0	1	1	0
3	1	1	1	0	0	1	1	1
4	1	0	1	0	0	1	1	0
5	1	0	1	0	0	1	1	0
6	1	0	1	0	0	1	1	0
7	1	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	1	0	0	1	1	0
9	1	1	1	0	0	1	1	1
10	1	1	1	0	0	1	1	1
11	1	1	1	0	0	1	1	0
12	1	0	1	0	0	1	1	0
13	1	0	1	0	0	1	1	0
14	1	1	1	0	0	1	1	0
15	1	1	1	0	0	1	1	1
16	1	1	1	0	0	1	1	1
17	1	1	1	0	0	1	1	1
18	1	0	1	0	0	1	1	0
19	1	0	1	0	0	1	1	0
20	1	0	1	0	0	1	1	0
21	1	1	1	0	0	1	1	0
22	1	1	1	0	0	1	1	0
23	1	1	1	0	0	1	1	0
24	1	0	1	0	0	1	1	0

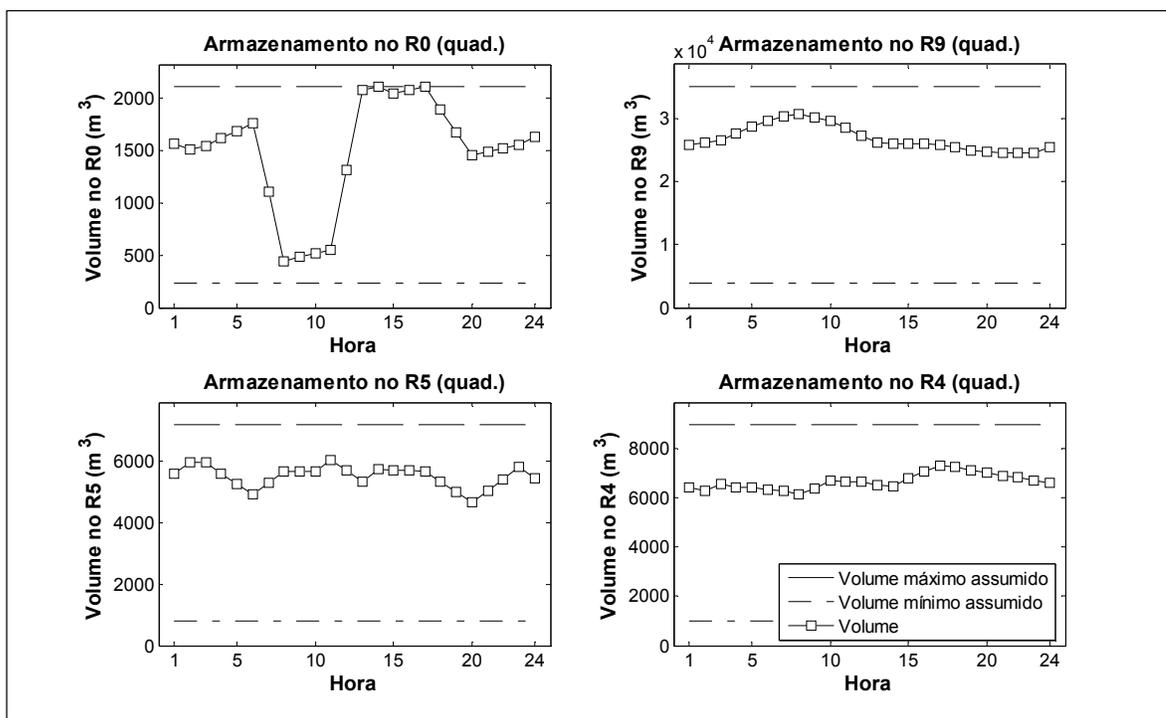


Figura 5.14 – Comportamento dos volumes nos reservatórios segundo o modelo quadrático (2ª Etapa)

Observa-se que o número de valores fracionários para o tempo em que os conjuntos motor-bomba permanecem ligados reduziu para 2, sendo estes valores próximos de zero, o que mostra a efetividade da metodologia aplicada na 2ª Etapa do processo de solução do problema. Além disso, observa-se, pela Figura 5.14, que uma possível restrição para a não utilização de valores inteiros na solução do problema esta na baixa capacidade de acumulação do reservatório R0, que atinge seu valor limite.

Por outro lado, observa-se que os reservatórios R4, R5 e R9 trabalham com folga, tanto para mais como para menos, durante as 24 horas do dia.

O custo ótimo de energia foi de R\$ 26.703,46 ao dia.

Finalmente, para atingir uma solução ótima para o problema, foi requerido um tempo de processamento igual a 13 segundos em um computador com um processador Pentium de 2,56 GHz. Este tempo, dentro de uma análise de dados com intervalo de tempo horário, é suficiente para se efetuar inúmeras análises a fim de se obter uma regra operacional ótima, de acordo com as restrições operacionais que venham a ser impostas.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1. Conclusões

Neste trabalho, pode-se verificar o sucesso da implantação de formulações matemáticas tanto para redução do consumo de energia elétrica, na definição de regras operacionais ótimas, na influência da utilização de diferentes modelos aplicados ao sistema, concluindo-se com a determinação de regras operacionais ótimas para acionamento de conjunto motor-bomba.

### 6.2. Conclusões da comparação de diferentes modelos contínuos (PNL, PL e AG)

Na avaliação da utilização de diferentes modelos, PL, PNL e AG, que geram soluções com valores fracionários, foi verificado que:

- A programação linear requer o menor tempo de processamento quando comparado a programação não linear e algoritmo genético e dispensa a atribuição de um valor inicial para as variáveis de iteração;
- A programação linear e não linear são mais eficazes, nesta situação, do que o algoritmo genético, já que a função objetivo é linear;
- A programação não linear e algoritmo genético são sensíveis à escolha dos valores iniciais das variáveis de decisão;
- Na programação não linear o valor inicial atribuído às variáveis de decisão pode aumentar o tempo de processamento em mais de 100 vezes;
- No algoritmo genético a inclusão de vários conjuntos de valores iniciais para as variáveis de decisão, que vão formar na população inicial, influencia o valor da função objetivo;
- O algoritmo genético pode fornecer uma solução próxima a um valor ótimo global, mas requer um alto tempo de processamento;

- O número de gerações no algoritmo genético é um fator importante na confirmação de estabilidade da função objetivo, ou seja, o critério de parada é determinado pelo número de gerações e não pelo valor da função objetivo;
- A linearização de funções em problemas dessa categoria é viável.

Vale ressaltar, no entanto, para uma possível aplicação de função multiobjetivo para problemas mal condicionados, com variáveis discretas ou funções descontínuas, o algoritmo genético pode apresentar melhor viabilidade.

### **6.3. Conclusões sobre o modelo de otimização via programação linear inteira.**

Neste item, pode-se verificar que é muito difícil estabelecer regras operativas para sistemas de bombeamento que visem reduzir os custos operacionais, sem que se faça uso de modelos de otimização. A formulação matemática, de natureza linear, apresentada para definição das regras operacionais horárias ótimas, durante 24 horas, de cada conjunto motor-bomba do sistema de abastecimento de Campina Grande, leva em conta as restrições de demanda, capacidades máxima e mínima dos reservatórios, capacidade de tratamento da ETA e restrições operacionais. Além disso, as regras operacionais, que reduzem os custos com energia elétrica, obtidas via programação linear inteira foram rápidas de se obter, em sistema resumido viabilizando, assim, sua aplicação em tempo real caso se conheça a demanda do sistema.

Comparado à regra de simulação padrão, este método proporciona uma redução de 16,86% no consumo energético em horário fora de ponta, que representa uma economia financeira de 20,27% obtidos através de uma redução de 7% no tempo de funcionamento dos conjuntos motor-bomba. Ainda é importante salientar que existe uma pequena diferença do volume máximo na primeira etapa em relação à segunda etapa, por questões de requerimentos de intervalos de tempo inteiros. Deste modo, só através da divisão do processo em duas etapas foi possível aplicar a programação linear inteira binária.

Por outro lado, na prática, programação linear inteira binária, mesmo usando métodos com relaxação, divisão da otimização em duas etapas, requer um alto tempo computacional mesmo para um pequeno número de variáveis, podendo ser impraticável para um valor inferior a uma centena de variáveis. O motivo é que o espaço de busca é da ordem de  $2^n$ , sendo  $n$  o número de variáveis de decisão. Portanto, em problemas desta natureza, mesmo de ordem reduzida a um conjunto

motor-bomba para cada estação elevatória numa análise horária, pode ter um número elevado de variáveis de decisão, tornando impraticável a busca de uma solução. No problema de teste teríamos 24 x número de estações elevatórias, o que geraria um máximo de  $6 \times 24 = 144$  variáveis.

#### **6.4. Conclusões sobre a aplicação da programação linear e quadrática.**

Este modelo se baseia na solução do problema em duas etapas: na primeira etapa faz-se uso da programação linear para se determinar uma regra operacional ótima global, porém aceita valores fracionários para as variáveis de decisão, e na segunda etapa faz-se uso da programação quadrática para forçar o ajuste de valores fracionários a convergirem para valores binários inteiros (0 e 1), ao mesmo tempo que minimiza o número de operações de liga-desliga e mantêm-se o valor ótimo global obtido na primeira etapa.

Os resultados demonstraram, para o sistema em estudo, que houve uma redução de 66 variáveis, na primeira etapa, para 2 variáveis fracionárias, na segunda etapa, num tempo de 13 segundos de processamento, mostrando a eficiência do método. Caso se deseje reduzir o número de variáveis fracionárias deve-se flexibilizar as restrições do problema ou o valor da função objetivo durante a segunda etapa, o que não foi realizado neste trabalho.

Finalmente, os resultados se mostraram coerentes com a lógica comportamental do sistema, ou seja, os sistemas motor-bomba ligados primeiro apresentam uma maior relação vazão/custo, levando a serem selecionados primeiro. Além disso, espera-se, como comportamento, uma redução do número de sistemas motor-bomba ligados nos horários de ponta (preço da energia é mais cara). Tais fatos foram verificados nas regras operacionais obtidas pela metodologia aqui proposta.

#### **6.5. Recomendações**

Como trabalhos futuros utilizando essa linha de pesquisa em redução do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água, seriam importantes:

1. Que modelos de simulação hidráulica fossem acoplados ao modelo de otimização no sentido de avaliar outras variáveis do sistema (eg.

pressão/perdas, qualidade de água, etc.) ou a facilitar o seu uso.

2. Um combate às perdas físicas nos sistemas de abastecimento público, agregado a um programa de otimização, levaria a redução dos custos operacionais e minimizariam, também, os custos de energia elétrica.
3. Fazer um re-estudo do problema utilizando modelagem que incorpore outras funções custo-benefício (multiobjetivo), na operação e manutenção dos sistemas.
4. Estudar e aplicar técnicas de otimização na minimização do uso de energia elétrica pelo sistema quando da introdução de inversores de frequência, como ferramentas de controle de vazões no bombeamento das estações elevatórias.

## Referências Bibliográficas

---

ALMEIDA, R., BARBOSA, P.S.F. (2002). Operação ótima de Sistemas de Distribuição de Água via Modelo de Programação Não Linear Inteira Mista. In: Seminário-Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa. CD-ROM. 19p.

ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. (1977) Design of Optimal Water Distribution Systems. Water Resources Research, Vol. 13, Nº 6, p. 885-900, New York, NY, USA.

ANGEL, R.P.L.; HERNANDÉZ, R.J.A.; AGUDELO R.J.J. (1999). Fuzzy Expert System Model for The Operation of an Urban Water Supply System. Water Industry Systems: modeling and optimization applications. Volume 1. Research Studies Press Ltd. Exeter, England, p. 449-457.

BAO, Y.; MAYS, L. W. (1990). Model for Water Distribution System Reliability. Journal of Hydraulic Engineering., v.116, Nº 9, p.1119-1137.

BHATTACHARYA, B.; LOBBRECHT, A. H.; SOLOMATINE, D. P. (2003). Neural Networks and Reinforcement Learning in Control of Water Systems. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 129, n.6, November. P.458-465.

BARBOSA, J. (2001). Simulação da operação de bombas em sistemas de abastecimento de água. Dissertação de mestrado – Unidade Acadêmica de Engenharia Civil/Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 110 p.

BRASILEY, D., JACOBS, A.,(1989) Energy Management in the Waterworks Industry. Journal National of England Water Works Association, Vol. 94, Nº 3, p. 216-226, (Apud Ormsbee et al., 1989).

.BRION, L.; MAYS, L.; W., (1991) Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, N° 11, p. 1551-1569, New York, NY, USA,

CABRERA, E. (1977) Uso Eficiente del Agua, Directrice y Herramientas Efficient Use Rationale On Walter, Guidelines and Tools, Euro Water, Valencia, Espanha,. (apud Barbosa et al, 2000).

CELESTE, SUSUKI E KADOTA (2004). An Optimization Mode for the Operation of a Water Resource Using Quadratic Programming Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE Japan, v.4.p 373-378.

CESARIO, L. (1995). Modeling, Analysis, and Desing of Water COSGRIFF, G. O., FORTE, P. E.; KENNEDY, M.A.; RUSSEL, J. V.; Distribution Systems. Ed AWWA Denver, EE.UU.CHEUNG, P.B. (2004).

CHEUNG P.B.; REIS, L.F.R.; CORRIJO, I.B. (2003). Multiobjective Optimization to the Rehabilitation of a Water Distribution Network. In Proceedings of the International Conference on Computing and Control for the Water Industry. Londres, UH, September, p.318-328.

CHEUNG, P.B (2004). Análise de Reabilitação de Redes de Distribuição de Água de Abastecimento via Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. São Carlos – SP. 268p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

CLINGENPEEL, W. H.,(1963) Optimizing Pump Operating Cost. Journal of American Water Works Association, Vol. 75, N° 10, p.502-509,

COSGRIFF, G. O.; FORTE, P. E.; KENNEDY, M. A.; RUSSEL, J. V.; SMITH, R. D.; WEST, A.K, (1985). Interactive Computer Modeling, Monitoring, and Control of Melbourne's Water Supply System. Water Resources Research, Vol. 21, N 2, p. 123-129, New York, NY, USA.

Companhia de Água e Esgotos da Paraíba. “BOLETIM DIÁRIO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE” [Da] Campina Grande – Pb. Julho de 2003. Mensal.

CORRIJO, I. B.; REIS, R. L. F.;(2004) Extração de Regras Operacionais ótimas de Sistemas de Distribuição de Água Através de Algoritmos Genéticos e Aprendizado de Máquina. IV – SEREA Seminário Hispano-Brasileiro Sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. Anais. João Pessoa (Brasil) Novembro.

CORRIJO, I. B.; (1989). Otimização de Redes de Distribuição de Água com Expansão: Aplicação à cidade de Goiânia. São Carlos 239p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, Brasil.

COULBECK, B.; ORR, C.; (1990). Real-time optimized control of water distribution system. Optimizing the resource for water management. Session D 1 – water distribution ASCE, p. 248-251.

DANDY, G; C.; SIMPSON, A. R.; MURPHY, L. J. (1997). Comparison of Methods for Yield Assessment of Multiple Reservoir Systems. Journal of Water Resources Planning and Management, V. 123 n. 6 November, p. 350-358.

FRANCATO, A.L. (2002). Operação Multiobjetivo para a Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água. Tese de Doutorado. Universidade de Campinas (UNICAMP), Brasil.

FRANCATO, A.L., BARBOSA, P. S. F., (1999). Operação Otimizada de Sistemas Urbanos de Abastecimento. IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Pais de Língua Oficial Portuguesa – IV SILUBESA. Anais. Coimbra< Portugal. (Em CD-ROM).

FIRMINO, M. B. M.; ALBUQUERQUE A, A; CURI, W. C. (2004) Uso racional de energia no bombeamento de água em sistemas de abastecimento, via programação não-linear. Anais do IV SEREA – Seminário hispano-brasileiro sobre sistemas de abastecimento urbano de água, João Pessoa - Brasil, CD-ROM.

GOLDBERG, D. E.; KUA, C. (1987). Genetic Algorithms in Pipeline Optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1(20), p.128-141.

JARRIGE, P. A., (1993). Optimal Control of Water Distribution Networks. Technical Survey and Practical Applications, In: *Water Supply Systems State of the Art and Future Trends* by E. Cabrera and F. Martinez, Valencia, Spain, p. 319-329.

JOLLAND, G.; COHEN, G., (1980). Optimal Control of Water Distribution Network by two Multilevel Methods. *Water Resources Research*, Vol. 16, p. 83-88, New York, NY USA.

JOWITT, P.W., GERMANOPOULOS, G. (1992). Optimal Pump Scheduling in Water Supply Network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.118, n.4 July. P. 416-422.

JOWITT, P. W.; XU, C.; (1990). Optimal Valves Control in Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 116, N 4, p. 455-472, New York, NY, USA.

KADAR e BAMUDIM, (2001). Pipeline Network Modeling and Simulation for Intelligent Monitoring and control: a case Study of a Municipal Water Supply System. *Ind. Eng. Chem. Res.* V.37, p.1033-1044.

KLEMPOUS, R.; KOTOWSKI, J.; NIKODEN, J.; ULASIEWIEZ, J. (1997). Optimization Algorithms of Operative Control In Water Distribution Systems. *Journal*, 8(2), p. 149 – 172.

KO, S. K.; OH, M. H.; FONTANE, D.G. (1997). Multiobjective Analysis of Service – Water – Transmission Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 2, March, p. 79 – 83.

KOELE, E. (1992). Control Valves Inducing Oscillatory Flow in Hydraulic Networks. In: *The International Conference on Unsteady Flow and Fluid Transients*. Durhan, United Kingdom. Proceedings, v. 1, 15p.

LANNUZEL, P.; ORTOLANDO, L., (1989). Evaluation of Heuristic Program for Scheduling Treatment Plant Pumps. Journal of Water Resources Planning and Management ASCE, v.115, N° 4, p.457-471, New York, NY,USA 19.

LANSEY, K. E., (1989). Water Distribution System Design Under of Water Resources Planning and Management, ASCE v.115, n° 10, p. 1401-1419, New York, NY, USA.

LANSEY, K. E., AWUMAH, K., (1994). Optimal Pump Operations Considering Pump Switches. Journal of Water Resources Planning and management, ASCE, v. 120, N° 1, p.17-35, New York, NY, USA,

LANSEY, K. E.; MAYS, L. W., (1989). Optimization Model for Water Distribution System Design. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 115, N°5, p.630-645, New York, NY, USA, 1989.

LEON, C, MARTIN, S., ELENA, J. M., LUQUE, J. EXPLORE (2000). Hybrid Expert Systems for Water Networks Management. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 126, N° 2, p.65-74, New York , NY, USA.

LIPPAI, I.; HEANEY, J. P.; LAGUNA, M. (1999). Robust Water System Design With Commercial Intelligent Search Optimizers. Journal of Computing in Civil Engineering. Vol. 13, N 3, p. 135-143.

LITTLE, K. W., McCRODDEN, B. J., (1989). Minimization of Raw Water Pumping Cost Using MILP. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v.115, N° 4 p.511-522, New York, Ny, USA.

MACHADO, E. C. M. N.; SANTANA, C. W. S.; (2005). Brasileiro, E. V. Galvão, C. de O.; Brasileiro, F. V.; Otimização da operação de redes de adução de água utilizando algoritmos genéticos. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa - Brasil, CD-ROM.

MAIER, H. R, DANDY, G. C.; (2003). Use of artificial neural networks for modelling Ant Colony Optimization Algorithms (ACOAs). *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 121 n. 3, may, p.146 – 152.

MAYS, LW, YEOU-KOUNG, T. (1992) *Hydro systems Engineering and Management*, v. 129, n 5, September, p. 372 -379.

McCORMICK, G.; POWELL, R.S. (2003). Optimal Pump Scheduling in Water Supply Systems With Maximum Demand Charges. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, n 5, September, p. 372-379.

MORGAN, D. R.; GOULTER, I. C. (1985). Optimal Urban Water Distribution Design. *Water Resources Research*, v. 21. n. 5, may, p. 642-652.

NITIVATTANANON V.; SADOWSKI, C. E.; QUIMPO, R. G. (1996). Optimization of Water Supply System Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 122, N° 5, p. 374-384, New York, NY, USA.

ORMSBEE, L. E.; LANSEY. K. E (1994). Optimal Control of Water Supply Pumping Systems. *Journal of Water Resources Planning and Mangement*, v. 120, n. 2, March, p.237-252.

ORMSBEE , L. E.; REDDY, S.L.; (1995). Nonlinear Heuristic for Pump Operations. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, v. 121, N° 4. p. 302-309, New York, NY, USA.

ORMSBEE, L. E.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SHARP, W. W., (1989). Methodology for Improving Pump Operation Efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 115, n. 2, p. 148-164, New York, NY, USA.

ORMSBEE, L. E.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SHARP, W. W.; (1987). Techniques for Improving Energy Efficiency at Water Supply Pumping Stations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.113, N° 4, p.348-364, New York, NT, USA.

ORMSBEE, L.; KESSLER, A. (1990) Optimal Upgrading of Hydraulic-Network Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.116, N° 6 November, p. 784-802.

PEZESHK S.; HELWEG, O.J.; OLIVER, K. E. (1994) Optimal Operation of Ground-Water Supply Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, N°5, Sep/oct., p.573-586.

PEZESHK, S.; HELWEG, O.J (1996) Adaptive Search Optimization in Reducing Pump Operating Costs. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v, 122, N° 1 Jan/Feb, p.57-63.

PROCEL, (2003). PROGRAMA [DE] CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Economia de Energia e Redução de Demanda de Ponta, Brasília.

QUINDRY, G.E.; BRILL, E.D.; LIEBMAN, J.C. (1981) Optimization of Looped Water Distribution Systems. *Journal of The Environmental Engineering Division*, v. 107, n.EE4, August, p.665-679.

RIGHETTO, A. M. (2002). Operação de Sistemas Urbano de Distribuição de Água. In: Seminário – Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas. Anais. João Pessoa. Cd Rom. 16p.

SANTANA, G. C. (1999) Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, Campinas, 184 p.

SAKARYA, A.B.A.; MAYS, L.W. (2000). Optimal Operation of Water Distribution Pumps considering Water Quality. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, N° 4, July/ August, p.210-220.

SHAMIR, U. (1974). Optimal Design and Operation of Water Distribution Systems. *Water Resources Research*. V. 10, n.1. p. 27 – 36.

SHAMIR, U.; HOWARD, C.D.D., (1968). Water Distribution Systems Analysis. Journal of Hydraulic Division, ASCE, v. 94, N° 1, p. 219-234, New York, NY, USA.

SHINSTINE, D.S.; AHMED. L.; LANSEY, K. E. (2002). Reliability / Availability Analysis of Municipal Water Distribution Network: Case Studies. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 128, n.2. March. p. 140 – 151.

SU, Y.; MAYS, L. W.; DUAN, N.; LANSEY, K. E. (1987). Reliability – Based Optimization Model or Water Distribution Systems. Journal of Hydraulic Engineering, v. 114, n.12. December, p. 1539 – 1556.

TARQUIM, A. J.; DOWDY J. (1989). Optimal Pump Operation in Water distribution. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, v.115, N°2, p.158-168, New York, NY, USA.

TOLSON, B. A.; MAIER, H. R.; SIMPSON, A. R.; LENCE, B.J. (2004). Genetic Algorithms for Reability – Based optimization of Water Distribution Systems. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 130, n. 1 January, p. 63 – 72.

WALSKI T.M. (1993) Tips for Saving Energy in Pumping Operations. Journal AWWA – Management e Operations . July, p.49-53.

WALSKI, T. M. (2001). The Wrong Paradigm-Why Water Distribution Optimization Doesn't Work. Journal of Water Resouces Planning ND Management, v.122, N° 4, July, p.203-205.

WALTERS et al, (1999). Improved Design of “Anytown” Distribution Network Using Structured Messy Genetic Algorithms. Urban Water, v.1, p.23-38.

WOOD, D. J.; CHARLES, C.; (1972). Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory. Journal of Hydraulic Division. ASCE, v. 98, N°7, p.1157-1170, New York, NY, USA.

WU Z. (2002). Optimal Capacity Design of Water Distribution Systems. 2002 Conference on Water Resources Planning and Management. Roanoke, VA, USA. May. Proceedings, 10p.

XU, C.; GOULTER, I.C. (1999). Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, v.125, N° 6 November, p.352-362.

YEH, W. G. (1985). Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, v.125, N°6, November, p.352-362.

YU, G.; POWELL, R. S.; STERLING, M. J. H. (1994). Optimized Pump Scheduling in Water Distribution Systems. Journal of Optimization Theory and Application. V. 83, n.3, p. 463 – 488.

ZESSLER, U.; SHAMIR, U. (1989) Optimal Operation of Water Distribution Systems. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 115, N° 6, November, p. 735-752.

ZYL, J. F.; SAVIC, D.A.; WALTERS, G. A. (2004). Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 130, n. 2, March, p. 160 – 170.