

Alberto Adriano Sjöbom Júnior

*Previsão de nível de reservatórios e otimização
de bombeamento em sistemas de distribuição
de água*

Goiânia

Janeiro/2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Alberto Adriano Sjöbom Júnior

*Previsão de nível de reservatórios e otimização
de bombeamento em sistemas de distribuição
de água*

Dissertação apresentada à Coordenação do
Mestrado em Engenharia Elétrica e de Com-
putação da Universidade Federal de Goiás
para a obtenção do título de Mestre em En-
genharia da Computação.

Orientador:

Prof. Marco Antônio Assfalk de Oliveira

PROGRAMA DE MESTRADO
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DA COMPUTAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

Goiânia

Janeiro/2005

1. *A água faz parte do patrimônio do planeta. Cada continente, cada povo, cada nação, cada região, cada cidade, cada cidadão é plenamente responsável aos olhos de todos.*
2. *A água é a seiva do nosso planeta. Ela é a condição essencial de vida de todo ser vegetal, animal ou humano. Sem ela não poderíamos conceber como são a atmosfera, o clima, a vegetação, a cultura ou a agricultura. O direito à água é um dos direitos fundamentais do ser humano: o direito à vida, tal qual é estipulado no Art. 3º da Declaração Universal dos Direitos do Homem.*
3. *Os recursos naturais de transformação da água em água potável são lentos, frágeis e muito limitados. Assim sendo, a água deve ser manipulada com racionalidade, precaução e parcimônia.*
4. *Equilíbrio e o futuro do nosso planeta dependem da preservação da água e dos seus ciclos. Estes devem permanecer intactos e funcionando normalmente para garantir a continuidade da vida sobre a Terra. Este equilíbrio depende, em particular, da preservação dos mares e oceanos, por onde os ciclos começam.*
5. *A água não é somente uma herança dos nossos predecessores; ela é sobretudo um empréstimo aos nossos sucessores. Sua proteção constitui uma necessidade vital, assim como uma obrigação moral do homem para com as gerações presentes e futuras.*
6. *A água não é uma doação gratuita da natureza; ela tem um valor econômico: precisa-se saber que ela é, algumas vezes, rara e dispendiosa e que pode muito bem escassear em qualquer região do mundo.*
7. *A água não deve ser desperdiçada, nem poluída, nem envenenada. De maneira geral, sua utilização deve ser feita com consciência e discernimento para que não se chegue a uma situação de esgotamento ou de deterioração da qualidade das reservas atualmente disponíveis.*
8. *A utilização da água implica no respeito à lei. Sua proteção constitui uma obrigação jurídica para todo homem ou grupo social que a utiliza. Esta questão não deve ser ignorada nem pelo homem nem pelo Estado.*
9. *A gestão da água impõe um equilíbrio entre os imperativos de sua proteção e as necessidades de ordem econômica, sanitária e social.*
10. *Planejamento da gestão da água deve levar em conta a solidariedade e o consenso em razão de sua distribuição desigual sobre a Terra.”*

*Ao meu pai, à minha mãe, à Cláudia e ao Lincoln.
À minha esposa Maura e às minhas filhas Alexandra e Ingrid.*

Agradecimentos

- À direção da SANEAGO pela possibilidade dada de realizar este curso, nas pessoas do Diretor de Produção Geraldo de Almeida Ferreira (gestão passada), do atual Diretor de Produção Luiz Humberto Gonçalves Gomes, do Superintendente da SUDOIA Maurício Roriz de Paiva (gestão passada), do Superintendente da SUDOIA Temistócles Mendes Ribeiro, do Gerente da PGME Wagner Charles Gonzaga (gestão passada) e do Gerente da PGME Renato Milhomem de Oliveira.
- Ao meu orientador Prof. Ph.D. Marco Antônio Assfalk de Oliveira
- Aos colegas Marister, Augustinho, Ederson, Luiz Carlos, Eduardo Joaquim, Larterte, Emilson, Tinil, Carlos, Wander, Samuel, Alexandre, Cristiano, Davi, Edmar, Ronaldo, Toninho, Eliane Cristina, Gercino e Divino.
- Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que muito nos ajudou através da Seção de Observação Meteorológica Aplicada (SEOMA) do 10º Distrito Meteorológico (10º DISME GO/TO).
- E a todos amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Resumo

SJOBOM JÚNIOR, A.A. (2005) *Previsão de nível de reservatórios e otimização de bombeamento em sistemas de distribuição de água*. 98p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

No presente trabalho propomos um modelo computacional cujo objetivo é otimizar bombeamentos de sistemas de distribuição de água, minimizando custos com energia elétrica e aumentando a confiabilidade operacional. O modelo faz previsão de níveis de água em reservatórios das próximas 24 h através de redes neurais artificiais e otimização do bombeamento com uso de algoritmos genéticos. Uma parte do sistema de abastecimento de água de Goiânia é utilizada como estudo de caso. Os resultados obtidos são comparados com o histórico de operação do sistema estudado mostrando a possibilidade de uma economia significativa no custo da energia.

Palavras-chave: Sistema Distribuição de Água; Otimização; Previsão; Redes Neurais Artificiais; Algoritmos Genéticos.

Abstract

A computational model optimizing the pumping schedule of a water distribution system is proposed. The optimization minimizes electrical energy consumption and increases operational. The proposed model uses a neural network-based reservoir water level predictor, within a 24 h window, and a genetic algorithm for the optimization. The tested used is a subset of the water supply system of the city of Goiânia. The results obtained are compared to the actual system pumping data and indicate that a significant savings in energy consumption may be attained.

Keywords: water distribution system; optimization; forecasting; artificial neural networks; genetic algorithm.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Siglas e Abreviaturas

1	Introdução	p. 14
1.1	Justificativa	p. 16
1.2	Objetivos	p. 17
1.3	Organização do Texto	p. 17
2	Conceitos	p. 19
2.1	Sistemas de Abastecimento de Água	p. 19
2.1.1	Captação	p. 21
2.1.2	Adução	p. 22
2.1.3	Tratamento	p. 23
2.1.4	Reservação	p. 25
2.1.5	Distribuição	p. 26
2.1.6	Estações de Bombeamento	p. 27
2.2	Eficiência Energética	p. 29
2.3	Meteorologia	p. 34
2.4	Redes Neurais Artificiais	p. 35
2.4.1	Perceptron de Múltiplas Camadas	p. 38

Sumário

2.4.2	Mapas de Kohonen	p. 40
2.4.3	Rede de Funções de Base Radial (RBF)	p. 40
2.4.4	Outras Redes Neurais	p. 42
2.5	Algoritmos Genéticos	p. 43
2.5.1	Conceitos de Algoritmos Genéticos	p. 44
2.5.2	Operadores Genéticos	p. 45
2.5.3	Aplicações de Algoritmos Genéticos	p. 46
3	Modelo de Previsão	p. 48
3.1	Modelos de Previsão de Sistemas de Distribuição de Água	p. 49
3.2	Modelo de Previsão Proposto	p. 51
3.2.1	Variáveis do Sistema	p. 52
3.2.2	Ferramentas de Inteligência Artificial	p. 54
4	Modelo de Otimização	p. 55
4.1	Otimização de Sistemas de Distribuição de Água	p. 56
4.2	Modelo de Otimização Proposto	p. 58
5	Resultados	p. 61
5.1	Previsão de Níveis dos Reservatórios de Água	p. 61
5.1.1	Previsão de Nível Próxima Hora	p. 63
5.1.2	Previsão de Nível para as Próximas 24 Horas	p. 65
5.2	Otimização do Bombeamento	p. 66
5.2.1	Ferramenta de Algoritmo Genético	p. 66
5.2.2	Aplicação do Algoritmo Genético	p. 69
5.2.3	Bombeamento Otimizado	p. 70
6	Conclusão	p. 73

Sumário

Referências	p. 76
Apêndice A – Código do 'script' previsão de nível próximas 24 h	p. 80
Apêndice B – Código do 'script' execução AG	p. 85
Apêndice C – Código da função aptidão	p. 88
Anexo A – Exemplo de relatório operacional da Saneago	p. 90
Anexo B – Dados meteorológicos diários do INMET	p. 91
Anexo C – Exemplo de conta energia das 4 maiores elevatórias do SDA João Leite da Saneago obtidas do SGE	p. 95

Lista de Figuras

1	Necessidade de Investimentos (SNIS, 2002).	p. 15
2	Composição das Despesas dos Prestadores de Serviço de Saneamento (SNIS, 2002).	p. 16
3	Diagrama de Blocos do Sistema Especialista Desejado.	p. 17
4	Aqueduto Romano.	p. 20
5	Esquema de um SAA (MEDEIROS, 2004).	p. 21
6	Curva Adutora Vazão(Q) x Pressão(H) (MEDEIROS, 2004).	p. 23
7	Esquema de uma Estação de Tratamento de Água (MEDEIROS, 2004).	p. 24
8	Sifão.	p. 27
9	Parafuso de Arquimedes.	p. 27
10	Bomba Centrífuga (MEDEIROS, 2004).	p. 29
11	Curva Característica de uma Bomba Centrífuga (MEDEIROS, 2004).	p. 29
12	Associação de Duas Bombas Iguais (MEDEIROS, 2004).	p. 29
13	Sistema Brasileiro de Tarifação de Energia Elétrica (PROCEL, 2001).	p. 30
14	Neurônio Artificial.	p. 36
15	Funções de Ativação (KRÖSE; SMAGT, 1996).	p. 37
16	Rede neural Multicamada (KRÖSE; SMAGT, 1996).	p. 38
17	Kohonen SOM (KASABOV, 1998).	p. 40
18	Rede Neural Artificial de Função de Base Radial (RBF) (PRINCIPE, 2000).	p. 42
19	Características AG.	p. 44
20	Operadores Genéticos.	p. 45
21	Divisão do Sistema em Subredes.	p. 52

Lista de Figuras

22	Diagrama do Modelo de Previsão Proposto.	p. 52
23	Diagrama do Modelo de Otimização Proposto.	p. 60
24	Diagrama do SDA João Leite Simplificado - 4 Maiores Reservatórios. . .	p. 62
25	Previsão de Níveis das Próximas 24 Horas dos 4 Maiores Reservatórios do SDA João Leite, com Nível Inicial Tomado às 12 Horas do Dia 15/04/2002.	p. 67
26	Previsão de Níveis das Próximas 24 Horas dos 4 Maiores Reservatórios do SDA João Leite, com Nível Inicial Tomado às 18 Horas do Dia 21/04/2002.	p. 68
27	Cromossomo Representando as Unidades a Serem Otimizadas do SDA João Leite de Goiânia.	p. 69
28	Pesos da Função Objetivo por Horário.	p. 71
29	Bombeamento otimizado, para as próximas 25 h, do SDA João Leite, dia 18/04/2004 iniciando às 21 h.	p. 72
30	Nível dos reservatórios, com o bombeamento otimizado para as próximas 25 h, do SDA João Leite, dia 18/04/2004 iniciando às 21 h.	p. 72

Lista de Tabelas

1	Índice de Atendimento dos Serviços de Abastecimento de Água e Esgoto.	p. 14
2	Investimentos - 2002.	p. 15
3	Descontos e Reduções no Consumo e Demanda.	p. 30
4	Ítems de Faturamento por Tipo de Tarifa.	p. 31
5	Aplicação de Tarifas	p. 32
6	Algoritmo de Retropropagação do Erro(<i>Backpropagation</i>).	p. 39
7	Algoritmo SOM.	p. 41
8	Algoritmo RBF	p. 42
9	Algoritmo Genético Simples.	p. 46
10	Variáveis Condicionantes do Consumo de Água.	p. 53
11	Correlação Linear entre Unidades do SDA de Goiânia.	p. 63
12	Erros Conforme as Entradas da Rede Neural.	p. 64
13	Erros Conforme a Arquitetura da Rede Neural.	p. 65
14	Erros para a Arquitetura RBF.	p. 65
15	Erros de Previsão Próximas 24 Horas	p. 66
16	Erros de Previsão das Próximas 24 Horas e Níveis de Segurança.	p. 66
17	Resultados Otimização de 16 a 30 de Abril/2002.	p. 71
18	Dados Meteorológicos Diários do INMET.	p. 92

Lista de Siglas e Abreviaturas

EAT	Elevatória de água tratada
SAA	Sistema de abastecimento de água
SDA	Sistema de distribuição de água
AG	Algoritmos genéticos
RNA	Redes neurais artificiais
mca	Metro de coluna de água
IA	Inteligência artificial
MLP	Multilayer perceptron
RBF	Radial basis functions
SANEAGO	Saneamento de Goiás S/A
JL	João Leite
PL	Pedro Ludovico
MATLAB [®]	Matrix laboratory for windows
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MSE	<i>Mean square error</i> (erro médio quadrático)
MAPE	<i>Mean absolute percentage error</i> (erro médio percentual)
kWh	kilo Watt-hora
Elev.	Elevatória
Res.	Reservatório
SGE	Sistema de gestão energética da Saneago

1 *Introdução*

A água, um dos bens mais valiosos da humanidade, vem tomando cada vez mais a atenção da sociedade não só pela sua extrema necessidade mas também pelo mau uso que se fez dela durante séculos, colocando atualmente em risco a capacidade da natureza fornecer água potável para as atuais e futuras populações.

Dos setores de infra-estrutura o saneamento básico talvez seja aquele no qual a sociedade brasileira enfrenta um dos maiores desafios. Embora se tenha evoluído significativamente nas últimas décadas ainda há muito o que fazer, como pode ser constatado através da Tabela 1.

A Figura 1 ¹ mostra um estudo do SNIS (2002) que apresenta uma projeção do governo sobre as necessidades de investimentos em saneamento nos próximos 20 anos para se alcançar a universalização dos serviços, ou seja todas as pessoas terem acesso a ele. A quantia soma R\$ 170 bilhões (SNIS, 2002), com propostas de fontes de recursos diversas como União, Estados, Municípios e iniciativa privada. Ainda, conforme SNIS (2002) as próprias empresas do setor vêm investindo recursos próprios nos últimos anos (Tabela 2). Em 2002 foram aplicados mais de R\$ 1,3 bilhões na ampliação dos sistemas, mas claramente estes foram insuficientes diante das necessidades, mesmo porque dificilmente alguma corporação consegue expandir seus negócios sem financiamento.

Tabela 1: Índice de Atendimento dos Serviços de Abastecimento de Água e Esgoto.

Abrangência	Índice de atendimento urbano(%)		
	Água	Coleta de esgotos	Tratamento de esgotos gerados
Regional	90,4	38,6	31,6
Microregional	97,4	6,3	6,3
Local	96,7	76,2	18,1
Brasil	91,7	50,4	27,3

Fonte: SNIS (2002).

¹A abrangência dos prestadores de serviços: regional - compreende as 25 companhias estaduais e a autarquia estadual do Acre; microrregional - atendem a mais de um município, normalmente adjacentes e agrupados em uma pequena quantidade; local - serviços municipais públicos ou privados.

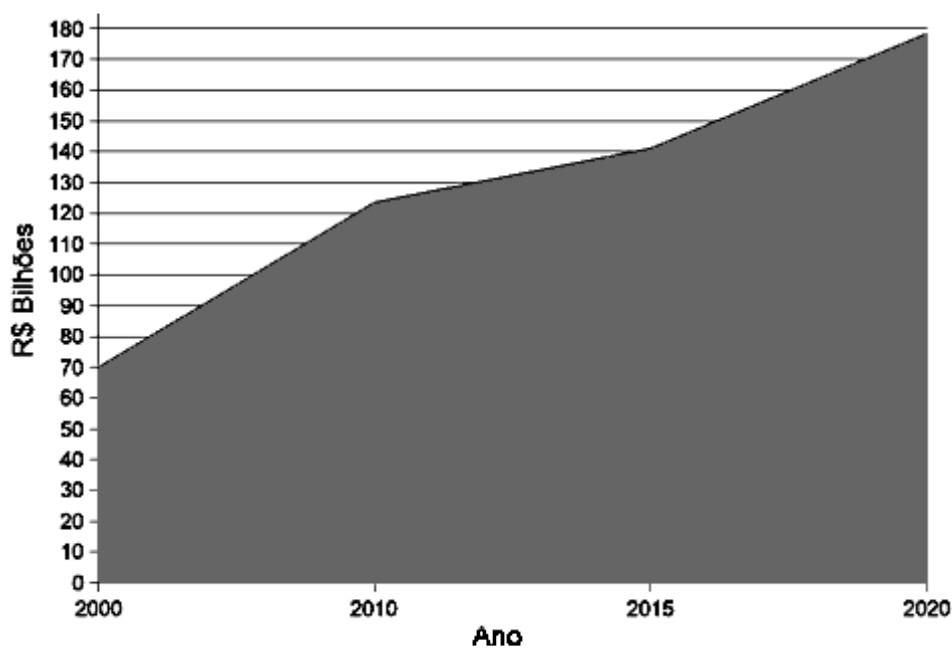


Figura 1: Necessidade de Investimentos (SNIS, 2002).

Tabela 2: Investimentos - 2002.

Região	Investimento(R\$ milhões)				Total
	Despesas Capitalizáveis	Recursos Próprios	Recursos Onerosos	Recursos não Onerosos	
Norte	9,2	23,2	28,8	66,2	127,5
Nordeste	30,2	92,8	121,0	263,6	507,6
Sudeste	152,6	966,3	222,1	13,8	1.355,7
Sul	56,2	189,8	234,2	47,1	526,9
Centro-Oeste	17,5	102,5	86,0	43,2	250,1
Brasil	265,7	1.374,7	692,2	433,9	2.767,9

Fonte: SNIS (2002).

Este quadro é agravado, pois é justamente nas populações mais carentes e nos estados mais pobres onde a deficiência de água tratada, esgotamento sanitário e coleta de lixo é maior. O desafio é grande pois são projetos geralmente de menor atratividade econômica e de custo principalmente social. Estas características pedem a sua execução pelo poder público através de seus recursos a fundo perdido ou por organizações que operam os sistemas através de subsídios de outras regiões mais rentáveis.

A otimização dos recursos aplicados em saneamento faz um sentido amplo: é justo para sociedade, pois utiliza melhor o que ela disponibilizou para tal, e uma melhoria social na medida em que otimizando uma atividade da empresa possibilitará se aplicar o que se economizou em expansão do atendimento de outras necessidades sociais.

1.1 Justificativa

A previsão de nível dos reservatórios dos sistemas de distribuição de água (SDA)² é uma função que ajuda significativamente no controle operacional. Leva a melhorias na confiabilidade, na segurança e permite reduzir custos (LEON et al., 2000).

A energia elétrica é um dos principais insumos nos processos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, representando até mais de 13% dos custos, como mostra a Figura 2.

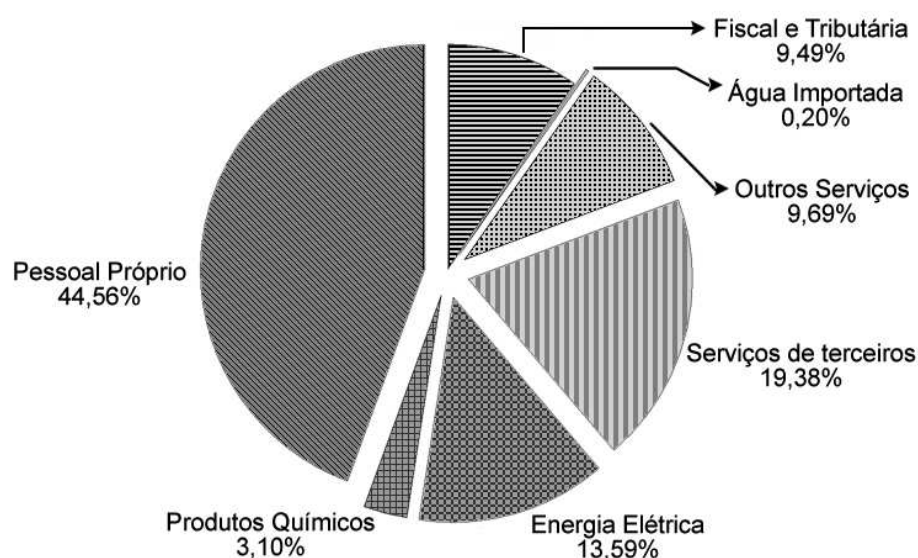


Figura 2: Composição das Despesas dos Prestadores de Serviço de Saneamento (SNIS, 2002).

Há muitas formas de minimizar os custos de energia, Oliveira e Lima (1999) apresentaram ganhos em correção de erros de faturamento, reclassificação de contas, correção de fator de potência, mudança de grupo tarifário e implantação de contratos de tarifas horo-sazonais. Este último, que no trabalho citado representa mais de 36% em economia do total obtido no caso da Saneago entre 1990 e 1994, é conseguido principalmente com a retirada das cargas do horário de ponta, onde a energia é mais cara (ver seção 2.2).

Esta retirada de carga pode ser processada por exemplo quando o sistema tem reserva com autonomia para ser paralisado durante algum período das 3 horas do horário de ponta e também quando há capacidade de produção para abastecer os reservatórios com água suficiente para aquele período. Mesmo quando a capacidade de produzir e armazenar não é suficiente para uma modulação tranqüila, há espaço para ganhos parciais.

²Em alguns locais do texto utilizamos também o termo Sistema de Abastecimento de Água (SAA) para uma referência genérica a todos componentes do mesmo.

Estes ganhos podem ser alcançados com um *sistema de previsão*, auxiliando o operador a decidir se é possível parar o bombeamento por algum tempo no horário de ponta, e, portanto, evitar o consumo de energia mais cara.

A partir da Resolução 264/98 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) o potencial de economia vem sendo ampliado com a possibilidade de se escolher, dentro de certos critérios, com qual geradora, comercializadora ou distribuidora de energia se irá fazer contrato . Como exemplo, citam-se os grandes consumidores de energia, como as empresas de saneamento, que comprariam energia mais barata num momento que fosse possível estocar água.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho propõe o uso de algoritmo genético para otimizar os custos dos bombeamentos de água de um SDA. Para tanto, propõe-se construir um previsor de níveis de reservatórios, empregando como modelo matemático uma rede neural artificial. O diagrama apresentado na figura 3 elucida o tipo de sistema especialista desejado, do qual este trabalho representa uma parte.

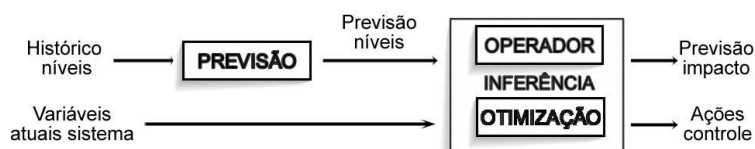


Figura 3: Diagrama de Blocos do Sistema Especialista Desejado.

1.3 Organização do Texto

No Capítulo 2 são apresentados alguns conceitos de sistema de abastecimento de água (SAA), eficiência energética, meteorologia, redes neurais e algoritmos genéticos que são utilizados no trabalho.

No Capítulo 3 é exposta a pesquisa bibliográfica sobre modelos de previsão, bem como o esboço do modelo proposto.

No Capítulo 4 são discutidos os modelos de otimização utilizados por vários autores em SAA e em outras áreas. E também propõe-se um modelo de otimização.

No Capítulo 5 são analisados os resultados obtidos tanto na previsão de nível para as próximas 24 h quanto na otimização do bombeamento do sistema de distribuição de água de Goiânia.

No Capítulo 6 é apresentada a conclusão e elaboram-se propostas para trabalhos futuros.

2 *Conceitos*

Este capítulo conceitua os vários componentes de um sistema de abastecimento de água, destacando suas funcionalidades, a eficiência energética com suas implicações sobre os SAA e os conceitos de meteorologia e climatologia que afetam o consumo de água. São apresentadas as ferramentas de inteligência artificial redes neurais e algoritmo genéticos.

2.1 **Sistemas de Abastecimento de Água**

A água é um elemento essencial à vida animal e vegetal, e compõe grande parte da superfície do planeta. A humanidade deve muito de seu progresso a ela, pois esta permite produzir mais alimentos através da irrigação, abastecer as comunidades, entre outros tantos usos.

Com o crescimento das comunidades humanas as soluções individuais (cisternas etc) tiveram que ser abandonadas, em favor de Sistemas de Abastecimento de Água (SAA). Há registros arqueológicos de canalizações para condução de água dos rios e lagos até as cidades desde a antiguidade (MEDEIROS, 2004). Posteriormente estas técnicas foram aperfeiçoadas pelos gregos e romanos, como visto na Figura 4 ¹, que mostra o *Le Pont Du Gard*, um aqueduto construído pelos romanos em aproximadamente 20 a.C., no sul da França, com extensão em torno de 50 km.

Os métodos de transportar e tratar a água evoluíram com os avanços tecnológicos. Hoje utiliza-se adutoras de aço, bombas com acionamento elétrico e tratamento com processos físico-químicos diversos, mas o fundamental ainda permanece: a água como fator de desenvolvimento e essencial à vida.

¹Avignon et Provence, <http://www.avignon-et-provence.com/pays/30-uzege/pont-gard/gb/>, acessado em 08/2004".



Figura 4: Aqueduto Romano.

Como conceituam Mays e Yeou-Koung (1992), o objetivo principal de um sistema de distribuição de água é suprir os usuários de água em quantidade suficiente às suas necessidades. Estas necessidades são de saúde, sociais, econômicas e outras mais.

Um sistema de abastecimento urbano de água deve funcionar ininterruptamente fornecendo água potável para que as seguintes perspectivas sejam alcançadas:

- Controle e prevenção de doenças;
- Melhores condições sanitárias (higienização intensificada e aprimoramento das tarefas de limpeza doméstica em geral);
- Conforto e segurança coletiva (limpeza pública e instalações anti-incêndio);
- Desenvolvimento de práticas recreativas e de esportes;
- Maior número de áreas ajardinadas, parques, etc;
- Desenvolvimento turístico, industrial e comercial.

(MEDEIROS, 2004)

Há várias soluções de engenharia para o abastecimento, conforme a abundância e características de água dos mananciais, as necessidades da comunidade, se de utilização doméstica, pública ou industrial, da topografia da região, da climatologia, dos aspectos sociais, econômicos e culturais da população. Entretanto, um sistema convencional, conforme Medeiros (2004), pode ser assim dividido:

- *Captação*: Estrutura para retirada da água do manancial abastecedor;
- *Adução*: Canalização de transporte da água entre as diversas unidades do sistema;
- *Tratamento*: Retirada das impurezas indesejáveis ao emprego final da água;
- *Reservação*: Armazenamento dos excessos de água para compensações de equilíbrio, de emergência ou acidental e anti-incêndio;
- *Distribuição*: Condução através de canalizações até os pontos de consumo;

Há também, as *Estações de Bombeamento* (EB), alternativamente chamadas de Estações Elevatórias de Água, utilizadas para transportar a água para um ponto mais alto.

A Figura 5 mostra um esquema básico de um SAA.

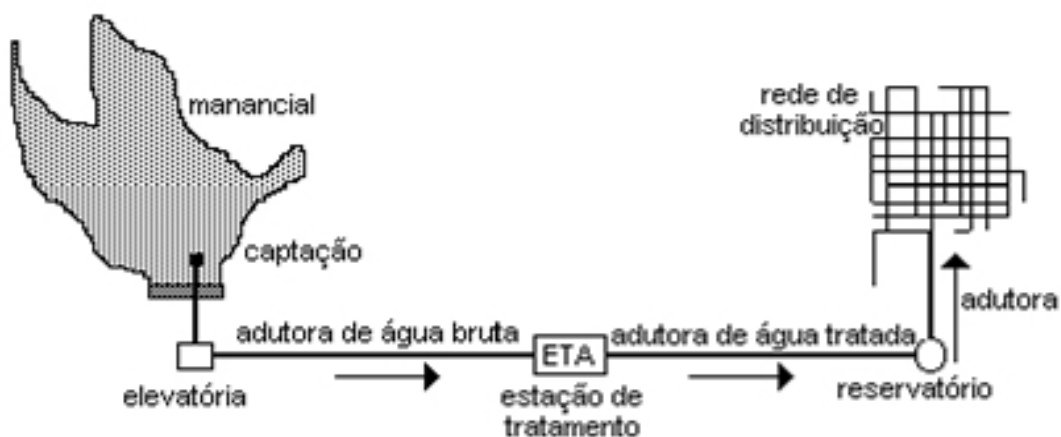


Figura 5: Esquema de um SAA (MEDEIROS, 2004).

2.1.1 Captação

A primeira unidade de um SAA é a captação, onde é obtida a matéria-prima principal: a água. Segundo Medeiros (2004) o homem possui dois tipos de fontes: as superficiais (rios, lagos etc.) e as subterrâneas. Embora as águas de superfície sejam de mais fácil captação, e portanto as preferidas, elas representam somente 5% da água doce do planeta, sendo o restante subterrâneo.

Duas condições básicas determinam a utilização de um manancial: a vazão mínima, em qualquer época do ano, deve ser superior ou igual à vazão demandada pela comunidade² (VIANA, 2001) e, em termos de qualidade, ser capaz de atender sem necessidade de tratamentos ou redução ao mínimo possível (MEDEIROS, 2004). Outros aspectos que são levados em consideração na escolha de um manancial são os econômicos, tanto quanto ao menor custo de implantação quanto ao custo de operação e manutenção, e a capacidade de atender o crescimento futuro da comunidade suprida.

²Hoje em dia há uma limitação quanto à vazão permitida de se derivar, definida pela outorga dos órgãos reguladores, visando o uso múltiplo

2.1.2 Adução

As adutoras são conjuntos de condutos que transportam água em um sistema de abastecimento, interligando por exemplo:

- Captação e estação de tratamento;
- Estação de tratamento e reservatório;
- Dois reservatórios;
- Reservatório e rede de distribuição.

Podem ser classificadas como sendo (VIANA, 2001):

- Adutoras por gravidade, que usam energia potencial para escoar água;
- Adutoras por recalque, que utilizam bombas;
- Adutoras mistas.

Para o dimensionamento das adutoras, consideram-se a vazão a ser atendida, a existência ou não de reservatório a jusante, o regime contínuo ou não de adução e o tipo de escoamento, livre ou forçado.

No escoamento do líquido pelos condutos há dissipação de energia, principalmente na forma de calor. Esta perda de carga (NETTO; ALVAREZ, 1982), é de extrema importância na eficiência energética dos bombeamentos. Estas perdas podem ser (NETTO; ALVAREZ, 1982):

- *Perda ao longo das canalizações*, ocasionada pelo movimento da água na própria tubulação;
- *Perdas localizadas*, provocadas pela turbulência do fluido nas peças especiais e demais singularidades (Tê, curva, válvula etc).

A Figura 6 mostra a curva das alturas manométricas³ para uma determinada adutora, que pode ser obtido pela equação $H_{man} = h_g + h_f$, onde H_{man} é altura manométrica, h_g desnível geométrico e h_f perda de carga⁴.

³Altura manométrica total é a soma das alturas geométricas de elevação com as perdas de cargas localizadas e as perdas ao longo da tubulação (VIANA, 2001).

⁴Dissipação de energia, principalmente na forma de calor, de um líquido ao escoar por uma tubulação.

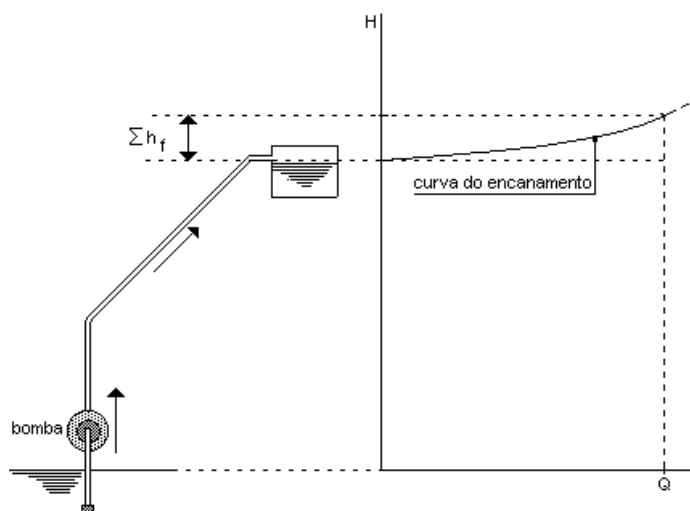


Figura 6: Curva Adutora Vazão(Q) x Pressão(H) (MEDEIROS, 2004).

2.1.3 Tratamento

Muitos mananciais, mesmo não tendo água potável⁵, são utilizados por ser a única opção disponível ou a mais viável economicamente. Nestes casos, exige-se uma etapa de tratamento para obter-se água com as características necessárias para abastecimento público, como define Medeiros (2004):

Classicamente quando se define o tratamento de água descreve-se como uma seqüência de operações que conjuntamente consistem em melhorar suas características organolépticas, físicas, químicas e bacteriológicas, a fim de que se torne adequada ao consumo humano. (MEDEIROS, 2004)

Numa estação de tratamento convencional destacam-se os seguintes processos:

- *Gradeamento*, remove folhas, galhos etc.;
- *Aeração*, remove substâncias em suspensão e gases dissolvidos;
- *Floculação*, forma flocos sedimentáveis através do emprego de coagulantes;
- *Decantação*, remove substâncias em solução;
- *Filtração*, remove substâncias em suspensão ou solução;
- *Desinfecção*, remove bactérias e microorganismos;

⁵Portaria 518/2004 da ANVISA, Anexo, Art. 4º, define: I- água potável - água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde.

Adicionalmente, quando necessário, há processos auxiliares para remoção de odor, sabor, dureza e outras substâncias químicas e biológicas.

A Figura 7 mostra, esquematicamente, a planta de uma estação de tratamento .

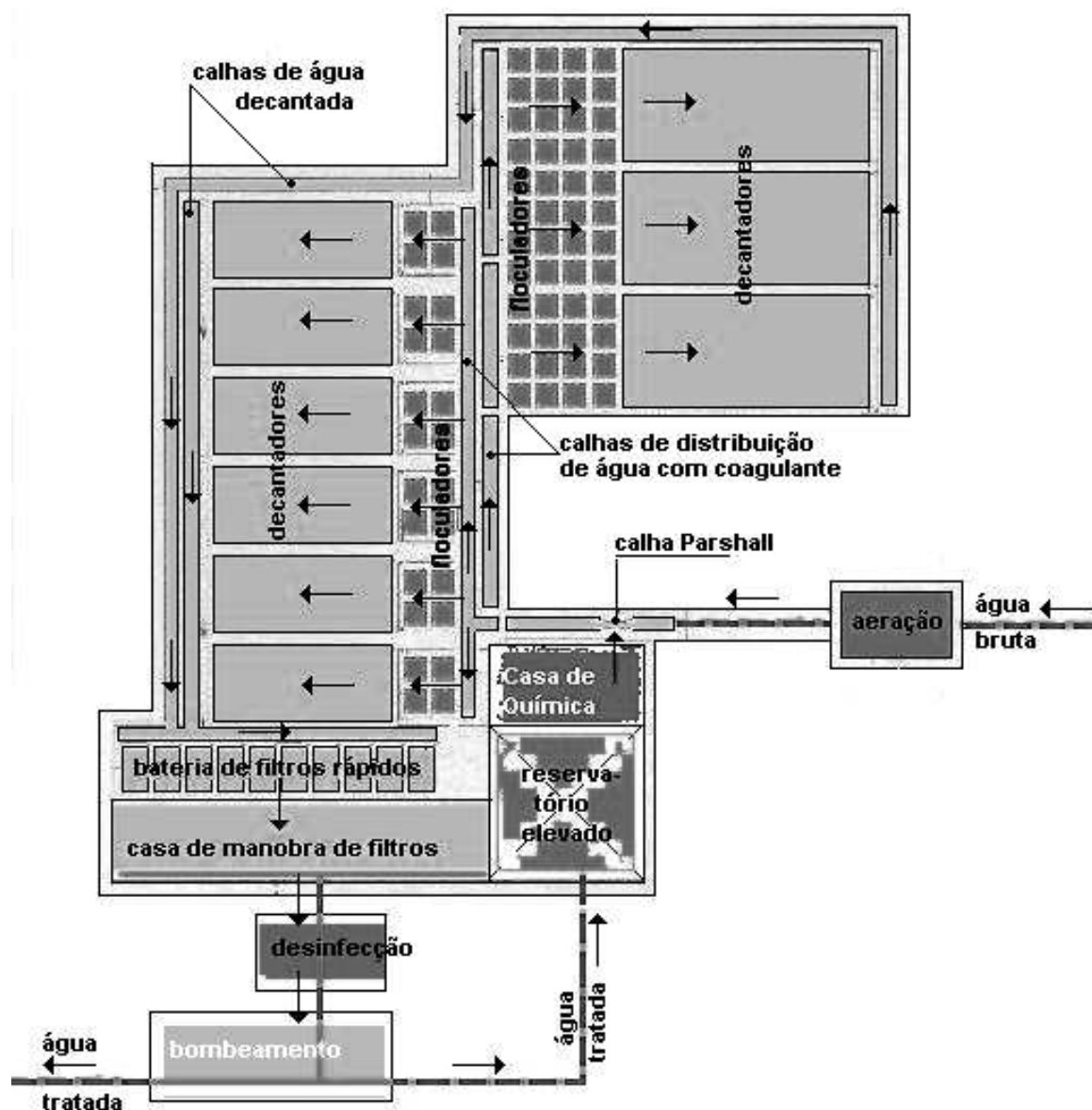


Figura 7: Esquema de uma Estação de Tratamento de Água (MEDEIROS, 2004).

Com o processo de tratamento atingem-se as finalidades básicas que, segundo Medeiros (2004), são:

- *Higiênicas* - Eliminação ou redução de bactérias, substâncias venenosas, mineralização excessiva, teor excessivo de matéria orgânica, algas, protozoários e outros microrganismos;

- *Estéticas* - Remoção ou redução de cor, turbidez, dureza, odor e sabor;
- *Econômicas* - Remoção ou redução de dureza, corrosividade, cor, turbidez, odor, sabor, ferro, manganês, etc.

2.1.4 Reservação

Reservatórios dão flexibilidade aos sistemas de abastecimento pois permitem a interrupção da produção por horas, o emprego de estações de bombeamento mais variadas, adutoras mais econômicas e pressões mais estabilizadas. Por outro lado, apresentam alto custo de implantação e necessitam de manutenção freqüente. Caso estas manutenções não sejam realizadas, principalmente a limpeza interna, há o aumento do consumo do agente de desinfecção (geralmente o cloro).

Esta característica dá uma latência ao sistema que abre amplas possibilidades para o controle operacional, uma vantagem sobre outros sistemas de resposta mais rápida como o sistema de abastecimento de energia elétrica.

Os reservatórios são unidades hidráulicas de acumulação e passagem de água situados em pontos estratégicos do sistema de modo a atenderem as seguintes situações:

- Garantia da quantidade de água (demandas de equilíbrio, de emergência e de antiincêndio);
- Garantia de adução com vazão e altura manométrica constantes;
- Menores diâmetros no sistema;
- Melhores condições de pressão.

(MEDEIROS, 2004).

Os reservatórios podem ter várias classificações: enterrado, apoiado, elevado, de montante, de jusante, para atender variações de consumo, para atender demandas de emergência, etc.

Uma das funções da capacidade volumétrica do reservatório é atender a reserva de equilíbrio, ou seja:

É assim denominada porque é acumulada nas horas de menor consumo para compensação nas de maior demanda, ou seja, como o consumo é flutuante e a vazão de adução é constante, principalmente nas aduções por recalque, nas horas em que o consumo for inferior a demanda o reservatório enche para que nas horas onde o consumo na rede for maior o volume acumulado anteriormente compense o deficit em relação a vazão que entra (MEDEIROS, 2004).

O reservatório deve ter capacidade para fornecer água armazenada nos períodos de maior demanda, de acordo com Viana (2001), esta demanda pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$Q_h = c_p \cdot h \quad (2.1)$$

onde Q_h é o consumo médio, c_p o consumo per capita, h o número de habitantes.

Medeiros (2004) sugere que:

A determinação desta população, dois são os problemas que se apresentam como de maior importância: população futura e densidade populacional. A determinação da população futura é essencial, pois não se deve projetar um sistema para beneficiar apenas a população atual de uma cidade com tendência de crescimento contínuo. Esse procedimento, muito provavelmente, inviabilizaria o sistema logo após sua implantação por problemas de sub-dimensionamento.

Normalmente um SAA é implantado já com reservação e vazão de sobra permitindo grande flexibilidade para desligar os equipamentos elétricos nos horários de maior custo de energia elétrica.

2.1.5 Distribuição

A rede de distribuição é composta por tubulações vindas geralmente dos reservatórios passando pelas ruas chegando às portas dos consumidores. Chama-se de sistema de distribuição o conjunto formado pelos reservatórios e rede de distribuição, sub-adutoras e elevatórias (MEDEIROS, 2004).

As redes de distribuição são compostas por tubulações principais e secundárias, visando dar maior flexibilidade à operação e à manutenção das mesmas. Podem ser malhadas em grandes regiões e somente ramificadas nas pequenas. As primeiras são preferidas por distribuírem melhor as pressões e fornecerem caminhos alternativos para abastecimento, mas são de maior custo de implantação.

2.1.6 Estações de Bombeamento

Sempre foi preocupação dos homens o transporte de água dos locais naturais onde ela se encontra até o seu ponto de utilização. De maneira rudimentar iniciou-se o processo, seja usando-se força humana, seja usando-se a força animal, dentro dos limites de distância que essas mesmas forças podiam alcançar (VIANA, 2001).

As figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, um sifão utilizado no Egito por volta de 2500 A.C. e o bombeamento usado em Ausburgo na Alemanha em 1550 ⁶:

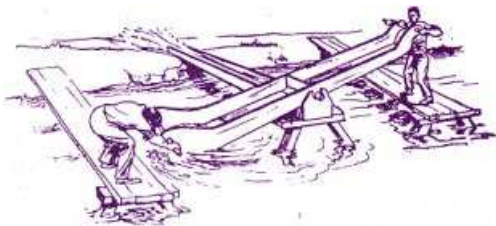


Figura 8: Sifão.

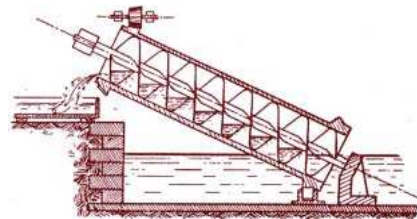


Figura 9: Parafuso de Arquimedes.

De acordo com o Hydraulic Institute (USA) as bombas se classificam em (VIANA, 2001):

- *Cinéticas*, em que a água recebe energia na forma de velocidade;
- *De deslocamento direto*, em que a água recebe energia de pressão.

As bombas mais utilizadas em SAA são as centrífugas, um tipo de bomba cinética inventada por Denis Papin em 1889. Estas podem ser classificadas, (VIANA, 2001) e (MEDEIROS, 2004), quanto a(o):

- Altura manométrica (baixa pressão - $H < 15$ mca, média pressão - $15 < H < 50$ mca, alta pressão - $H > 50$ mca);
- Vazão de recalque (pequena - $Q < 50$ m³/h, média - $50 < Q < 500$ m³/hora, grande - $Q > 500$ m³/h);
- Direção do escoamento do líquido no interior da bomba (radial - movimento do líquido na direção normal ao eixo da bomba, mista - movimento do líquido na direção inclinada ao eixo da bomba, axial - escoamento de forma paralela ao eixo);
- Tipo de rotor (aberto, semi-aberto e fechado);

⁶EMARP, História da Água, <http://www.emarp.pt/ambiente/livroagua/historiacronologia/historiacronologia.php>, acessado em 09/2004.

- Número de rotores (um estágio, múltiplos-estágios);
- Velocidade de rotação (baixa - $N < 500 \text{ rpm}$, média - $500 < N < 1800 \text{ rpm}$, alta - $N > 1800 \text{ rpm}$);
- Posição do eixo (vertical, horizontal);
- Posição captação (submersa, afogada);
- Tipo de carcaça (compacta, bipartida);

A Figura 10 ilustra as características de uma bomba centrífuga. A água é admitida pelo centro de um rotor. Este é acionado por um motor elétrico, expulsando a água em direção centrífuga, até o bocal de saída.

A potência elétrica solicitada da rede elétrica é dada pela fórmula:

$$P_e = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H}{75 \cdot \eta_b \cdot \eta_m} \quad (2.2)$$

onde Q é a vazão em l/s, γ o peso específico do líquido, H a altura manométrica, η_b o rendimento da bomba e η_m o rendimento do motor.

Quando se varia a rotação da bomba para se obter uma vazão variável, através de inversor de frequência, tem-se as relações (VIANA, 2001):

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{N}{N_1}; \frac{H}{H_1} = \frac{N^2}{(N_1)^2}; \frac{P}{P_1} = \frac{N^3}{(N_1)^3}; \quad (2.3)$$

sendo Q a vazão, N a rotação e P a pressão.

Como a bomba pode trabalhar numa ampla faixa de vazões e alturas manométricas é feita uma representação gráfica (curva característica) destes pontos de trabalho, como pode ser visto na Figura 11.

Quando se quer mais pressão ou vazão com um mesmo tipo de bomba, seja por razões de flexibilidade ou necessidade, podem-se associar as bombas em paralelo ou série (Figura 12). É bom salientar que nestes casos as bombas individualmente podem não estar mais no mesmo ponto de trabalho, modificando assim o seu *rendimento*.

Numa estação de bombeamento podem existir alguns dispositivos complementares tais como: crivo, válvula de pé, dispositivo para escorva, válvula anti-golpe etc.

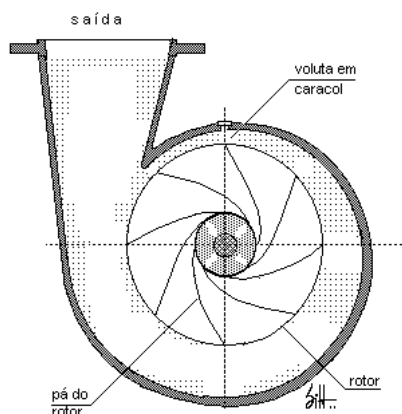


Figura 10: Bomba Centrífuga (MEDEIROS, 2004).

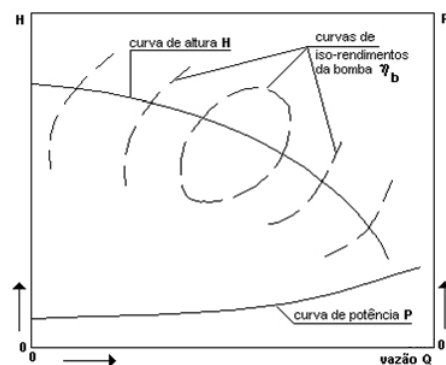


Figura 11: Curva Característica de uma Bomba Centrífuga (MEDEIROS, 2004).

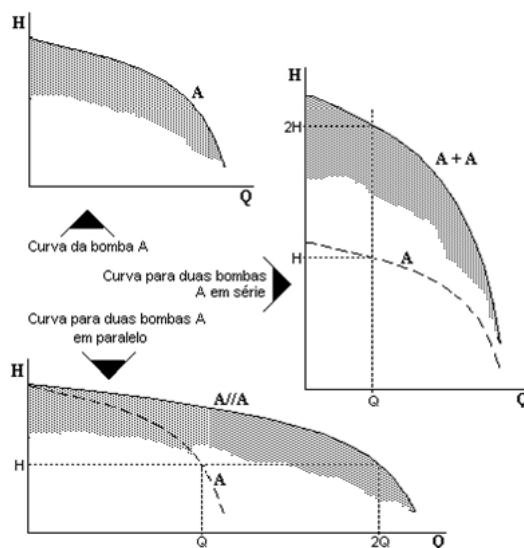


Figura 12: Associação de Duas Bombas Iguais (MEDEIROS, 2004).

2.2 Eficiência Energética

O termo Eficiência Energética é uma evolução do que já se chamou de Conservação de Energia, Gestão Energética etc. Trata-se do esforço que empresas e pessoas realizam para utilizarem melhor as fontes de energia disponíveis na natureza.

Segundo o PROCEL (2001):

O combate ao desperdício de energia elétrica deve ser entendido como a utilização do menor consumo energético possível tanto na produção como na prestação de serviços, sem que isso prejudique a qualidade, conforto e eficiência.

O setor de saneamento representa 2,3% (6.471 GWh/ano) do consumo total de energia elétrica do país (PROCEL, 2001). E, no mundo, 7%⁷ da energia total (7.620 TWh)⁸ (JAMES; CAMPBELL; GODLOVE, 2002). O consumo ocorre principalmente nos motores elétricos dos bombeamentos, localizados nas captações e nas estações de bombeamento, além do tratamento. Nas unidades administrativas o consumo é pequeno: menos de 5% do total.

Para os sistemas de saneamento os gastos com energia elétrica chegam em média a 13,59% dos custos de exploração (SNIS, 2002). Está entre as maiores despesas, ficando geralmente atrás somente dos gastos com pessoal e serviço da dívida.

O sistema brasileiro de tarifas de energia elétrica divide os consumidores conforme a classe de tensão, a demanda e a utilização. A Figura 13 mostra a estruturação.

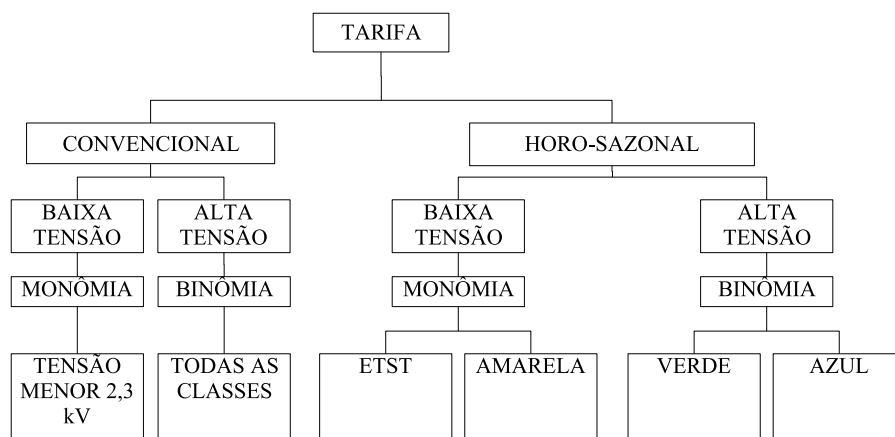


Figura 13: Sistema Brasileiro de Tarifação de Energia Elétrica (PROCEL, 2001).

As tabelas 3, 4 e 5 resumem a aplicação das tarifas ⁹.

Tabela 3: Descontos e Reduções no Consumo e Demanda.

Classes	Tensão	(%)
Rural cooperativa	Alta tensão	50
Rural demais	Alta tensão	10
Água, esgoto, saneamento	Alta tensão	15
Água, esgoto, saneamento	Baixa tensão	15

Fonte: (PROCEL, 2001).

⁷Como se pode notar, há uma tendência de aumentar a participação do setor de saneamento no consumo de energia do país na medida em que os padrões de consumo e conforto da sociedade brasileira aumentarem.

⁸No original citado o valor era expresso BTU, sendo igual a 26×10^{15} BTU.

⁹Tarifa monômnia é a tarifa aplicada unicamente ao consumo de energia elétrica ativa; tarifa binômnia é a tarifa aplicada ao consumo de energia elétrica ativa e demanda faturável; ETST é energia temporária para substituição.

Tabela 4: Ítems de Faturamento por Tipo de Tarifa.

Tarifa		Valores a serem faturados			
		Consumo	Demanda	Ultrapassagem	Fator de potência
Grupo A A1, A2, A3, A3a, A4, AS	Tarifa Convencional	Total medido no mês	Maior valor entre: . demanda contratada . demanda registrada . 85% da maior demanda registrada nos últimos 11 meses		Acréscimo na fatura caso o fator de potência indutivo e capacitivo médio situe-se abaixo de 0,92
	Tarifa Azul	Diferenciado entre: . Períodos do ano: seco ou úmido . Períodos do dia: ponta e fora de ponta	Diferenciado entre: . Períodos do ano: seco ou úmido . Para os horários entre ponta e fora de ponta, maior valor entre demanda registrada e demanda contratada	Aplicável quando a demanda registrada superar a contratada em: . 5% para unidades ligadas em tensão superior a 69 kV . 10% para unidades ligadas em tensão inferior a 69 kV com demanda contratada superior a 100 kW . 20% para unidades com demanda contratada de 50 kW até 100 kW	Acréscimo na fatura caso o fator de potência indutivo e capacitivo médio situe-se abaixo de 0,92
	Tarifa Verde	Diferenciado entre: . Períodos do ano: seco ou úmido . Períodos do dia: ponta e fora de ponta	Diferenciado entre: . Períodos do ano: seco ou úmido . Maior valor entre: demanda contratada e demanda registrada	Aplicável quando a demanda registrada superar a contratada em: . 10% para unidades com demanda contratada superior a 100 kW . 20% para unidades com demanda contratada de 50 kW até 100 kW	Acréscimo na fatura caso o fator de potência indutivo e capacitivo médio situe-se abaixo de 0,92
Grupo B B1, B2, B3, B4, B4a, B4b, B4c	Convencional	Total medido no mês			Acréscimo na fatura caso o fator de potência indutivo e capacitivo médio situe-se abaixo de 0,92

Fonte: (PROCEL, 2001).

Em saneamento, a busca pela eficiência energética passa por vários caminhos, desde a concepção, projeto, obra, operação e manutenção. Praticamente todas as concessionárias dos serviços de saneamento tem um programa de eficiência energética pois é uma preocupação antiga do setor, contando com vários esforços nas associações (AESBE, AS-SEMAE¹⁰) e trabalhos em congressos (ABES¹¹), nas seguintes áreas:

¹⁰Associação das Empresas de Saneamento Básico Estaduais e Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento, respectivamente.

¹¹Associação Brasileira de Engenharia Sanitária.

Tabela 5: Aplicação de Tarifas

<p>Tarifa Azul Obrigatório para unidades consumidoras com tensão fornecimento maior que 69kV.</p> <p>Tarifa Azul / Verde Opcional para A3a, A4, AS, com demanda maior ou igual a 300 kW[†] ou 3 registros maiores ou iguais a 300 kW nos últimos meses.</p> <p>Tarifa Azul / Verde / Convencional Opcional para A3a, A4, AS, com demanda menor ou igual a 300 kW[†] e maior que 50 kW.</p> <p>Obs: Para uma mesma utilização, o custo de energia elétrica é tanto menor quanto mais alta for a tensão de atendimento.</p>

Fonte: (PROCEL, 2001).

[†] Valor anterior era de 500 kW, em 2000 foi alterado pela Resolução ANEEL n° 456, artigo 53.

- Como principal consumidor de energia, as bombas e associadas estas as adutoras devem ter um dimensionamento econômico não só de implantação mas também dentro da sua vida útil;
- Manutenção dos equipamentos nas suas melhores características de desempenho, recondicionando quando necessário;
- Capacidade dos reservatórios suficiente para uma parada de 3 horas no horário de ponta ¹²;
- Controle de reativos;
- Contratos otimizados de demanda e grupo tarifário;
- Cargas moduladas para se atingir o melhor fator de carga¹³;
- Inversores de frequência substituem com vantagem qualquer meio dissipativo de controle de vazão em bombeamentos;
- Automação que permite maior controle sobre o sistema, eliminando as extravasões em reservatórios e melhorando o controle de níveis e bombeamentos;
- Medição e monitoramento da água e energia, conforme James, Campbell e Godlove (2002):

¹²Horário das 18 às 21 horas, no caso de Goiás, quando a energia é mais cara.

¹³Fator de carga - $Fc\% = \frac{\text{consumo}(kWh)}{730\text{horas} \times \text{demandaregistrada}(kW)} \times 100$.

Um sistema de medição e monitoramento precisa dar subsídios à equipe de eficiência de água e energia, a qual deve ter conhecimento dos problemas e gargalos do sistema, identificando as causas e tomando ações corretivas. O sistema de medição e monitoramento, sozinho, tem possibilitado que muitas organizações reduzam o consumo de energia em 10%.

- Controle das perdas de água.

As perdas de água apresentam valores altos no Brasil, média de 40,5% (SNIS, 2002), e possuem dois componentes:

Perdas físicas originam-se de vazamentos no sistema, envolvendo a captação, adução de água bruta, tratamento, reservação, adução de água tratada e a distribuição, lavagem de filtros e descargas de rede (PNDCA, 2003);

Perdas não-físicas originam-se de ligações clandestinas ou não cadastradas, hidrômetros parados ou que medem abaixo do real, fraudes em hidrômetros e outros (PNDCA, 2003).

Kurokawa (2001) apresentou um estudo de um bairro de Goiânia e identificou como causa das perdas: 49,6% submedição, 22,9% pressão alta (vazamentos), 20,4% comerciais e 8,0% não identificadas; portanto 22,9% perdas físicas, 69,1% perdas não-físicas e 8,0% não identificadas¹⁴.

Os indicadores que melhor refletem um ganho de eficiência energética no sistemas são:

Índice de Consumo Específico - Expresso em kWh/m^3 , estabelece a relação entre energia consumida e quantidade de água produzida ou de esgoto tratado no período;

Índice de Custo Específico - Expresso em $R\$/m^3$, estabelece a relação entre o custo da energia e a quantidade de água produzida ou o esgoto tratado no período;

¹⁴Os percentuais apresentados são do original do trabalho.

2.3 Meteorologia

O clima tem grande influência nas atividades humanas desde o surgimento das primeiras civilizações que dependiam de chuvas e cheias de rios para suas plantações. Hoje o homem consegue modificar a natureza em muitos aspectos, mas ainda precisa se adaptar às condições climáticas que moldam seu comportamento significativamente. Intuitivamente, observa-se o impacto da meteorologia no consumo humano de água. O abastecimento público é dirigido pelas estações do ano e pelas variações diárias do tempo. Abaixo listam-se alguns conceitos nas áreas de meteorologia e climatologia:

Tempo é o estado físico das condições atmosféricas em determinado momento e local.

Isto é, a influência do estado físico da atmosfera sobre a vida e as atividades do homem (INMET, 2004);

Clima é o estudo médio do tempo para determinado período ou mês em uma certa localidade. Também se refere às características da atmosfera inseridas das observações contínuas durante um certo período (INMET, 2004);

Meteorologia é a ciência que estuda as condições e o comportamento físico da atmosfera (INMET, 2004);

Climatologia é uma sub-área da meteorologia que estuda o comportamento médio da atmosfera para um determinado período, através de métodos estatísticos (INMET, 2004);

Insolação representa o número de horas nas quais, durante um dia, o disco solar é visível para um observador situado à superfície terrestre, em local com horizonte desobstruído (VAREJÃO-SILVA, 2001);

Temperatura máxima e mínima são a mais elevada e mais baixa temperatura, respectivamente, observadas em um dado intervalo de tempo (que constituem as temperaturas extremas desse mesmo intervalo). Quando o intervalo é 24 horas tem-se apenas uma temperatura máxima e uma mínima. Em se tratando de períodos maiores (geralmente um mês, um ano etc.) usam-se as expressões *máxima absoluta* e *mínima absoluta* (VAREJÃO-SILVA, 2001);

Temperatura compensada é a temperatura média diária do ar, calculada por:

$$t = (2t_{00} + t_{12} + t_X + t_N)/5, \quad (2.4)$$

onde t_{00} e t_{12} referem-se, respectivamente, às temperaturas observadas às 00 e às 12 TMG¹⁵, t_X traduz a temperatura máxima do dia em questão e t_N especifica a temperatura mínima desse mesmo dia;

Umidade do ar é a quantidade de vapor de água contida na atmosfera (INMET, 2004);

Umidade relativa do ar úmido, submetido a uma determinada temperatura (t), é o quociente entre a pressão parcial do vapor e a pressão de saturação àquela temperatura, o instrumento que mede a umidade do ar é o higrômetro (VAREJÃO-SILVA, 2001);

Vento, é a componente horizontal do vetor velocidade do ar (INMET, 2004);

Direção do vento exprime a posição do horizonte aparente do observador a partir da qual o vento parece provir (ou seja: de onde o vento sopra) e nunca para onde o vento estaria indo. A direção é expressa em termos do azimute isto é, do ângulo que o vetor velocidade do vento forma com o norte geográfico local (0°), sendo medido no sentido horário (VAREJÃO-SILVA, 2001);

Nebulosidade é denominada à fração da abóboda celeste que, em dado momento, encontra-se encoberta por nuvens (VAREJÃO-SILVA, 2001);

Precipitação, consideram-se todas as formas de água, líquida ou sólida, que caem das nuvens alcançando o solo: garoa, garoa gelada, chuva fria, granizo, cristais de gelo, bolas de gelo, chuva, neve, bolas de neve e partículas de neve (INMET, 2004). É ainda caracterizada por sua duração (diferença de tempo entre os instantes de início e término) e por sua intensidade, definida como a quantidade de água caída por unidade de tempo e usualmente expressa em $mm \times h^{-1}$ (VAREJÃO-SILVA, 2001).

2.4 Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) apresentam-se como uma opção factível para previsão, em função disso alguns conceitos fundamentais são apresentados na seqüência.

¹⁵UTC (Universal Time Coordinated) ou GMT/TMG (Greenwich Mean Time) equivalente ao horário de Londres.

Os mistérios e a capacidade do cérebro realizar tarefas complexas em frações de segundos serviram de inspiração para muitos cientistas perseguirem a construção de um modelo que se aproximasse dele. Em 1943 McCulloch formulou o que é considerado a primeira referência em redes neurais artificiais (RNA) (KOVACS, 1996). O neurônio artificial proposto era simples, com entradas binárias excitatórias ou inibitórias que somadas ponderadamente obtinham a saída.

Rosenblatt, no final dos anos 50, aperfeiçoou as idéias de McCulloch criando genuínas redes de múltiplos neurônios, os perceptrons, e com o princípio de aprendizado de Hebb, para neurônios, conseguiu ampliar a aplicabilidade como discriminador linear. Paralelamente, Widrow desenvolveu um modelo neural linear, ADALINE e MADALINE, que contribuiu muito com o princípio de treinamento chamado Regra Delta. Este avanço, porém, foi paralisado por mais de uma década após a publicação do artigo de Minsky e Pappert em 1969 que negava a capacidade dos perceptrons implementar a operação ou exclusivo (KOVACS, 1996), vindo ser retomado somente na década de 80.

A Figura 14 ¹⁶ mostra um neurônio artificial, onde são vistos as entradas excitatórias u_j , os pesos sinápticos w_j , o somatório das entradas a , a função de ativação f e a saída x :

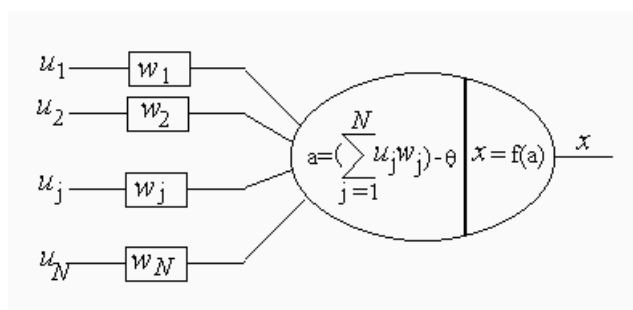


Figura 14: Neurônio Artificial.

As redes neurais tem características importantes que trazem benefícios no seu uso (HAYKIN, 2002):

- *Não-linearidade;*
- *Mapeamento de entrada-saída;*
- *Adaptabilidade;*
- *Resposta a evidências;*

¹⁶Halici, Ugur. Introduction to Neural Network, <http://www.ii.metu.edu.tr/ion526/demo/chapter1/section1.2/>, acessado em 09/2004.

- *Informação contextual;*
- *Tolerância a falhas;*
- *Uniformidade.*

Para a função de ativação do neurônio pode-se usar vários tipos de funções, dependendo da aplicação: lineares, não-lineares e estocásticas. A mais utilizada é a sigmóide por ser simétrica e derivável. A Figura 15 apresenta algumas funções.

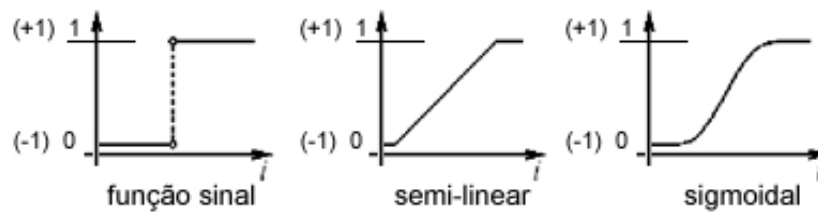


Figura 15: Funções de Ativação (KRÖSE; SMAGT, 1996).

Em uma RNA os neurônios podem ser organizados de forma variada, formando arquiteturas ou topologias diferentes, conforme o número de camadas, a forma de treinamento e a ligação entre os neurônios. Estas redes podem ser:

- *Redes com única camada;*
- *Rede com várias camadas*, também chamadas multi-camadas ou *multi-layer perceptron* (MLP);
- *Redes alimentadas adiante*, ou diretas, são redes em que a ativação segue da entrada para saída sem nenhum retorno;
- *Redes recorrentes*, ou com ciclos, possuem pelo menos um laço de realimentação.

A Figura 16 mostra um *multi-layer perceptron*, onde tem-se a camada de entrada com os neurônios N_i , as ligações entre os neurônios que são os pesos sinápticos, os neurônios das camadas internas $N_{h,n}$ e a camada de saída com os neurônios N_o .

Uma das características mais importantes das redes neurais é a aprendizagem, pois permite à rede ser moldada para uma aplicação, como define Haykin (2002, p.75):

Aprendizagem é um processo pelo qual os parâmetros livres de uma rede neural são adaptados através de um processo de estimulação pelo ambiente no qual a rede será inserida.

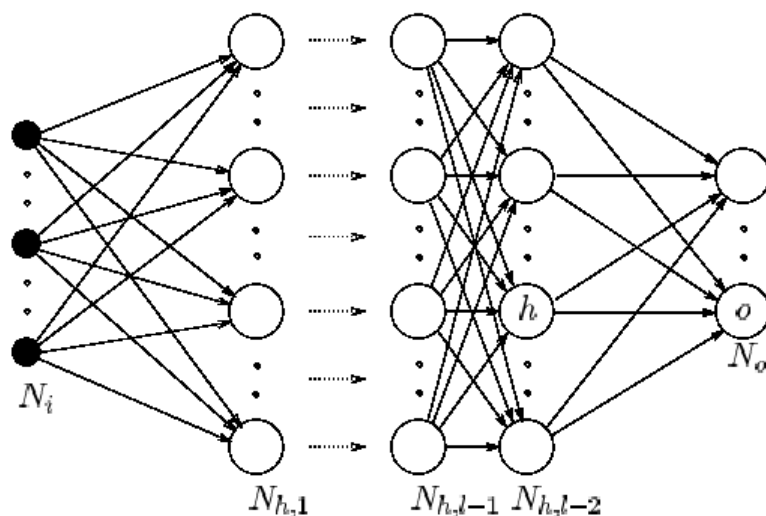


Figura 16: Rede neural Multicamada (KRÖSE; SMAGT, 1996).

Existem cinco regras básicas de aprendizagem mais usadas (HAYKIN, 2002):

- *Aprendizagem por correção de erro*, que é baseada na filtragem ótima;
- *Aprendizagem baseada em memória*, que memoriza os dados de treinamento;
- *Aprendizagem Hebbiana*, que utiliza conceitos da neurobiologia;
- *Aprendizagem competitiva*, que também utiliza conceitos da neurobiologia;
- *Aprendizagem de Boltzmann*, que usa idéias da mecânica estatística.

Associado às regras o aprendizado é dito supervisionado quando são apresentados à rede os pares (entrada e saída desejada). Para cada entrada, a rede gera uma saída, que é comparada com a saída desejada, gerando um erro e este é usado para corrigir os pesos sinápticos. Quando o aprendizado é não supervisionado, são apresentados vários conjuntos de entrada da rede e esta vai se organizando para responder às entradas em categorias ou classes, como nos sistemas classificadores (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

A aprendizagem possui aplicações, como: a associação de padrões, o reconhecimento de padrões, controle de sistemas ou filtragem de sinais (HAYKIN, 2002).

2.4.1 Perceptron de Múltiplas Camadas

Um dos tipos mais utilizados de RNA é o perceptron de múltiplas camadas ou *multi-layer perceptron*. Seu treinamento é supervisionado, utilizando o algoritmo de retropropa-

gação de erro ou *error backpropagation*, baseado na regra de aprendizagem por correção de erro (HAYKIN, 2002).

Basicamente, a aprendizagem por retropropagação consiste de um passo para frente onde a entrada é aplicada e propagada para os neurônios seguintes até gerar uma saída na camada final, e um passo para trás para ajuste dos pesos sinápticos de acordo com uma regra de correção de erros. Este algoritmo é descrito na Tabela 6.

Tabela 6: Algoritmo de Retropropagação do Erro (*Backpropagation*).

<p>. x_l^d a entrada desejada do l-ésimo exemplo;</p> <p>. y_l^d a saída desejada do l-ésimo exemplo;</p> <p>. $w_{m,j_m,j_{m-1}}$ o peso sináptico;</p> <p>. g a função de ativação;</p> <p>. m é o índice da camada;</p> <p>. $j_m = 1, 2, \dots, J_m$ é o índice do neurônio na m-ésima camada e sua saída;</p> <p>. $j_{m-1} = 1, 2, \dots, J_{m-1}$ é o índice do vetor de entrada do neurônio;</p> <p>. $v_{jM} = \sum_{i=1}^{J_M} w_i x_i$</p> <p>Dado um conjunto de treinamento de L exemplos: $\Psi = \{(x_l^d, y_l^d)\}_{l=1}^L$. Uma rede de M camadas com $\{J_0, J_1, \dots, J_M\}$ elementos em cada camada, é treinada sobre Ψ pelo seguinte algoritmo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Escolhe-se um conjunto de parâmetros iniciais $W(0)$, e uma taxa de aprendizado η; 2. Estabelece-se algum critério de parada, seja este um número máximo de iterações K_{max} ou erro $E(W) < \lambda$ ou uma combinação de ambos; 3. Calculam-se os erros de saída, da camada de saída e das camadas subseqüentes. Com $l = 1, 2, \dots, L$: $\delta_{y(jM),l} = (y_{jM,l}^d - y_{jM,l})$ <p>e:</p> $\delta_{jM,l} = \delta_{y(jM),l} \frac{dg(v_{jM})}{dv_{jM}}$ <p>variando $m = (M - 1), \dots, 1, 0$:</p> $\delta_{jm,l} = \left(\sum_{j(m+1)=1}^{J(m+1)} \delta_{j(m+1),l} w_{m+1,j(m+1),jm} \right) \frac{dg(h_{jm})}{dh_{jm}}$ <ol style="list-style-type: none"> 4. Atualizando-se os parâmetros mediante: $\Delta w_{m,jm,j(m-1)} = 2\eta \sum_{l=1}^L \delta_{jm,l} u_{j(m-1),l}^d$ <p>notando que $u_{j(0),l}^d = x_{j(0),l}^d$</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Recalcula-se $W(1) = W(0) + \Delta W$ e retorna-se o ciclo a partir de 3, até que se alcance o critério de parada.

Fonte: (KOVACS, 1996).

Há duas alternativas para a apresentação dos exemplos: no modo seqüencial e no modo por lote. No primeiro, para cada exemplo apresentado é realizada a atualização de pesos. No segundo isto é feito somente após serem apresentados todos os exemplos. Embora nem sempre mais vantajoso, o modo seqüencial é o preferido pela simplicidade de seu algoritmo (HAYKIN, 2002).

Uma rede neural é projetada para generalizar bem, ou seja, é capaz de dar uma resposta correta mesmo quando a entrada for um pouco diferente das entradas utilizadas no treinamento. Porém quando ela é treinada em excesso perde esta capacidade, pois acaba memorizando os dados utilizados (HAYKIN, 2002).

2.4.2 Mapas de Kohonen

Kohonen, em 1989, desenvolveu uma família de redes que possuía a capacidade de auto-organização. Estas redes eram capazes de reconhecer relações entre padrões apresentados à mesma. Sua topologia básica era composta de duas camadas: uma de entrada e uma de saída formada por uma matriz bidimensional de neurônios (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000). Estas redes são também chamadas mapas auto-organizados ou *self-organizing maps* (SOM). A Figura 17 ilustra uma rede de duas entradas :

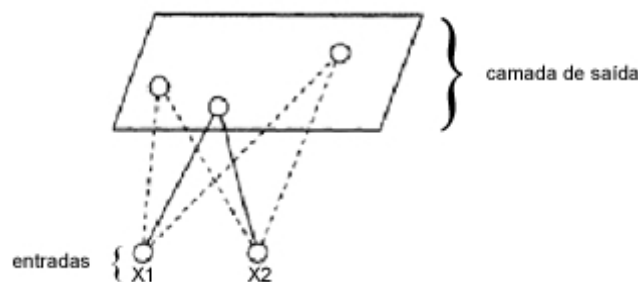


Figura 17: Kohonen SOM (KASABOV, 1998).

Para treinamento da rede é utilizada a regra do aprendizado competitivo, onde os neurônios competem entre si para permanecerem ativos. Mais especificamente a rede Kohonen usa o algoritmo o vencedor-leva-tudo (*winner-takes-all*), detalhado na Tabela 7.

2.4.3 Rede de Funções de Base Radial (RBF)

Uma abordagem diferente das anteriores é visualizar uma RNA como um problema de aproximação em um espaço de alta dimensão. Ou seja, achar uma superfície no espaço dimensional que melhor se adapte aos dados de treinamento. Para isto, nas unida-

Tabela 7: Algoritmo SOM.

1. *Inicialização.* Escolha valores aleatórios para os vetores de peso iniciais $\mathbf{w}_j(0)$. A única restrição aqui é que os $\mathbf{w}_j(0)$ sejam diferentes para $j = 1, 2, \dots, l$, onde l é o número de neurônios na grade. Pode ser desejável manter a magnitude dos pesos pequena.
2. *Amostragem.* Retire uma amostra \mathbf{x} do espaço de entrada com uma certa probabilidade; o vetor \mathbf{x} representa o padrão de ativação que é aplicado à grade. A dimensão do vetor \mathbf{x} é igual a m .
3. *Casamento por Similaridade.* Encontre neurônios com o melhor casamento (vencedor) $i(\mathbf{x})$ no passo de tempo n usando o critério da mínima distância euclidiana:

$$i(\mathbf{x}) = \operatorname{argmin}_j \|\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j\|, j = 1, 2, \dots, l$$

4. *Atualização.* Ajuste os vetores de peso sináptico de todos os neurônios usando a fórmula de atualização:

$$\mathbf{w}_j(n+1) = \mathbf{w}_j(n) + \eta(n)h_{j,i(\mathbf{x})}(n)(\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j(n))$$

onde $\eta(n)$ é o parâmetro da taxa de aprendizagem e $h_{j,i(\mathbf{x})}$ é a função de vizinhança centrada em torno do neurônio vencedor; ambos $\eta(n)$ e $h_{j,i(\mathbf{x})}$ são variados dinamicamente durante a aprendizagem para obter melhores resultados.

5. *Continuação.* Continue com o passo 2 até que não sejam observadas modificações significativas no mapa de características.

Fonte: (HAYKIN, 2002).

des intermediárias, utiliza-se um conjunto de funções que constitui uma base arbitrária para os padrões de entrada (vetores) quando elas são expandidas no espaço da unidade intermediária. Estas funções são chamadas de Funções Radiais de Base (*Radial-Basis Functions*-RBF) (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

Uma RBF tem duas camadas. A primeira (oculta) é um mapeamento não-linear construído com funções gaussianas, a segunda (saída) é uma combinação linear das unidades de ativação da camada oculta (CANG, 2004). Pode-se usar o método de treinamento supervisionado ou híbrido, tipicamente para problemas de aproximação de funções, predição e classificação (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000). A Figura 18 mostra um exemplo de uma RBF.

Para obter melhores resultados no treinamento de uma RBF, deve-se utilizar análise de aglomerados ou agrupamentos (*cluster analysis*), a qual reúne os vetores do conjunto de treinamento em grupos, possibilitando a diminuição do tamanho e da complexidade

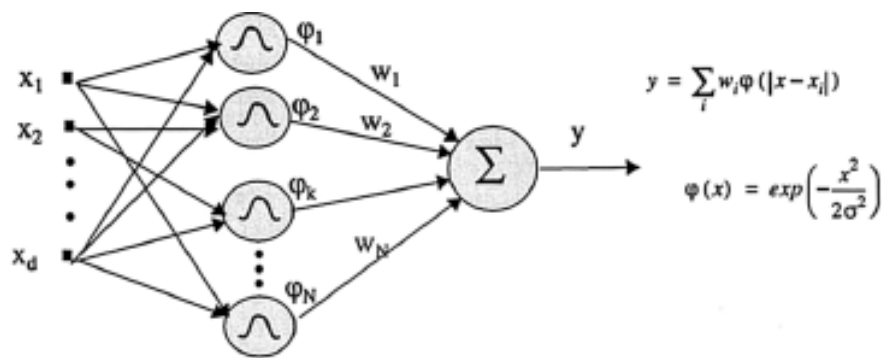


Figura 18: Rede Neural Artificial de Função de Base Radial (RBF) (PRINCIPE, 2000).

da RNA, tornando o algoritmo mais eficiente (KOVACS, 1996). A Tabela 8 apresenta um sumário do referido algoritmo.

Tabela 8: Algoritmo RBF

. w_{jk} os pesos da camada de saída.

1. Calcule os centros e seus comprimentos usando o conjunto de entrada;
2. Calcule a saída da função de base (camada oculta);
3. Atualize os pesos

$$w_{jk}^{new} = w_{jk}^{old} + \Delta w_{jk}$$

Sendo $\Delta w_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}}$, onde η é a taxa de aprendizagem e $\frac{\partial E}{\partial w_{jk}}$ é o gradiente do erro.

4. Repita os passos 2-3 para cada padrão do conjunto de entrada;
5. Repita os passos 2-4 até que a função custo seja pequena o suficiente, ou treinamento pare, ou alguma outra condição de término.

Fonte: (CANG, 2004).

2.4.4 Outras Redes Neurais

Como as possibilidades de arquitetura e treinamento são vastas, há diversos tipos de RNA desenvolvidas e em desenvolvimento, indicamos abaixo algumas delas (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

Rede Hopfield. Uma rede aditiva auto-associativa onde a função sinal é de limitação monótona incrementando a função com matriz sináptica simétrica. Estas redes são globalmente simétricas e convergem rapidamente para um ponto fixo de todas

entradas. Assim, uma vez a rede inicializada e dada alguma entrada $x(0)$, ela irá calcular $x(1), x(2), \dots$, até alcançar um estável $x(\infty)$ (RAYNOR, 1999).

Rede "Counterpropagation". Consiste em: uma camada de entrada, uma camada intermediária competitiva Kohonen e uma camada de saída Grossberg. Normalmente é treinada para realizar mapeamento de padrões (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

Rede BAM ("Bidirectional Associative Memory"). Uma rede neural com duas camadas retro-alimentadas com matrizes de conexão fixa. Quando apresentado a um vetor de entrada, repetidas aplicações das conexões da matriz causam a convergência do vetor para um ponto fixo aprendido (RAYNOR, 1999).

Rede ART ("Adaptive Resonance Theory"). Uma classe de rede neural baseada nos modelos neuro-fisiológicos de neurônio. ART usa uma camada escondida de casos ideais de predição. Se um caso de entrada é suficientemente próximo de um caso existente, ela "resona" com o caso; o caso ideal é atualizado para incorporar o novo caso. Caso contrário, um novo caso ideal é adicionado (RAYNOR, 1999).

2.5 Algoritmos Genéticos

A natureza tem sido fonte constante de inspiração para os cientistas, computação evolutiva é uma ferramenta que baseou-se nas teorias da evolução da natureza iniciada com Darwin. Algoritmo Genético (AG) é um ramo dessa que se desenvolveu a partir de 1960 com trabalhos de John Holland e Friedberg, realizados independentemente, além de outros. Eles procuravam uma ferramenta para otimização.

Os Algoritmos Genéticos possuem algumas qualidades que os tornaram bastante utilizados, quais sejam (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000):

- simplicidade de operação;
- facilidade de implementação;
- eficácia na busca da região onde, provavelmente, encontra-se o máximo global; aplicável em situações onde não se conhece o modelo matemático ou este é impreciso e também em funções lineares e não lineares.

Apesar de sua simplicidade, os resultados, obtidos com a aplicação do método, permitem concluir que os AG são um método de busca robusto, eficiente e eficaz em grande variedade de problemas, (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

2.5.1 Conceitos de Algoritmos Genéticos

Listam-se a seguir algumas características dos AG (GOLDBARG; LUNA, 2000), ilustradas na Figura 19¹⁷:

Cromossomo : representa um indivíduo na população.

População : conjunto de indivíduos, ou seja, conjunto de soluções.

Fitness ou aptidão : medida de aptidão de um indivíduo, normalmente associada a função objetivo para uma solução.

Gene : representa um componente do cromossomo (variável do problema).

Alelo : descreve os possíveis estados de um atributo do indivíduo.

Locus : representa a posição do atributo no cromossomo.

Operadores genéticos : são as regras que permitem a manipulação dos cromossomos que, basicamente, são: seleção, cruzamento (*crossover*) e mutação.

Fenótipo : denota o cromossomo decodificado.

Genótipo : representa a estrutura do cromossomo codificado.

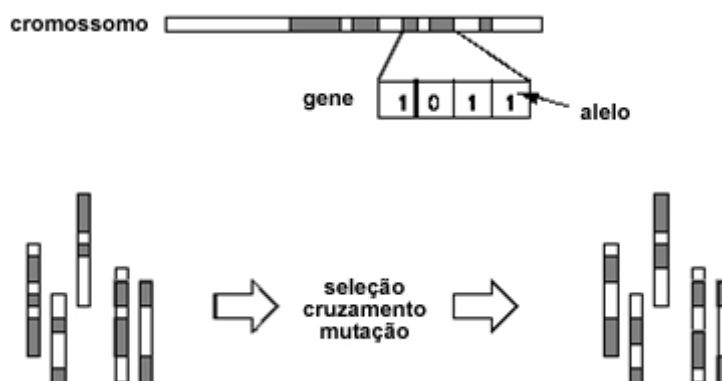


Figura 19: Características AG.

¹⁷Whitley, D. A Genetic Algorithm Tutorial. <http://samizdat.mines.edu/ga-tutorial>, acessado em jan/2005.

2.5.2 Operadores Genéticos

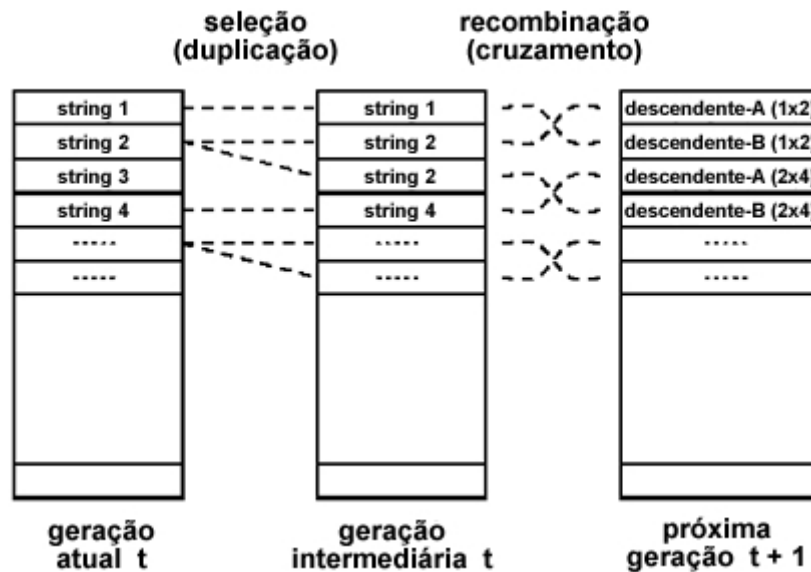


Figura 20: Operadores Genéticos.

Para obtenção de uma nova geração são utilizados os chamados Operadores Genéticos cruzamento (*crossover*) e mutação, mostrados na Figura 20.

O cruzamento é um meio de se combinar as características dos indivíduos com a intenção de obter membros mais aptos. Este processo ocorre pela aproximação dos cromossomos de dois indivíduos, que trocam entre si partes do seus genes. Isso resulta em dois cromossomos diferentes mas que ainda guardam influências dos pais. O operador *crossover* mais simples é o chamado de um ponto (*One-Point*), onde, primeiro um local de cruzamento é escolhido com probabilidade uniforme sobre o comprimento do cromossomo, então as *strings* correspondentes são permutadas. Há, ainda, muitas outras técnicas de *crossover*, como é o caso do *crossover* de dois pontos, e dos tipos uniformes (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

A mutação consiste em uma perturbação na cadeia dos cromossomos dando origem a uma nova cadeia, que guardará pouca ou nenhuma informação da cadeia mãe. Na realidade, mutação é a denominação dada a vários mecanismos de alteração genética, os quais têm em comum, o fato de fazerem o novo cromossomo apresentar pouca informação dos pais. Esta alteração ocorre de forma que cada gene em cada cromossomo é um candidato à mutação, enquanto que, a seleção é determinada pela probabilidade de mutação. A tarefa da mutação tem sido de restituir a perda ou material genético inexplorado na população, com o objetivo de prevenir a convergência prematura do AG para soluções sub-ótimas.

Fernandes (2003) propõe o algoritmo do Tabela 9 para implementar AG.

Tabela 9: Algoritmo Genético Simples.

<p><u>Início</u></p> <p>Gerar uma população inicial; Calcular a função de avaliação de cada indivíduo;</p> <p><u>Enquanto</u> não Terminou <u>faça</u></p> <p><u>Início</u> {produz nova geração}</p> <p><u>Para</u>(tamanho da população)/2 <u>faça</u></p> <p><u>Início</u>{Ciclo reprodutivo}</p> <p>Selecionar dois indivíduos da geração anterior para cruzamento (probabilidade de seleção proporcional à função de avaliação do indivíduo);</p> <p>Cruzar com certa probabilidade obtendo descendentes;</p> <p>Mutação nos descendentes com certa probabilidade;</p> <p>Calcular a função de avaliação dos descendentes que sofreram mutação;</p> <p><u>Fim-para</u></p> <p><u>Se</u> (população convergiu) <u>então</u></p> <p>Terminou := verdade;</p> <p><u>Fim Se</u></p> <p><u>Fim-enquanto</u></p> <p><u>Fim do algoritmo</u></p>
--

Fonte: (FERNANDES, 2003).

2.5.3 Aplicações de Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos têm aplicação tanto em ciências como em tecnologia. A facilidade de uso e desenvolvimento os tornam especialmente atraentes.

Dentre os problemas tecnológicos, podem ser citados (MITCHELL, 1999):

- Desenvolvimento de programas de computadores: programação automática é um grande apelo para desenvolvimento de programas computacionais massivamente paralelos, por exemplo. Tem sido usado em desenvolvimento de programas em Lisp e *cellular automata*;
- Análise de dados e predição: em campos de estatística e aprendizado de máquina é feito um grande esforço para encontrar padrões interessantes em dados complexos e para previsões do futuro de tais dados. Algumas aplicações são *predição de sistemas dinâmicos* e de estruturas de proteínas;

- Desenvolvimento de redes neurais artificiais.

Já entre os modelos científicos, temos como exemplos (MITCHELL, 1999):

- Modelando interações entre aprendizado e evolução;
- Modelando seleção sexual;
- Modelando ecossistemas;
- Medindo atividade evolucionária.

3 *Modelo de Previsão*

Neste capítulo é exposta a pesquisa bibliográfica sobre modelos de previsão. O modelo proposto é esboçado definindo as variáveis envolvidas.

O modelo de um sistema é uma tentativa de conhecermos seu comportamento e características com algum objetivo específico, ou como diz Goldbarg e Luna (2000):

Os *modelos* são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada.

A modelagem matemática de um sistema de distribuição de água é trabalhosa, sendo construída, geralmente, aplicando-se as regras de continuidade da água na rede: balanço de massas e conservação de energia, descrito pela seguinte equação com dependência não-linear:

$$g_{i(x)} = \sum_{j \in \omega_i} (f_{ij(x)} - R_{ij}(x_i - x_j)^{0.54}), \quad (3.1)$$

onde g_i é o balanço de massa nó i , ω_i representa o conjunto de nós adjacentes do nó i , R_{ij} é a resistência hidráulica para tubo i - j , x_i é a pressão no nó. A não-linearidade das equações exige um método iterativo de solução como Newton-Raphson (HOSSEINZAMAN; BARGIELA, 1994).

Os simuladores hidráulicos são ferramentas que auxiliam na compreensão da dinâmica dos SDA, e tem sido usados constantemente para este fim, como exemplificam os trabalhos seguintes.

Righetto (2002) utilizou o método das características para um simulador hidráulico, adaptando o método que em geral é aplicado a cálculos de transitórios para regime permanente. A principal vantagem deste é que as equações são todas lineares.

Barbosa et al. (2002) realizou pesquisa com o modelo computacional para simulação da operação de sistemas de abastecimento WADISO (*Water Distribution System Optimization*), desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*. O WADISO, para realizar

o balanceamento da rede, usa o método dos nós tipo *Hardy-Cross*, e a perda de carga é calculada pela fórmula de *Hazen-Williams*.

Soares, Reis e Silva (2002) propuseram uma alternativa aos modelos de simulação hidráulica dirigido pela demanda incorporando os vazamentos. Para tal implementa um procedimento iterativo integrando o simulador EPANET 2¹.

Ainda dentro do enfoque de simulador hidráulico, Carrijo (2004) desenvolveu um modelo adotando o EPANET 2 para simulação hidráulica de parte da rede de distribuição de Goiânia.

3.1 Modelos de Previsão de Sistemas de Distribuição de Água

Para distribuição de água há vários enfoques quando se deseja fazer previsão de seu funcionamento. Entre os principais meios há a abordagem por modelos matemáticos, estatísticos e os computacionais, dentre estes a abordagem via identificação de sistemas através de ferramentas de inteligência artificial. A seguir são descritos alguns trabalhos com estes modelos.

Estatístico

An et al. (1995) usaram um *Rough Set Model* a partir de uma base dados contendo 306 exemplos cobrindo informações de fatores ambientais, sociais e volumes de distribuição de água para construiu um modelo para previsão de demanda de água de uma cidade da América do Norte.

Pesquisa Operacional

Santos e Gomes (2002) adaptaram o método PNL2000 de dimensionamento econômico de redes malhadas para a simulação de cenários de operação de sistemas de distribuição de água. O PNL2000 é uma ferramenta que utiliza o algoritmo de otimização GRG2 (gradiente reduzido generalizado), processado através da ferramenta SOLVER, disponível na planilha Excel da Microsoft.

¹Epanet é um simulador hidráulico e de qualidade de água desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos (EPA).

Inteligência Artificial

Silva e Barbosa (2002) com uma rede neural MLP implementada no MATLAB®, treinada com algoritmo do gradiente conjugado escalonado, tendo como entrada as demandas horárias do respectivo dia da semana anterior e a demanda média do dia anterior, fizeram previsão das demandas horárias do próximo dia de um *booster* do SDA de São Paulo.

Rumantir e Hulme (1995) compararam a utilização de um modelo estatístico e um híbrido deste com RNA na previsão mensal de demanda de água em Melbourne, Austrália. O método estatístico usado pela empresa australiana de águas toma a média dos últimos 5 anos para prever o próximo. O autor combina RNA para estimar a componente aleatória da série-temporal e melhorar a estimativa.

Nguyen (2002) propôs o uso de duas alternativas para previsão de enchentes quando se possui dados de qualidade não confiável. A primeira alternativa é com redes complementadas com lógica *fuzzy* para os valores incertos, e a segunda com a combinação de redes neurais artificiais numa arquitetura denominada *multi-net*.

Abraham e Nath (2000) aplicaram comparativamente RNA com algoritmo de retropropagação e ANFIS (*Adaptive Network Based Fuzzy Inference System*) implementado com sistema de inferência de Sugeno, fazendo previsão de demanda reativa elétrica. Os dois métodos apresentaram bons resultados, com vantagem para o ANFIS que apresentou um erro médio 24% menor e um tempo de treinamento de 25 s contra 188 s do primeiro.

Abraham e Baikunth (2001) compararam combinações de RNA e sistema fuzzy de inferência denominado *Evolving Fuzzy Neural Network*, de RNA com algoritmo de retropropagação, de RNA com algoritmo do gradiente conjugado escalonado e ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*), na previsão de demanda elétrica de Victoria, Austrália. Os resultados comprovaram, novamente, a maior eficiência do método híbrido, apesar dos demais apresentarem bons resultados.

Complementando o trabalho anterior, Bhattacharya, Abraham e Baikunth (2002) fizeram previsão de demanda elétrica em Victoria, Austrália, através de quatro modelos: programação genética, neuro-*fuzzy* implementando um sistema *fuzzy* com inferência Mamdani, RNA com algoritmo de retropropagação e RNA com algoritmo do gradiente conjugado escalonado. Embora tanto os sistemas com programação genética quanto os com RNA tenham apresentado bons resultados, o melhor desempenho foi obtido pelo híbrido neuro-*fuzzy*.

Uma comparação de variados métodos para previsão de cargas em sistemas elétricos na República Tcheca foi feita por Khan, Ondrusek e Abraham (2002). Eles compararam os resultados aplicando redes neurais de múltiplas camadas (MLP), redes neurais recorrentes de Elman (ERNN), redes de Hopfield, redes de funções de base radiais (RBF), sistema de inferência *fuzzy* (FL) e sistema híbrido neuro-*fuzzy* (FNN). Concluíram que FNN e RBF são mais acuradas e efetivas quando comparadas com MLP, ERNN, Hopfield e FL.

3.2 Modelo de Previsão Proposto

A Identificação de Sistemas é o processo de construção de modelo e estimativa dos melhores valores de parâmetros desconhecidos a partir de dados experimentais (JAMSHIDI, 1997, p. 71).

O tratamento da macro-distribuição com a abordagem de Identificação de Sistemas traz uma vantagem de não se necessitar de informações muito detalhadas, tais como o diâmetro e a rugosidade de adutoras. Estas, por vezes, não são precisas e tornam uma modelagem física perfeita difícil, levando a resultados incorretos. Ao utilizarem os dados de comportamento do sistema, incorpora-se indiretamente as suas características físicas.

Se uma rede é muito complexa, para combater tal problema o sistema deve ser dividido em subsistemas, introduzindo a noção de simuladores distribuídos. As subredes são atualizadas para compensar a perda de fluxo nas ligações que serão cortadas entre as unidades. Cada subrede atualizada é resolvida independentemente e na seqüência coordenada com o seu vizinho (HARTLEY; BARGIELA, 1996).

Tomando este modelo e fazendo uma adaptação do esquema de divisão citado, deve-se dividir a rede em subredes que contam com o reservatório do qual será previsto o nível e os outros elementos (reservatórios, bombas e válvulas) que têm influência sobre o mesmo, como esquematizado na Figura 21. Assim quando estiver resolvida esta subrede, passa-se à próxima, e quando todo o sistema tiver sido percorrido atualiza-se o nível de todos reservatórios. A Figura 23 mostra o diagrama de blocos que elucida esta estratégia.

Os critérios para separação de subredes podem ser vários: maior correlação entre os componentes, vizinhança, entre outros.

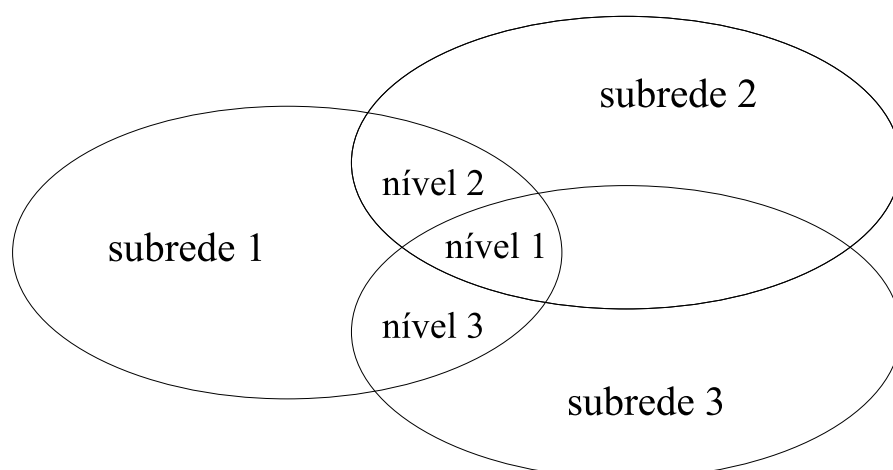


Figura 21: Divisão do Sistema em Subredes.

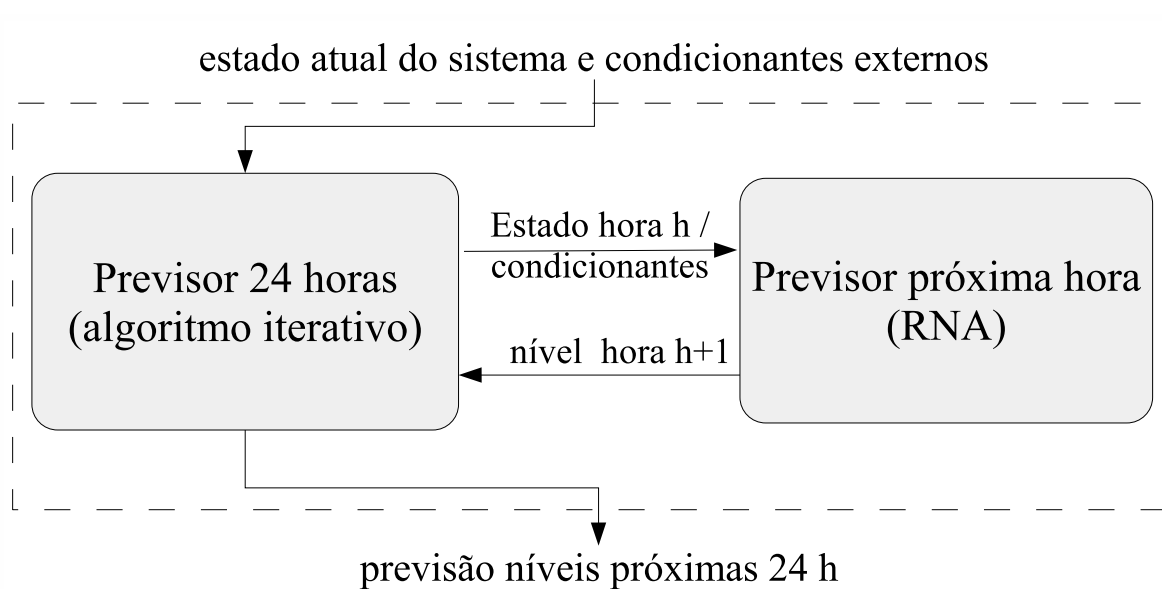


Figura 22: Diagrama do Modelo de Previsão Proposto.

3.2.1 Variáveis do Sistema

O consumo de água é afetado por vários fatores físicos, climáticos, sociais e políticos, os quais podem ser decompostos nos seguintes componentes (RUMANTIR; HULME, 1995):

Tendência de longo prazo: crescimento populacional, macroeconomia etc.

Componente sazonal: verão, inverno etc.

Componente aleatória: chuva etc.

Quatorze fatores foram identificados como influenciadores do consumo diário de água de uma cidade (AN et al., 1995). Estes fatores são listados na Tabela 10.

Tabela 10: Variáveis Condicionantes do Consumo de Água.

Item	Variáveis
1	Dia da semana
2	Temperatura mínima
3	Temperatura máxima
4	Temperatura média
5	Umidade máxima
6	Umidade mínima
7	Temporal
8	Chuva
9	Neve
10	Precipitação total
11	Velocidade média do vento
12	Direção do vento
13	Máxima velocidade do vento
14	Horas de sol

Durante a construção de um sistema de informação muitas vezes determina-se que alguns dos atributos iniciais não provêm nenhuma informação adicional. Assim, pode-se reduzir o conjunto de atributos (RUMANTIR; HULME, 1995). Neste sentido, procurou-se reduzir o número de variáveis condicionantes para simplificação do modelo.

Utilizando o modelo de decisão citado por Bargiela (1993) tem-se que: a decisão é denotada por u , o presente estado por x_0 , a influência externa por z e o resultado y é dado por:

$$y = F(x_0, u, z) \quad (3.2)$$

onde, para o modelo proposto:

x_0 = nível dos reservatórios influentes;

u = bombas e válvulas influentes;

y = previsão da variação nível do reservatório;

z = meteorologia, dia da semana, ser ou não feriado, mês.

3.2.2 Ferramentas de Inteligência Artificial

Ferramentas de IA (inteligência artificial) como os sistemas especialistas, a lógica nebulosa e as redes neurais têm sido empregadas para a modelagem de sistemas de larga escala. Um sistema especialista é construído para ser aplicado num domínio específico do conhecimento para resolver problemas similares. Redes neurais computacionais (RNA) emulam princípios biológicos, com a capacidade de aprendizado. A lógica nebulosa trata a incerteza e a imprecisão presentes na informação processada e apresenta uma abordagem lingüística para o raciocínio humano (JAMSHIDI, 1997, p. 7).

Os algoritmos genéticos são usados para problemas envolvendo espaços complexos, e empregam mecanismos similares ao princípio de seleção natural de Darwin, baseados na reprodução e sobrevivência das espécies (CASTILLO; GONZALES, 1995). Outras ferramentas utilizadas em *soft computing* (computação flexível ou inteligência computacional) são programação genética, computação probabilística e várias técnicas híbridas (BHATTACHARYA; ABRAHAM; BAIKUNTH, 2002).

Muitas destas técnicas têm apresentado bons resultados nos modelos de previsão de demanda de energia elétrica (BHATTACHARYA; ABRAHAM; BAIKUNTH, 2002), demanda de água (AN et al., 1995), previsão de enchentes (NGUYEN, 2002) e previsão de fator de potência (ABRAHAM; BAIKUNTH, 2001), conforme citado na seção 3.1, o que demonstra a adequação para o problema proposto. Neste trabalho adotou-se as RNA para o modelo de previsão (seção 5.1).

4 *Modelo de Otimização*

Neste capítulo são discutidos os modelos de otimização utilizados por vários autores em outras áreas e também especificamente em um SAA. É proposto um modelo de otimização.

O homem sempre buscou um uso mais racional de seus recursos pois desde os primeiros tempos eles têm se mostrado escassos, ou seja, a otimização é uma prática muito antiga e intuitiva de todas as civilizações. O costume de armazenar para consumir no futuro mostra isto.

Perseguir a racionalização dos recursos é uma questão de sobrevivência para as empresas e indivíduos. De acordo com Goldbarg e Luna (2000), uma empresa tem como objetivo:

- Proporcionar emprego eficiente para os fatores de produção;
- Proporcionar um justo retorno dos fatores de entrada;
- Satisfazer às necessidades e expectativas dos clientes em bens e serviços;
- Proporcionar condições para a satisfação das necessidades dos funcionários;
- Aumentar o bem-estar da sociedade.

Otimização, como uma ciência, ganhou grande impulso na Segunda Guerra Mundial com equipes interdisciplinares de cientistas contratadas para resolver problemas de ordem tática e estratégica. A aplicação de matemática e métodos científicos para operações militares foi chamada de pesquisa operacional (PO). O termo, atualmente, significa uma abordagem científica para tomada de decisão, a qual procura determinar como melhor projetar e operar sistemas, usualmente sob requerimento de alocação de recursos escassos (WISTON, 1994), ou seja, aplicação de métodos científicos, técnicas científicas e instrumentos científicos em problemas que envolvem operações de sistema, de modo a munir os

executivos, responsáveis pelas operações, de soluções ótimas para os problemas, (CHIAVENATO, 1983).

O caso específico dos sistemas de distribuição de água é um problema de armazenagem e, a princípio, permite utilizar técnicas de otimização para armazenagem e transporte em geral: uma localização ótima para fontes de suprimento é afetada pela análise de custos de produção, *marketing*, mão-de-obra, estocagem e transporte. Uma armazenagem central requer menor investimento em diversos depósitos para armazenagem regional, mas o custo de transporte pode ser maior. A estocagem descentralizada tem a vantagem de reduzir custos de transporte, mas reduz a capacidade de investimento (COBRA, 1992).

4.1 Otimização de Sistemas de Distribuição de Água

A otimização de sistemas de distribuição de água é uma fonte constante de pesquisas científicas. Há vários estudos de otimização de projeto de redes, de dimensionamento e localização de reservatórios, de reabilitação, de bombeamento e outros. Há abordagens estatísticas, analíticas e, mais recentemente, computacionais e de inteligência artificial, estas últimas impulsionadas pela popularização e redução de custo dos microcomputadores e estações de trabalho.

Utilizando algoritmos genéticos para otimização das dimensões da rede de distribuição de água, Castillo e Gonzales (1995) representaram as pressões e diâmetros através dos cromossomos. A função de aptidão foi abordada com lógica *fuzzy*, a função de pertinência do custo de implantação foi sobreposta parcialmente com a de restrição de velocidade do fluido na tubulação.

Righetto (2002) buscou a operação ótima do sistema de distribuição de água utilizando um simulador hidráulico e otimização com algoritmos genéticos. A procura de regras operacionais ótimas foi estabelecida com a adoção de 6 parâmetros para a função de aptidão: consumo de energia, volume armazenado nos reservatórios, grau de satisfação de atendimento da demanda, distribuição de pressão nos nós da rede, número de bombas em operação e número de mudanças de funcionamento de válvulas reguladoras de vazão.

O uso de sistemas especialistas foi demonstrado por Barbosa et al. (2002) com o WADISO - *Water Distribution System Optimization*, desenvolvido pelo *U.S. Army*. Os principais elementos foram representados no *software*: tubos, reservatórios, mananciais, válvulas redutoras de pressão e controle, bombas, pressões, vazões e velocidades. A busca da melhor operação objetivou o menor custo de energia elétrica, menor número de li-

gamento/desligamento das bombas, atendimento das demandas volumétricas de água e pressões nas derivações e os níveis dos reservatórios ao final das 24 horas aproximadamente iguais aos níveis iniciais.

Santos e Gomes (2002) aplicaram um modelo de programação não linear, a PNL2000, para simulação e a otimização, que fez uso do SOLVER da planilha Microsoft Excel®. A função objetivo representava a minimização do custo total de distribuição, representados pelo investimento inicial e pelos gastos operacionais (energéticos), além das restrições hidráulicas. No caso, o modelo foi adaptado para aplicação em um sistema já em operação, podendo haver soluções que recomendassem o redimensionamento da rede.

Curi, Curi e Barbosa (2002) estudaram a operação ótima de reservatórios de uso múltiplo utilizando o modelo ORNAP (*Optimal Reservoir Network Analysis Program*). O modelo utilizava programação não linear com função objetivo de maximização da receita líquida da agricultura irrigada e as restrições eram as limitações físicas dos reservatórios, equipamentos hidráulicos, limitações hídricas, legais, econômicas e sociais.

Usando duas técnicas de otimização em seqüência, Curi e Firmino (2002) fizeram o dimensionamento econômico de redes hidráulicas malhadas e pressurizadas, cuja solução era obtida em duas etapas. Na primeira etapa, utilizava-se de programação não linear para a resolução do problema onde as variáveis de decisão eram as vazões e os diâmetros da tubulação. As restrições envolviam as velocidades máximas e mínimas admissíveis, conservação da massa nos nós e energia no circuito e requerimentos de pressão mínima nos pontos de tomada d'água. Na segunda etapa, eram escolhidos, para cada trecho, dois diâmetros nominais, sendo um superior e outro inferior ao resultado obtido na etapa 1. A programação linear era, então, utilizada para se determinar o comprimento de cada um dos dois tubos para cada trecho, considerando as vazões constantes e mantendo-se as perdas de carga por trecho iguais àquelas obtidas na primeira etapa.

O dimensionamento de rede como um problema multiobjetivo foi avaliado por Formiga e Chaudhry (2002). Os autores utilizaram algoritmos evolucionários para a geração de uma série de soluções não-dominadas¹. As funções objetivos avaliadas foram: o custo de implantação do sistema, as perdas por vazamento na rede e a capacidade de atendimento das vazões. Para a determinação da fronteira Pareto², utilizou-se o *toolbox* de domínio público MOEA (*Multi-objective Evolutionary Algorithm*) desenvolvido para o

¹Soluções não-dominadas é o conjunto de soluções onde nenhuma solução é pior do que a outras em todos os objetivos.

²Diz-se que um vetor de variáveis de decisão $x^* \in F$ é Pareto-ótimo se não existe um outro $x \in F$ tal que $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ para todo $i = 1, \dots, k$ e $f_j(x) < f_j(x^*)$ para pelo menos um j (CARRIJO, 2004).

MATLAB®acoplado a um simulador hidráulico híbrido baseado no método de Nielsen.

Santos (1999), objetivando a conservação de energia num sistema de abastecimento de água de Macapá adotou o modelo computacional SCODA, que implementava um método de programação linear especializado para grafos. As características físicas da rede eram fixadas e o chaveamento das bombas era otimizado para 24 horas. O objetivo era minimizar o consumo e o custo de energia, compondo estes com o método dos pesos.

Carrijo (2004) abordou o problema de operação ótima de sistema de distribuição de água com a seguinte estratégia: primeiramente obter um conjunto de soluções factíveis e depois selecionar a melhor utilizando aprendizado de máquinas. As soluções não dominadas - frente Pareto - eram obtidas com o algoritmo genético multiobjetivo SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*). Os objetivos foram menor custo operacional com energia elétrica e a maior confiabilidade hidráulica dos sistema em termos de níveis de reservatórios e pressões nas redes. Através de regras operacionais extraídas com o aprendizado de máquina de um conjunto de casos fornecidos - frente Pareto - eram selecionadas as melhores soluções ou aquelas que mais se adequavam à operação ótima do sistema.

4.2 Modelo de Otimização Proposto

Na procura de uma melhor operação das estações de bombeamento depara-se com vários objetivos que os operadores buscam no dia-a-dia. Dentre os vários existentes, os que se pretendem otimizar neste trabalho são:

- Manter os níveis dos reservatórios em um valor satisfatório para atender os usuários. A pressão mínima na rede para abastecer os consumidores deve ser de 10 mca, no Brasil (GOMES, 2004);
- Conservar os equipamentos e dispositivos hidráulicos, minimizando as paradas e partidas de bombas que representam uma fadiga para os componentes elétricos e mecânicos;
- Buscar a manutenção dos volumes dos reservatórios no máximo possível para aumentar a autonomia de abastecimento em eventuais defeitos no sistema e, também, suprir água quando o bombeamento for diminuído nos horários de energia mais cara;
- Operar dentro dos menores custos de energia.

Alguns destes objetivos são conflitantes, indicando uma otimização multiobjetivo, ou problema de busca com um vetor de variáveis de decisão e um vetor de funções objetivos (COELLO, 2000).

Na expectativa de encontrarmos uma solução mais simples para o problema, propõe-se adaptá-lo a um escalar simples com o Método dos Pesos (STEUER, 1989), seguindo sugestão de Miettinen (1999):

Problemas de otimização multiobjetivo são usualmente resolvidos por *scalarization*. *Scalarization* significa que o problema é convertido para problemas de otimização de simples objetivo. Neste caminho os problemas novos tem uma função objetivo com valores reais, possivelmente dependendo de alguns parâmetros. Depois do problema multiobjetivo ter sido 'scalarized', as largamente utilizadas teorias e métodos de simples objetivo podem ser usadas.

Partindo desse pressuposto, a função objetivo pode ser escrita da seguinte forma:

$$\min f(x) = w_1 c_{nvel} + w_2 c_{chaveamento} + w_3 c_{volume} + w_4 c_{energia} \quad (4.1)$$

sendo:

- w_i pesos respectivos de cada um dos custos;
- c_{nvel} parcela do nível, são estabelecidos dois níveis de referência, o seguro para manter as pressões na rede no valor desejado e o crítico abaixo do qual o reservatório não tem condições operacionais. É atribuído o valor 0,5 para o primeiro e 1 para o segundo;
- $c_{chaveamento}$ é aumentado em 1, para cada bomba que seja desligada;
- c_{volume} no final do período que se pretende otimizar é somado o volume dos reservatórios;
- $c_{energia}$ acumula o consumo, kWh, de cada bombeamento. Nos horários de ponta do THS³ é utilizado um fator do custo relativo (tarifa ponta / tarifa fora ponta) de cada modalidade tarifária daquela estação elevatória.

Obs.: Os custos são normalizados pela divisão de cada um por seu possível valor máximo no período simulado.

³Tarifa horo-sazonal, ver seção 2.2.

Quanto aos métodos, algoritmos genéticos têm sido muito utilizados para otimizações em sistemas de abastecimento de água (ver seção 4.1), e são bem adequados ao modelo proposto, pois não há uma função matemática que descreva o comportamento dinâmico do sistema e sim quatro redes neurais que prevêm a variação de nível da próxima hora e que são realimentadas até se chegar à previsão das próximas 24 horas. Esta metodologia torna a busca de soluções bem compreensível, permitindo uma visualização do progresso e do conjunto de soluções encontrado.

Outros métodos foram analisados para esta aplicação:

- A programação dinâmica que parte do final da solução para o começo exigindo que seja alterado o modelo de previsão que simula do início para o fim;
- Os algoritmos de busca, que com as expansões do modelo apresentariam problemas, exigindo cada vez mais memória e capacidade de processamento, com um crescimento além do sistema inicial, relativamente pequeno com 4 elevatórias e 5 reservatórios, demonstrando a chamada maldição da dimensionalidade.

Nesta aplicação a variável de decisão é o controle das bombas, ou seja, se serão ligadas ou não.

O diagrama da Figura 23 ilustra o algoritmo para otimização do bombeamento. Pode ser visto que o otimizador alimenta o previsor de nível com cada indivíduo da população de soluções para obter a previsão de nível das próximas 24 horas e avaliá-lo.

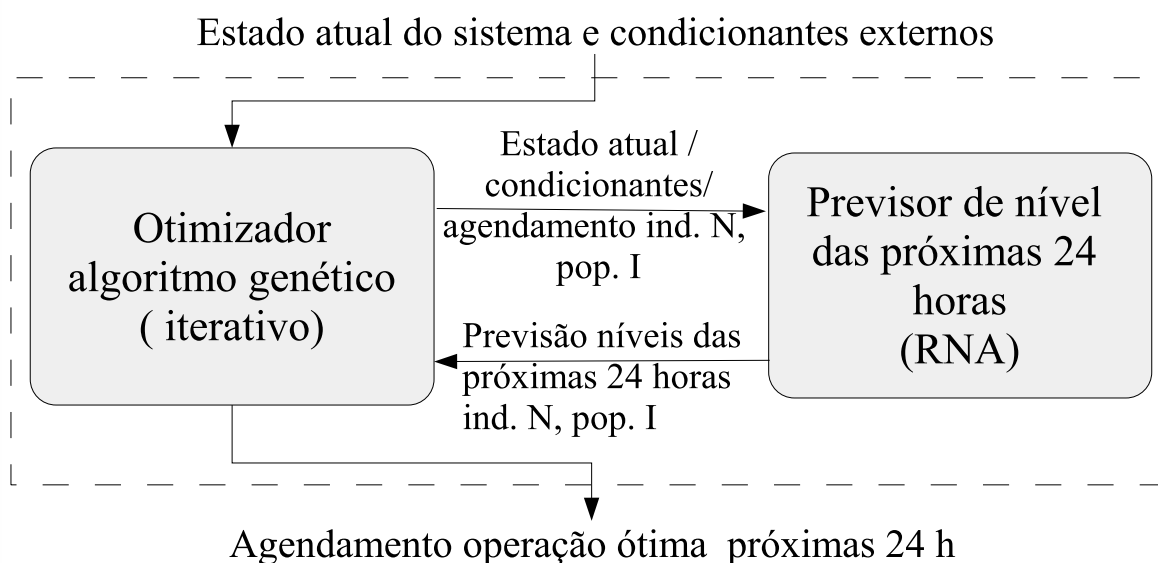


Figura 23: Diagrama do Modelo de Otimização Proposto.

5 *Resultados*

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na previsão de nível para as próximas 24 h de parte do sistema de distribuição de água de Goiânia, utilizando redes neurais artificiais. Estas RNA treinadas para previsão são em seguida usadas na otimização do bombeamento do mesmo sistema através de algoritmos genéticos.

Os modelos propostos, descritos nos capítulos 3 e 4 foram aplicados aos quatro maiores reservatórios do sistema de distribuição João Leite, que faz parte do sistema de abastecimento de água de Goiânia (Figura 24). Utilizou-se, no estudo, o período de janeiro a abril de 2002. Selecionamos os dados de 1 janeiro a 14 de abril de 2002 para ajuste do modelo e 15 a 30 de abril para teste.

No Anexo A é mostrado um exemplo de relatório operacional diário da Saneago do qual se originaram os dados para o modelo. Os operadores transcrevem estes dados para a planilha de cálculo do OpenOffice® diariamente. Estas planilhas foram compiladas e validadas para utilização no modelo proposto.

No Anexo B estão os dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia para o período estudado, que também foram utilizados no modelo.

5.1 **Previsão de Níveis dos Reservatórios de Água**

Seguindo a estratégia exposta na seção 3.1, foram escolhidas redes neurais artificiais motivado pelos vários casos de sucesso do seu uso em previsões. Dividiu-se a implementação na previsão nível da próxima hora com uma RNA para cada reservatório e na previsão de nível para as próximas 24 h utilizando as redes obtidas.

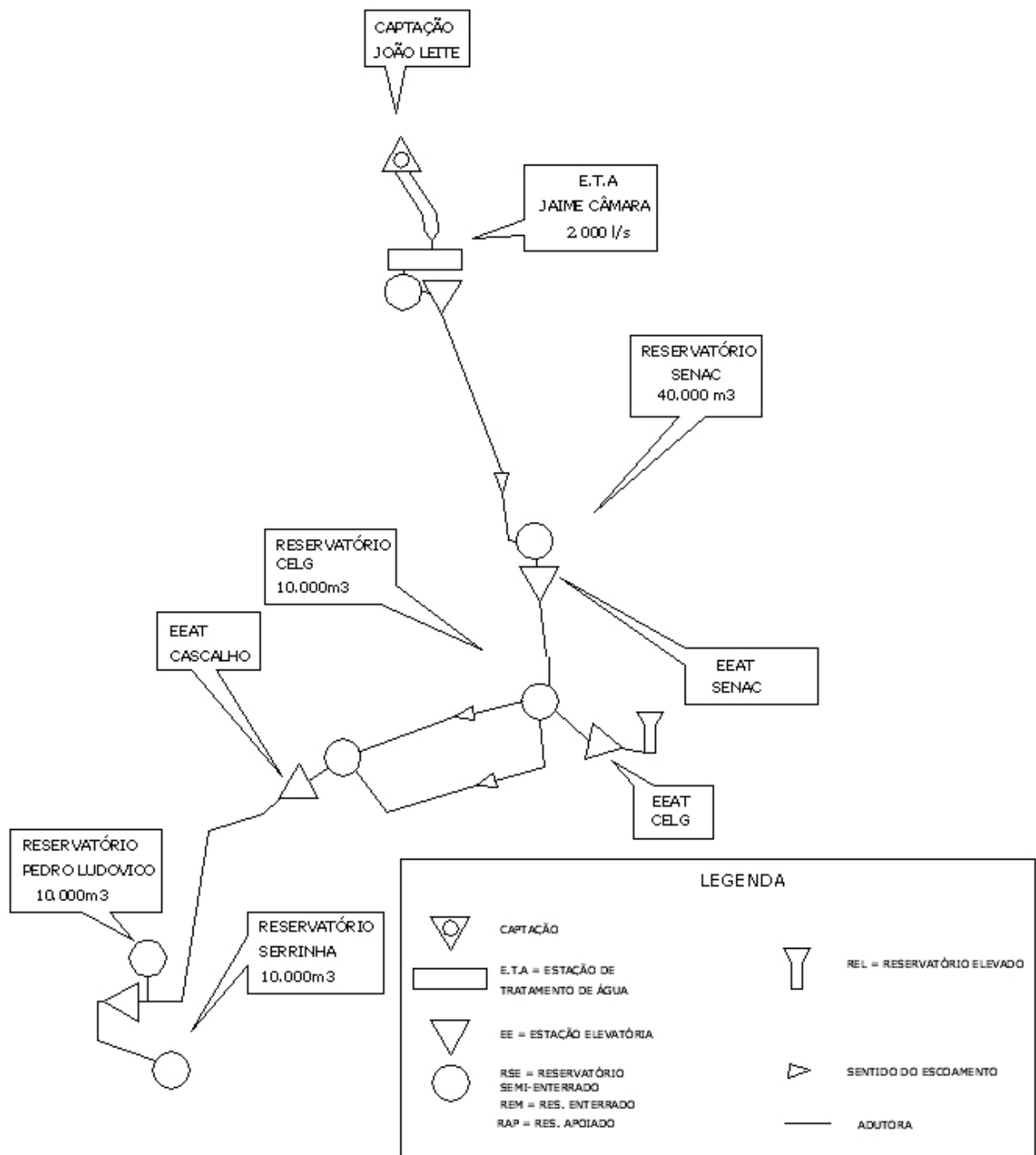


Figura 24: Diagrama do SDA João Leite Simplificado - 4 Maiores Reservatórios.

Inicialmente, foram selecionadas, e adaptadas à disponibilidade de dados meteorológicos, como variáveis de influência externa do modelo o dia da semana, a temperatura compensada, a umidade média e a precipitação total de chuva como definidos no item 3.2.1, e como variáveis de estado a hora, o nível de cada reservatório e o *status* de cada bomba.

5.1.1 Previsão de Nível Próxima Hora

Primeiramente foram testadas formas de selecionar as variáveis de entrada das sub-redes (ver seção 3.2.1) com uma arquitetura de redes neurais MLP, e após a determinação de qual o tipo de seleção atingiu melhor resultado, foram avaliados o desempenho das redes RBF e SOM para o modelo.

Iniciados os testes depara-se com uma dificuldade ao se utilizar o erro médio quadrático (MSE) como critério de avaliação: fazia-se a previsão de variação de nível que apresenta um valor geralmente pequeno a cada hora, tipicamente dezenas de centímetros, e caso se encontrasse um erro grande, da ordem de metros, este predominaria sobre os demais, dificultando o julgamento da evolução dos testes. Assim optou-se por adotar, também, uma medida de dispersão como a mostrada na Tabela 12, onde a 3ª, 4ª e 5ª colunas representam o percentual do total de erros menores do que um estipulado erro relativo.

No caso do sistema de distribuição de água de Goiânia pode-se ver que a correlação linear entre as unidades mostrada na Tabela 11 é freqüentemente baixa, mas é possível mesmo assim se eleger as mais correlatas, indicando quais interferem mais no estado uma da outra.

Tabela 11: Correlação Linear entre Unidades do SDA de Goiânia.

	Elev. JL	Res. Senac	Elev. Senac	Res. Celg	Elev. Cascalho	Res. PL	Elev. PL	Res. Serrinha
Elev. JL	1	-0,27	0,35	-0,14	0,38	-0,18	0,18	-0,16
Res. Senac	-0,27	1	-0,43	0,04	-0,35	0,45	-0,28	0,09
Elev. Senac	0,35	-0,43	1	-0,1	0,43	-0,08	0,44	0,09
Res. Celg	-0,14	0,04	-0,1	1	-0,04	0,22	0,17	0,65
Elev. Cascalho	0,38	-0,35	0,43	-0,04	1	-0,31	0,4	-0,08
Res. PL	-0,18	0,45	-0,08	0,22	-0,31	1	-0,31	0,39
Elev. PL	0,18	-0,28	0,44	0,17	0,4	-0,31	1	0,15
Res. Serrinha	-0,16	0,09	0,09	0,65	-0,08	0,39	0,15	1

Testes foram feitos para determinar qual a melhor forma de seleção das variáveis hidráulicas do sistema. A Tabela 12 é uma relação dos tipos de critérios investigados. O primeiro critério, selecionar todas as variáveis do sistema, apresentou resultados inferiores, além de ser uma opção onerosa em termos computacionais para grandes sistemas. No segundo escolhem-se as unidades que estão a jusante e a montante para compor as entradas. No terceiro calcula-se a correlação linear entre todas as variáveis e emprega-se um dado valor de corte (no caso adotou-se 0,1) acima do qual a unidade é escolhida. Como foi notado que o segundo e terceiro critério eram equivalentes, optou-se pelo da vizinhança (segundo) por ser de implementação mais simples.

Tabela 12: Erros Conforme as Entradas da Rede Neural.

Unidade	Seleção Entradas	Erros < 50% (%)	Erros < 20% (%)	Erros < 10% (%)
Senac	todas	19	7	3
Senac	vizinhança	24	12	6
Senac	correlação > 0.1	27	8	3
Celg	todas	45	19	12
Celg	vizinhança	45	21	8
Celg	correlação > 0.1	48	19	8
PL	vizinhança	60	33	16
PL	correlação > 0.1	55	30	17
Serrinha	vizinhança	51	24	9
Serrinha	correlação > 0.1	37	16	7

Através da Tabela 13 é apresentado um exemplo de outros testes realizados. A partir destes optou-se pela RNA com uma camada oculta, com número de neurônios igual ao do número de variáveis de entrada, pois esta configuração reduz a carga computacional além de fornecer melhores resultados.

A seguir, verificou-se a aplicação de redes RBF ao modelo, obtendo os erros constantes da Tabela 14. Notou-se que os resultados são piores do que os conseguidos com as redes MLP, além de exigir uma quantidade maior de memória para sua execução devido ao número elevado de neurônios necessários.

Redes neurais do tipo mapas auto-organizáveis (SOM) também foram testadas com a intenção de obter algum esclarecimento do mapeamento que este tipo de RNA produz. Todavia, quando treinou-se esta RNA ela criava um quantidade de grupamentos igual ao número de entradas configuradas, não se adequando aos objetivos do nosso modelo.

Tabela 13: Erros Conforme a Arquitetura da Rede Neural.

Unidade	Camadas ocultas	Neurônios camada oculta	Erros<50% (%)	Erros<20% (%)	Erros<10% (%)
Senac	1	igual entradas	28	11	7
Senac	1	dobro entradas	27	9	7
Senac	2	igual entradas	23	10	5
Senac	2	dobro entradas	18	8	3
Celg	1	igual entradas	45	19	12
Celg	1	dobro entradas	44	24	12
Celg	2	igual entradas	45	18	8
Celg	2	dobro entradas	30	13	7
PL	1	igual entradas	52	30	17
PL	2	dobro entradas	45	19	10
Serrinha	1	igual entradas	51	20	12
Serrinha	2	dobro entradas	44	18	10

Tabela 14: Erros para a Arquitetura RBF.

Unidade	Neurônios camada oculta	Erros<50% (%)	Erros<20% (%)	Erros<10% (%)
Senac	500	28	11	6
Celg	500	44	19	10
PL	500	57	32	16
Serrinha	500	43	21	8
Senac	1000	22	10	4

Nos treinamentos, um número de épocas entre 300 e 500 mostrou-se satisfatório pois o erro estabilizava-se para valores maiores. O tempo de treinamento variou entre 5 e 15 min. Foi utilizado um computador com um processador Athlon® 2.4+ GHz e 512 mebibytes (MiB) de memória. O *software* escolhido foi o MATLAB® versão 6.1 com o *Neural Network Toolbox* utilizando o ambiente operacional Windows 98 da Microsoft.

5.1.2 Previsão de Nível para as Próximas 24 Horas

Com os resultados das redes treinadas para a previsão da próxima hora, estendeu-se para as próximas 24 horas utilizando a divisão em subsistemas e atualizando o nível do reservatórios a cada hora prevista (seção 3.1). O apêndice A mostra o *script* usado.

A Tabela 15 é o resultado da compilação de uma simulação para a segunda quinzena de abril/2002 e contém a média dos erros e do erro médio quadrático (*mean square error*

- MSE).

Tabela 15: Erros de Previsão Próximas 24 Horas

Unidade	Erros < 50% (%)	Erros < 20% (%)	Erros < 10% (%)	MSE
Senac	94	69	44	0,77
Celg	99	77	49	0,47
PL	83	49	29	1,14
Serrinha	93	65	39	0,91

Agora, se forem abordados os resultados de um ponto de vista dos níveis dos reservatórios, ou seja, relativizando mais os resultados tem-se a Tabela 16. Nesta são apresentados os níveis de segurança destes reservatórios, os maiores erros tanto para maior quanto para menor, e também o erro médio percentual, *Mean Absolute Percentage Error*(MAPE). Necessita porém um gerenciamento dos riscos pois há uma dispersão nos resultados com valores que comprometem o funcionamento seguro do sistema de água.

Tabela 16: Erros de Previsão das Próximas 24 Horas e Níveis de Segurança.

	MAPE (%)	Maior erro acima	Maior erro abaixo	Nível mínimo segurança	Nível máximo segurança
Senac	25,73	1,35	-2,65	1,00	4,00
Celg	15,63	1,18	-1,26	1,00	4,00
Pl	26,23	1,99	-4,01	1,50	5,85
Serrinha	18,85	1,65	-2,72	1,00	5,85

As figuras 25 e 26 apresentam algumas previsões obtidas por uma RNA para datas diferentes.

5.2 Otimização do Bombeamento

Continuando a utilizar a mesma base de dados da previsão de níveis, aplicou-se algoritmos genéticos no modelo conforme explanado no capítulo 4.

5.2.1 Ferramenta de Algoritmo Genético

Para aplicação do AG manteve-se o Matlab®, mas agora trabalhando com a versão 7.0 que possui o *toolbox* de AG, para aplicação de otimização, através de sua *Genetic*

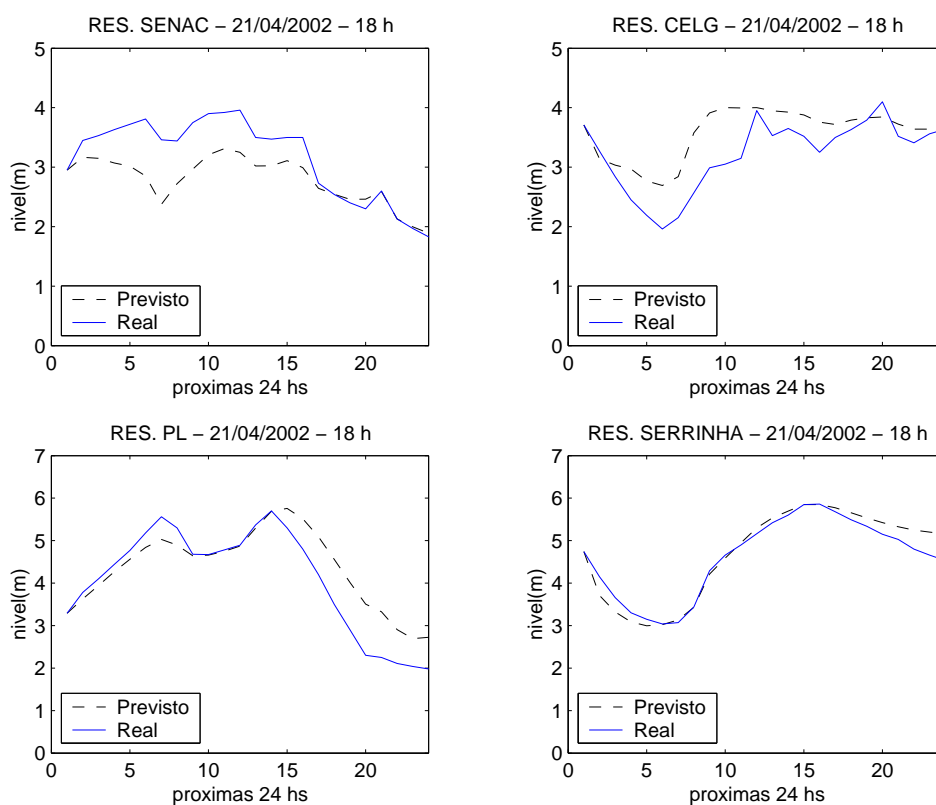


Figura 26: Previsão de Níveis das Próximas 24 Horas dos 4 Maiores Reservatórios do SDA João Leite, com Nível Inicial Tomado às 18 Horas do Dia 21/04/2002.

CrossoverFraction: 0.8000;	fração dos indivíduos da próxima geração que são criados por cruzamento (valor padrão)
Generations: 100;	limite do número máximo de gerações (valor padrão)
TimeLimit: Inf	limite de tempo execução (infinito) (valor padrão)
StallLimitG: 50	limite de gerações sem evolução na aptidão (valor padrão)
StallLimitS: 20	limite de tempo sem evolução na aptidão (valor padrão)
InitialPopulation: []	população inicial, modificamos para obter melhores resultados, ver próxima seção
SelectionFcn: @selectionstochunif;	função de seleção estocástica uniforme

A Figura 27 mostra um cromossomo de um indivíduo com a representação do bombeamento ao longo do período otimizado.

hora inicial																	...
JL							Senac				Cascalho				PL		...
b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b1	b2	b3	b4	b1	b2	b3	b4	b1	b2	...

Figura 27: Cromossomo Representando as Unidades a Serem Otimizadas do SDA João Leite de Goiânia.

Os parâmetros do AG que melhor obtiveram resultados podem assim ser resumidos:

- Número de gens: 408;
- Taxa de cruzamento: 0,80;
- Taxa de mutação: 0,01;
- Seleção uniforme;
- Tamanho da população: 20 ;
- Número de gerações: 100;

5.2.2 Aplicação do Algoritmo Genético

No mesmo equipamento (*hardware*) no qual foi implementado o modelo de previsão, executamos o de otimização, levando em torno de 5 min para uma população com 20 indivíduos. No apêndice B está o *script* que executa o AG e no C o código da função de aptidão utilizada.

Uma das vantagens do AG é a facilidade de compreensão de como se chega à solução, pode-se visualizar desde sua população inicial até a geração final. E isto facilitou sobremaneira o entendimento de algumas dificuldades encontradas.

Primeiramente tinha-se sempre uma solução com muito chaveamento das bombas, o que era compreensível do ponto de vista somente de uma otimização de controle de nível de tanques que tenta manter o nível constante. Mas isto foi corrigido com ajuste para maior do peso de chaveamento.

Outra dificuldade surgiu com as soluções que tendiam quase sempre para um funcionamento intermediário, manutenção de um conjunto constante de 5 bombas em funcionamento da elevatória João Leite, que possui 7 bombas. O tamanho da população foi

variado para se obter uma maior diversidade da população inicial, chegando até 200 indivíduos, mas não melhorou a solução. Então, observou-se a população inicial e percebeu-se uma distribuição uniforme aleatória não havendo indivíduos com todos cromossomos da EAT João Leite ativados, o que é uma operação típica da elevatória que trabalha o dia todo a plena capacidade. Quando foi introduzido indivíduos na população inicial que se aproximavam da atual operação do sistema, obtivemos soluções melhores. Julgou-se que essa primeira elevatória, por ter o maior consumo de energia estava convergindo para um ótimo local na posição intermediária ¹.

Também foi percebido que teríamos de dividir os pesos, ou objetivos, da otimização em duas fases: na primeira, correspondente ao horário fora de ponta, a meta é se atingir o maior nível dos reservatórios possível; e na segunda, no horário de ponta, a prioridade é economizar energia, mantendo os níveis acima do crítico. Isto foi conseguido, manipulando-se os pesos convenientemente, na seção 5.2.3 são indicados os valores com melhores resultados.

Focaram-se as simulações de otimização no período onde pode-se ter maiores ganhos, ou seja, iniciando às 21 horas até as 21 horas do outro dia.

5.2.3 Bombeamento Otimizado

Foram encontradas várias soluções que se mostraram como possíveis otimizações na operação do sistema para a época em que foram obtidos os dados. O sistema apresenta pouca flexibilidade para ganhos com otimização nas manobras do bombeamento, pois o aumento gradual da população da cidade exige mais da produção. Entretanto há um pequeno espaço para melhoria.

Nas figuras 29 e 30 é mostrada uma programação de bombeamento que foi obtida para o dia 18 de abril iniciando às 21 horas, com os seguintes pesos das 21 às 18 horas do dia seguinte: $c_{energia} = 0.1$, $c_{nvel} = 0$, $c_{chaveamento} = 1$, $c_{volume} = 1$; e das 18 as 21 horas: $c_{energia} = 1$, $c_{nvel} = 1$, $c_{chaveamento} = 1$, $c_{volume} = 0$, a Figura 28 ilustra esta distribuição. O custo/consumo energia² de 131.472 kWh para a operação otimizada e 151.368 kWh para a registrada.

Na Tabela 17 são listados os resultados da otimização da segunda quinzena de abril utilizando os pesos referidos no último parágrafo.

¹Ressaltando que as elevatórias possuem as seguintes potências aproximadas: JL 4 MW, Senac 0,9 MW, Cascalho 0,9 MW e PL 0,3 MW.

²Ver 4.2.

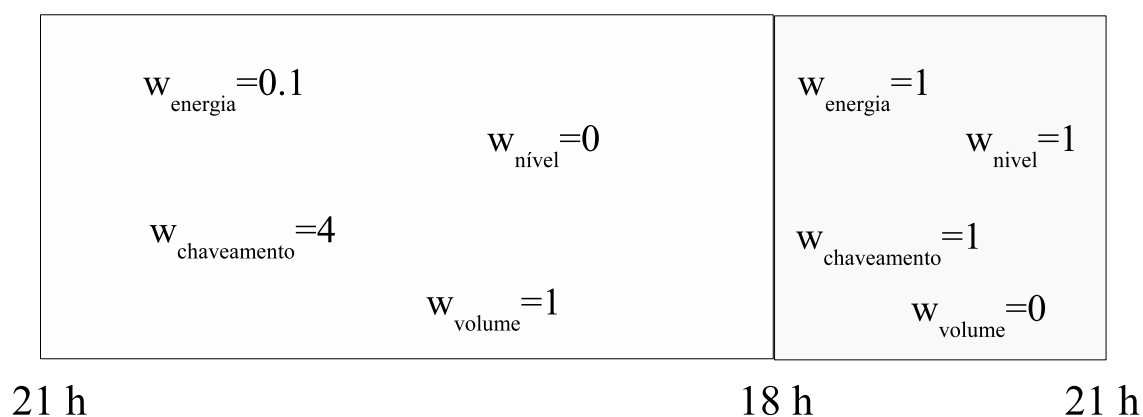


Figura 28: Pesos da Função Objetivo por Horário.

Como pode ser visto, houve uma diferença média favorável de 16 % em energia elétrica. Mas, uma vez que a conta de energia é composta não somente deste fator (energia), conforme podemos ver no Anexo C obtido do sistema de gerenciamento de energia (SGE) da Saneago, calculou-se que este custo representa em média 58% destas faturas (histórico do SGE para o período de teste). Assim, no global tem-se uma redução de custo de 9%.

Tabela 17: Resultados Otimização de 16 a 30 de Abril/2002.

Dia	Aptidão ótimo*	Aptidão histórico*	Energia ótimo (kWh)	Energia histórico (kWh)
16	0.015152	0.014433	142.250	157.840
17	0.013072	0.013511	133.040	151.370
18	0.013180	0.014258	138.560	155.230
19	0.022145	0.021976	152.570	158.770
20	0.021427	0.023645	151.390	168.310
21	0.013072	0.012953	136.320	153.760
22	0.013072	0.015029	135.460	149.220
23	0.015152	0.014238	146.410	159.220
24	0.017893	0.014214	149.950	166.390
25	0.013072	0.015478	135.530	162.410
26	0.013072	0.013511	136.780	161.180
27	0.015152	0.015687	146.000	165.790
28	0.015152	0.013862	141.920	145.760
29	0.013072	0.009613	137.340	145.020
30	0.015152	0.016173	147.590	164.560
Média	0.014465	0.015238	132.438	157.655

* Resultado da função aptidão aplicada ao funcionamento do bombeamento (adimensional).

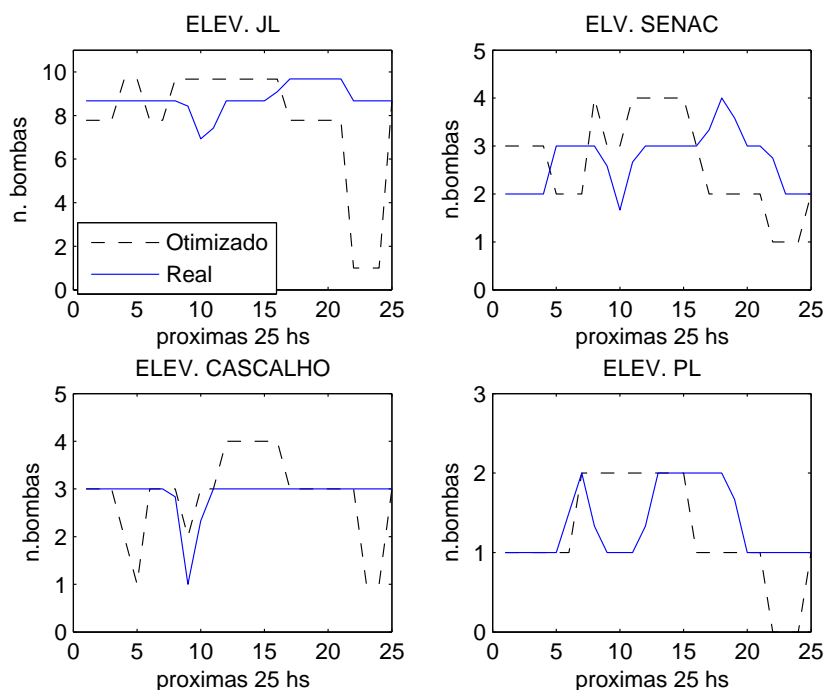


Figura 29: Bombeamento otimizado, para as próximas 25 h, do SDA João Leite, dia 18/04/2004 iniciando às 21 h.

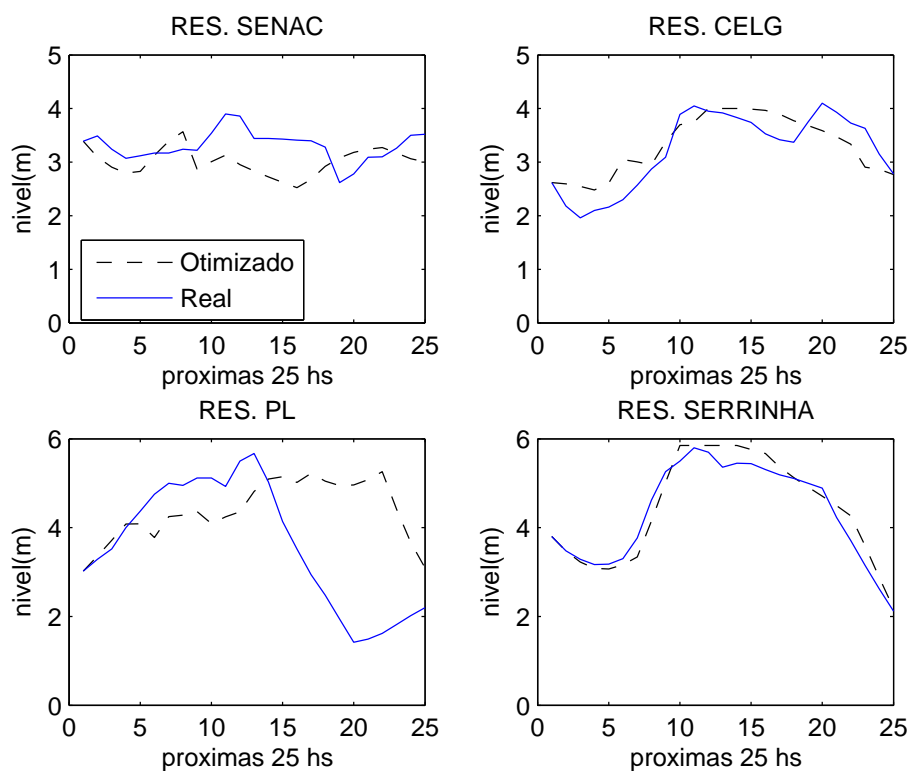


Figura 30: Nível dos reservatórios, com o bombeamento otimizado para as próximas 25 h, do SDA João Leite, dia 18/04/2004 iniciando às 21 h.

6 Conclusão

Optou-se por utilizar redes neurais artificiais, ferramentas que captam o comportamento do sistema, abstraindo algumas de suas características físicas mas ganha-se com a facilidade de obtenção de informações necessárias à modelagem. Não foi necessário conhecer quais tubulações ligam reservatórios, seu diâmetro ou sua rugosidade que frequentemente são de difícil conhecimento. Os dados do funcionamento operacional foram obtidos das anotações horárias de nível de reservatório e *status* do bombeamento feita pelos operadores, já disponíveis portanto. Assim não foi necessário implementar um sistema de telemetria *online*, com medidores de vazão ou pressão, embora não vejamos empecilho em adicionar estes ao modelo.

Focou-se o trabalho somente no essencial: o controle de nível de reservatórios e otimização de bombeamento, tarefa básica da maioria dos Sistemas de Distribuição de Água. Procurou-se usar uma ferramenta de fácil implantação em qualquer lugar e que traga benefícios reais aos operadores.

Alguns recursos foram sacrificados no modelo que seriam conseguidos com um simulador hidráulico: pode-se prever o comportamento atual, mas o acréscimo ou eliminação de unidades no SDA exigirá o retreinamento da rede neural com novas informações históricas, por exemplo. O mesmo acontece com o crescimento vegetativo da rede de água.

Utilizando redes neurais MLP de várias camadas e treinamento por retropropagação conseguiu-se obter bons resultados. Testou-se também redes RBF com resultados similares. O fato é que estas redes têm capacidade de reconhecimento de padrões, e claramente era este o problema.

A tarefa mais crítica foi a definição da estratégia de abordagem do problema de uma rede de água. A divisão da rede em subredes, centrada em reservatórios e propagando suas variações a cada hora, mostrou-se valiosa, pois permitiu dividirmos o problema com cada rede tendo uma única saída e um menor número de entradas, no caso escolhida as vizinhas, ficando computacionalmente mais simples. Um aspecto interessante desta abordagem foi

a considerável redução do erro quando fazemos a previsão para 24 h, pulamos das faixas de 27% dos erros menores que 50% para mais que 90% melhores que isto. Aparentemente há uma compensação dos erros de uma iteração horária para outra.

A definição das variáveis condicionantes também foi importante para a previsão ser a contento. Tinha-se inicialmente, após pesquisa de outros trabalhos, um leque grande de fatores que influenciavam o consumo, os quais conseguimos reduzir a um grupo de informações factíveis de serem obtidas: níveis dos reservatórios, *status* dos bombeamentos, dia da semana, temperatura média, umidade e precipitação.

Ainda que os erros obtidos mostrem-se altos em alguns casos - o que operacionalmente é um risco inaceitável - a média dos erros apresenta um valor razoável considerando-se as dimensões dos reservatórios envolvidos, ou seja, poderia-se trabalhar com ela dentro de um nível de risco aceitável, necessitando porém um gerenciamento dos riscos envolvidos.

Adotando-se algoritmos genéticos para otimização, pode-se comprovar o motivo de seu amplo uso atualmente. É uma ferramenta de aplicação simples e de resultados claros.

O tratamento pelo método dos pesos simplificou a abordagem da otimização, mas apresentou grande sensibilidade quanto à combinação de valores dos mesmos. Demandam bastante critério e tempo para ajustá-los.

Nas simulações, a economia de 9% no custo de energia elétrica obtida com a otimização é muito expressivo, ou tomando-se como referência os valores das contas de energia do Anexo C tem-se um custo mensal com eletricidade de R\$ 399.743,22, assim a redução seria da ordem de R\$ 36.000 mensais. Sendo o investimento para se consegui-la baixo, compreendendo somente o desenvolvimento de *software* e treinamento dos operadores.

Tem de ser ponderado, entretanto, que os resultados da otimização são de quase três anos atrás, e portanto, devido ao crescimento vegetativo e migratório da cidade, a flexibilidade do sistema de distribuição de água de Goiânia talvez tenha diminuído, comprometendo a otimização operacional e redução no custo de energia elétrica.

Sugestões para trabalhos futuros

Durante a definição dos objetivos da pesquisa e andamento da mesma surgiram uma série de tópicos que merecem investigação, criando uma ferramenta mais versátil e abrangente para o controle operacional de SAA, a saber:

- Transformar o modelo de previsão em um aplicativo independente do Matlab®;
- Desenvolver um modelo de controlador para o SDA;

-
- Incorporar ao modelo análise de riscos;
 - Pesquisar ferramentas de otimização multi-objetivo e outros métodos de otimização;
 - Testar como o modelo se comporta quando há um defeito em alguma unidade do SDA;
 - Verificar o impacto de se trabalhar com previsões meteorológicas ao invés de dados registrados.

Referências

- ABRAHAM, A.; BAIKUNTH, N. A neuro-fuzzy approach for modelling electricity demand in victoria. *Applied Soft Computing Journal*, Elsevier Science, v. 1/2, p. 127–138, Setembro 2001.
- ABRAHAM, A.; NATH, B. Neuro-fuzzy system for intelligent reactive power factor. In: *The Second International Conference on Computers In Industry*. [S.l.: s.n.], 2000.
- AN, A. et al. Discovering rules from data for water demand prediction. In: *IJCAI'95*. Montreal, Canada: [s.n.], 1995.
- AZEVEDO, F. M.; BRASIL, L. M.; OLIVEIRA, R. C. L. *Redes Neurais com Aplicações em Controle e em Sistemas Especialistas*. Brasil: Visual Books, 2000. 401p.
- BARBOSA, J. M. S. et al. Operação otimizada de parte do sistema adutor de Água de campina grande-pb. In: *II Serea - Seminário Hispano-brasileiro sobre sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. [S.l.: s.n.], 2002.
- BARGIELA, A. Managing uncertainty in operational control of water distribution systems. *Integrated Computer Application*, Ed. B Coulbeck, v. 1, p. 353–363, Julho 1993.
- BHATTACHARYA, M.; ABRAHAM, A.; BAIKUNTH, N. A linear genetic programming approach for modeling electricity demand prediction in victoria. *Information Systems, Advances in Soft Computing*, Physica Verlag, Germany, p. 379–394, 2002.
- CANG, S. *Radial Basis Function(RBF) Networks*. 2004. Disponível em: <www.dcs.ex.ac.uk/studyRes/COM6402/RBF_NN1.ppt>. Acesso em: set. 2004.
- CARRIJO, I. B. *Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.
- CASTILLO, L.; GONZALES, A. *Fuzzy Optimization of Distribution Networks by using Genetic Algorithms*. [S.l.], Outubro 1995.
- CHIAVENATO, I. *Introdução à Teoria Geral da Administração*. São Paulo: McGraw-Hill, 1983. 617p.
- COBRA, M. *Administração de marketing*. São Paulo: Editora Atlas, 1992. 806p.
- COELLO, C. A. An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. *ACM Computing Surveys*, v. 32, n. 2, p. 109–143, 2000. Disponível em: <citeseer.ist.psu.edu/coello98updated.html>.

- CURI, R. C.; CURI, W. F.; BARBOSA, D. L. Um estudo de caso da operação integrada ótima de três reservatórios para o reforço do abastecimento da rmr. In: *II Serea - Seminário Hispano-brasileiro sobre sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. [S.l.: s.n.], 2002.
- CURI, W. F.; FIRMINO, M. B. M. Um método de dimensionamento ótimo de redes pressurizadas malhadas via programação não linear e linear. In: *II Serea - Seminário Hispano-brasileiro sobre sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. [S.l.: s.n.], 2002.
- FERNANDES, A. M. R. *Inteligência artificial - Noções Gerais*. Brasil: Visual books, 2003. 160p.
- FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H. Utilização de algoritmos evolucionários multiobjetivos no dimensionamento de redes de abastecimento de água. In: *II Serea - Seminário Hispano-brasileiro sobre sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. [S.l.: s.n.], 2002.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização Combinatória e Programação Linear*. Brasil: Campus, 2000. 649p.
- GOMES, H. P. *Sistemas de Abastecimento de Água*. João Pessoa - PB: Editora Universitária UFPB, 2004. 242p.
- HARTLEY, J.; BARGIELA, A. Probabilistic simulation of large-scale water distribution systems. In: *Proceedings of European Simulation Symposium ESS 96, vol.2*. Genoa: [s.n.], 1996. p. 403–407.
- HAYKIN, S. *Redes Neurais Princípios e Prática*. Brasil: Bookman, 2002. 900p.
- HOSSEINZAMAN, A.; BARGIELA, A. A virtual node based water system simulator. *ADA User Journal*, Montreal, Canada, v. 15, n. 2, p. 86–94, July 1994.
- INMET. *Instituto Nacional de Meteorologia*. 2004. [Http://www.inmet.gov.br/](http://www.inmet.gov.br/), acessado em 09/2004.
- JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. E. *Água e Energia, Aproveitando as Oportunidades de Eficientização de Água e Energia não Exploradas nos Sistemas de Água Municipais*. USA: Alliance - Aliança para Conservação de Energia, 2002. 159p.
- JAMSHIDI, M. *Large-Scale Systems: Modeling, Control, and Fuzzy Logic*. USA: Prentice Hall, 1997. 578p.
- KASABOV, N. K. *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering*. England: MIT Press, 1998. 550p.
- KHAN, M. R.; ONDRUSEK, C.; ABRAHAM, A. Soft computing for developing short term load forecasting models in czech republic. *Advances in Soft Computing*, Physica Verlag, Germany, p. 207–222, 2002.
- KOVACS, Z. L. *Redes Neurais Artificiais*. Brasil: Collegium Cognitio, 1996. 174p.
- KRÖSE, B.; SMAGT, P. *An Introduction to Neural Networks*. Netherlands: University of Amsterdam, 1996. 135p.

- KUROKAWA, E. *Sistemática para Avaliação de Dados e Indicadores de Perdas em Sistemas de Distribuição de Água*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- LEON, C. et al. Explore: Expert system for water network management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, p. 65–74, Abril/Março 2000.
- MAYS, L. W.; YEOU-KOUNG, T. *Hydrosystems Engineering and Management*. USA: MC Graw Hill, 1992. 544p.
- MEDEIROS, C. F. *Notas de Aulas, Sistemas Públicos de Abastecimento de Água*. 2004. Disponível em: <<http://www.saneamento10.hpg.ig.com.br/>>.
- MIETTINEN, K. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. USA: Springer, 1999. 298p.
- MITCHELL, M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Massachusetts, USA: MIT Press, 1999. 162p.
- NETTO, J. M. A.; ALVAREZ, G. A. *Manual de Hidráulica*. 7ª edição. ed. Brasil: Edgard Blücher Ltda, 1982. 335p.
- NGUYEN, T. Ai techniques for prediction of short data series with unreliable data quality. In: *Kick Off Workshop on IAHS Decade of Prediction in Ungauged Basins(PUB)*. [s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.cig.ensmp.fr/iahs/PUBs/Brasilia-Papers/Nguyen.pdf>>. Acesso em: out. 2004.
- OLIVEIRA, R. M.; LIMA, W. S. Gerenciamento de energia em uma empresa de saneamento. *Revista Eletricidade Moderna*, n. 304, Julho 1999.
- PNDCA. *Indicadores de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água*. Brasil: [s.n.], 2003. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água - PNDCA.
- PRINCIPE, J. *The Electrical Engineering Handbook*. USA: CRC Press, 2000.
- PROCEL. *Guia Técnico: Eficiência Energética nos Sistemas de Saneamento*. Brasil: IBAM/DUMA, 2001. 76p.
- RAYNOR, W. *The International Dictionary of Artificial Intelligence*. USA: AMACON, 1999. 318p.
- RIGHETTO, A. M. Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. In: *II Serea - Seminário Hispano-brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. [S.l.: s.n.], 2002.
- RUMANTIR, G.; HULME, M. *A Hybrid Backpropagation Network - Statistical Model for Water Demand Time-series Forecasting*. 1995. Disponível em: <citeseer.ist.psu.edu/316855.html>. Acesso em: set. 2004.
- SANTOS, C. *Conservação de energia elétrica em sistemas públicos de abastecimento de água: otimização operacional da rede de Macapá*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 1999.

- SANTOS, M. C. C.; GOMES, H. P. Simulação de cenários de operação de sistemas de distribuição de água através do método PNL2000. In: *II Serea - Seminário Hispano-brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. [S.l.: s.n.], 2002.
- SILVA, C. S.; BARBOSA, P. S. F. algoritmo do gradiente conjugado escalonada em rna para a previsão do consumo horário de água em sistemas de abastecimento. In: *II Serea - Seminário Hispano-brasileiro sobre sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. [S.l.: s.n.], 2002.
- SNIS. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2002*. Brasil: [s.n.], 2002. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS.
- SOARES, A. K.; REIS, L. F. R.; SILVA, F. G. B. Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (mshdp) com o suporte do epanet. In: *II Serea - Seminário Hispano-brasileiro sobre sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. [S.l.: s.n.], 2002.
- STEUER, R. E. *Multiple criteria optimization: theory, computation and application*. USA: Krieger Pub Co, 1989. 546p.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. *Metereologia e Climatologia*. Brasil: INMET, 2001. 515p.
- VIANA, G. M. *Sistemas Públicos de Abastecimento de Água*. 2001. 260p.
- WISTON, W. L. *Operation Research: Applications and Algorithms*. Belmont, California, USA: Duxbury Press, 1994. 1318p.

APÊNDICE A – Código do 'script' previsão de nível próximas 24 h

```

%Previsao de nivel da macro-distribuicao do Joao Leite nas proximas 24h
%Utilizando conjunto de teste separado por data - geralmente ultimos
  dias do universo
%Conjunto Test e indices: iSen...

hrs = 24; %horas de previsao
ls = size(Test,1)/3; %quantidade entradas de cada hora

mi = 1; %momento inicio previsao
mf = mi+hrs; %size(Test,2)-hrs;

ESen=[]; ECel=[]; EP1=[]; ESer=[]; for m=mi:mf

Sis = [Test(:,m)]; %estado atual do sistema
SisA = []; %estado hora anterior
Dt = [TestDt(m)]; %data inicio previsao
Hri = [Test(4,m)]; %hora inicial previsao
ISim = []; %entradas rede neural para simulacao
NSenR = []; %niveis Senac reais
NSenP = []; %previsoes niveis Senac proxs 24h
VSen =[]; %variacao nivel Senac na previsao
NCelR = []; %niveis Celg reais
NCelP = []; %previsoes niveis Celg proxs 24h
VCel =[]; %variacao nivel Celg na previsao
NP1R = []; %niveis P1 reais

```

```
NP1P = []; %previsoes niveis P1 proxs 24h
VP1 = []; %variacao nivel P1 na previsao
NSerR = []; %niveis Serrinha reais
NSerP = []; %previsoes niveis Serrinha proxs 24h
VSer = []; %variacao nivel Serrinha na previsao

for h=1:hrs
    ISim = [];
    OEst = [];
    %Senac - estimativa proxima hora
    for n=iSen
        ISim = [ISim;Sis(n)];
    end
    NSenR = [NSenR;Test(oSen-1,m+h)];
    ISimn = trammx(ISim,miniSen,maxiSen);
    OEstn = sim(netSen,ISimn);
    VSen = postmmx(OEstn,minoSen,maxoSen);

    %Celg - estimativa proxima hora
    ISim = [];
    OEst = [];
    for n=iCel
        ISim = [ISim;Sis(n)];
    end
    NCelR = [NCelR;Test(oCel-1,m+h)];
    ISimn = trammx(ISim,miniCel,maxiCel);
    OEstn = sim(netCel,ISimn);
    VCel = postmmx(OEstn,minoCel,maxoCel);

    %P1 - estimativa proxima hora
    ISim = [];
    OEst = [];
    for n=iP1
        ISim = [ISim;Sis(n)];
```

```
end
NP1R = [NP1R;Test(oPl-1,m+h)];
ISimn = trammx(ISim,miniPl,maxiPl);
OEstn = sim(netPl,ISimn);
VP1 = postmmx(OEstn,minoPl,maxoPl);

%Serrinha - estimativa proxima hora
ISim = [];
OEst = [];
for n=iSer
    ISim = [ISim;Sis(n)];
end
NSerR = [NSerR;Test(oSer-1,m+h)];
ISimn = trammx(ISim,miniSer,maxiSer);
OEstn = sim(netSer,ISimn);
VSer = postmmx(OEstn,minoSer,maxoSer);

%Atualizacao do sistema
SisA = Sis;
Sis = [Test(:,m+h)];

%Senac
Sis(oSen) = VSen;
Sis(oSen-1) = SisA(oSen-1) + VSen;
if Sis(oSen-1)<0
    Sis(oSen-1) = 0;
end
if Sis(oSen-1)>4
    Sis(oSen-1) = 4;
end
NSenP = [NSenP;Sis(oSen-1)];

%Celg
Sis(oCel) = VCel;
```

```

Sis(oCel-1) = SisA(oCel-1) + VCel;
if Sis(oCel-1)<0
    Sis(oCel-1) = 0;
end
if Sis(oCel-1)>4
    Sis(oCel-1) = 4;
end
NCelP = [NCelP;Sis(oCel-1)];

%PL
Sis(oPl) = VPl;
Sis(oPl-1) = SisA(oPl-1) + VPl;
if Sis(oPl-1)<0
    Sis(oPl-1) = 0;
end;
if Sis(oPl-1)>5.85
    Sis(oPl-1) = 5.85;
end;
NP1P = [NP1P;Sis(oPl-1)];

%Serrinha
Sis(oSer) = VSer;
Sis(oSer-1) = SisA(oSer-1) + VSer;
if Sis(oSer-1)<0
    Sis(oSer-1) = 0;
end;
if Sis(oSer-1)>5.85
    Sis(oSer-1) = 5.85;
end;
NSerP = [NSerP;Sis(oSer-1)];

end

ESen = [ESen;NSenP(end)-NSenR(end)]; ECel =
[ECel;NCelP(end)-NCelR(end)]; EP1 = [EP1;NP1P(end)-NP1R(end)];

```

```
ESer = [ESer;NSerP(end)-NSerR(end)]; disp([num2str(m),'
',num2str(ESen(end)),' ',num2str(ECel(end)),'
',num2str(EPl(end)),' ',num2str(ESer(end))])
end %for m

%figure('Position',[100,600,630,450])
subplot(2,2,1); plot(NSenP,'k--') hold on plot(NSenR)
legend('Previsto','Real',3) axis([0 hrs 0 5]) title(['RES.
SERRINHA - ',Dt{1},' - ',num2str(Hri),' h']) xlabel(['proximas
',num2str(hrs),' hs']) ylabel('nivel(m)')

%figure('Position',[850,600,630,450])
subplot(2,2,2); plot(NCelP,'k--') hold on plot(NCelR,'b')
legend('Previsto','Real',3) axis([0 hrs 0 5]) title(['RES. CELG -
',Dt{1},' - ',num2str(Hri),' h']) xlabel(['proximas
',num2str(hrs),' hs']) ylabel('nivel(m)')

%figure('Position',[100,50,630,450])
subplot(2,2,3); plot(NPlP,'k--') hold on plot(NPlR,'b')
legend('Previsto','Real',3) axis([0 hrs 0 7]) title(['RES. PL -
',Dt{1},' - ',num2str(Hri),' h']) xlabel(['proximas
',num2str(hrs),' hs']) ylabel('nivel(m)')

%figure('Position',[850,50,630,450])
subplot(2,2,4); plot(NSerP,'k--') hold on plot(NSerR,'b')
legend('Previsto','Real',3) axis([0 hrs 0 7]) title(['RES.
SERRINHA - ',Dt{1},' - ',num2str(Hri),' h']) xlabel(['proximas
',num2str(hrs),' hs']) ylabel('nivel(m)')
```

APÊNDICE B – Código do 'script' execução AG

```

%clear all

global S SSI % states next hours (j1): mes..hora,precipit..umidade,ejl..vser
global IPP IRE IHO %index pump, index reservoir, indice hora
global MAXE MAXN MAXO MAXV %maxima energia cons. bombas, maximo custo
operacao
global MAXC %combinacao maxima de bombas da elevatoria
global PP T SL CL ML %potencia bombas, tarifa ponta, nivel seguranca, nivel
critico, nivel maximo resevatorios
global BTHS ETHS % inicio THS, fim THS(hora)
global EW NW OW VW %peso energia, peso nível seguro e mínimo, peso n.
operacoes bombas, peso volume final reservatorios
global HO %periodo otimizacao(horas)
global AR VR %area reservatorios, volume reservatorios
global IEJL IESEN IECAS IEPL %indice das elevatorias na matriz estados
global miniSen maxiSen netSen minoSen maxoSen iSen oSen global
miniCel maxiCel netCel minoCel maxoCel iCel oCel global miniPl
maxiPl netPl minoPl maxoPl iPl oPl global miniSer maxiSer netSer
minoSer maxoSer iSer oSer

load('SisEvCJLFF1L1xn3.mat')
%LimpaIndice
load('IniPop.mat')

IPP = [8 12 16 20]; IRE = [10 14 18 22]; IHO = 4;

```

```

PP = [409,256,245,123]; %EATJL~500cv,senac~312.5cv,cascalho~300cv,PL~150cv
T = [2,2,2,8]; %EATJL-azul,senac-azul,cascalho-azul,PL-verde
MAXE = ((4+6)*PP(1)* T(1) + 4*PP(2)* T(2) + 4*PP(3)* T(3) +
2*PP(4)* T(4)) * 3 + ((4+6)*PP(1) + 4*PP(2) + 4*PP(3) +
2*PP(4)) * 21; MAXN = size(IRE,2) * 24;
MAXC = [10,4,4,2]; %ejl,esenac,ecascalho, eserrinha
MAXO = sum(MAXC) * 24/3; %/3 aproximar da media operacional e tornar
        custo significativo
VR = [40000 10000 10000 10000]; MAXV = sum(VR); ML =
[4,4,5.85,5.85]; AR = VR ./ ML; SL = ML*0.3; CL = [1,1,1.5,1];
BTHS = 18; ETHS = 21; IEJL = 8; IESEN = 12; IECAS = 16; IEPL = 20;

%rodando ga
%Preparando para o THS
%mi = 45; %inicio otimizacao(indice do vetor Test)
mii = mi; HO = 21; EW = 0.1; NW = 0; OW = 4; VW = 1; S = []; S =
[Test(:,mi:mi+HO)]; sa = size(IniPop); for i=sa:HO+1
    IniPop(:,end-16:end) = []; %adequando o tamanho populacao inicial as
        horas de otimizacao
end options =
gaoptimset('PopulationSize',20,'PopulationType','bitstring','InitialPop',
        IniPop)
[slto cso reason output population scores] = ga(@FitnessFcn,
17*HO, options) SSI = S; SSI = PutOp2Sis(SSI,slto); SSI =
PrevNivel(SSI);
%Operando no THS
mi = mi + HO; HO = 3; EW = 1; NW = 1; OW = 1; VW = 0; S = [];
S = [Test(:,mi:mi+HO)]; %o novo periodo de otimizacao, iniciando no fim do
        anterior
S(:,1) = SSI(:,end); options =
gaoptimset('PopulationSize',20,'PopulationType','bitstring') [slto
cso reason output population scores] = ga(@FitnessFcn, 17*HO,
options)
%juntando os dois

```



```
ssip = S; ssip = PutOp2Sis(ssip,slto); ssip = PrevNivel(ssip); sa
= size(ssip,2); SSI(:,end:(end+sa-1)) = ssip(:,1:sa); S = []; S =
[Test(:,mii:mi+H0)];
```

```
%funcao desempenho para operacao original
ctr(end+1) = Cost(S); enr(end+1) = Energia(S); disp(['Aptidao
operacao original ',num2str(ctr(end))]) disp(['Energia operacao
original ',num2str(enr(end))])
```

```
%operacao do sistema otimizada, obtendo niveis em SSI das
%operacoes(slto)obitdas
ctp(end+1) = Cost(SS1); enp(end+1) = Energia(SS1); disp(['Aptidao
operacao otimizada ',num2str(ctp(end))]) disp(['Energia operacao
otimizada ',num2str(enp(end))])
```

```
%PlotSis(S,SSI,2)
```

```
%load('D:\MATLAB7\toolbox\matlab\audiovideo\gong.mat')
%wavplay(y,Fs)
```

APÊNDICE C – Código da função aptidão

```

function c = Cost(Sis)
%Custo programacao bombeamento
    global HO IPP IRE T SL CL IHO PP
    global MAXE MAXN MAXO MAXV EW NW OW VW AR
    sb = size(IPP,2); %n. bombeamentos
    sr = size(IRE,2); %n. reservatórios
    nc = 0;
    ec = 0;
    oc = 0;
    vc = 0;
    for j=1:HO
        %custo bombeamento
        for i=1:sb
            %custo energia
            if Sis(IHO,j)>=18 & Sis(IHO,j)<21
                ec = ec + T(i)*Sis(IPP(i),j)*PP(i); %THS
            else
                ec = ec + Sis(IPP(i),j)*PP(i);
            end
            %custo operacoes bombas
            if Sis(IPP(i),j+1) > Sis(IPP(i),j)
                oc = oc + abs((Sis(IPP(i),j+1) - Sis(IPP(i),j)));
            end
        end
        %custo niveis
        for i=1:sr

```

```
        if Sis(IRE(i),j+1)<SL(i)    %nivel menor que o seguro
            nc = nc + 0.5;    %0.5 penalidade
        end
        if Sis(IRE(i),j+1)<CL(i)    %nivel menor que critico
            nc = nc + 1;    %1 panalidade
        end
    end
end
%custo volume final
for i=1:sr
    vc = vc + Sis(IRE(i),end)*AR(i);
end
ec = (ec / MAXE)^2; %normalizando
nc = (nc / MAXN)^2;
oc = (oc / MAXO)^2;
vc = (1 - vc/MAXV)^2; %custo inversamente proporcional ao volume
c = EW*ec + NW*nc + OW*oc + VW*vc
end %Cost
```


ANEXO B - Dados meteorológicos diários do INMET

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA
INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET
SEÇÃO DE OBSERVAÇÃO METEOROLÓGICA APLICADA - SEOMA
10º DISME GO/TO
Praça Cívica nº 100 - 74.003-010 - Caixa Postal 107
Tel/Fax: (0xx62) 212-2667 / 213-6767
GOIÂNIA BRASIL <http://www.inmet.gov.br>

DADOS METEOROLÓGICOS DIÁRIO

ESTAÇÃO: Goiânia - GO
Da Cuba do Barômetro
743.13 m
DA ESTAÇÃO (Hp):
741.48m

Nº 83423

PERÍODO: Jan/02 a Abr/02

ALTITUDE: 16° 40'S

LONGITUDE: 49° 15' W

Tabela 18: Dados Meteorológicos Diários do INMET.

PERÍODO	Precipitação	PERÍODO	Precipitação	PERÍODO	Precipitação	PERÍODO	Precipitação
01/01/2002	0,4	01/02/2002	34,6	01/03/2002	0,0	01/04/2002	0,0
02/01/2002	12,6	02/02/2002	0,8	02/03/2002	0,0	02/04/2002	0,0
03/01/2002	0,0	03/02/2002	5,2	03/03/2002	0,0	03/04/2002	0,0
04/01/2002	0,0	04/02/2002	0,0	04/03/2002	0,0	04/04/2002	0,0
05/01/2002	13,9	05/02/2002	5,8	05/03/2002	9,4	05/04/2002	0,0
06/01/2002	22,9	06/02/2002	13,9	06/03/2002	22,9	06/04/2002	0,0
07/01/2002	27,6	07/02/2002	0,0	07/03/2002	0,2	07/04/2002	0,0
08/01/2002	2,5	08/02/2002	4,8	08/03/2002	0,1	08/04/2002	3,8
09/01/2002	16,7	09/02/2002	11,0	09/03/2002	0,0	09/04/2002	1,4
10/01/2002	18,2	10/02/2002	4,4	10/03/2002	0,0	10/04/2002	0,0
11/01/2002	9,7	11/02/2002	3,8	11/03/2002	0,0	11/04/2002	2,6
12/01/2002	0,2	12/02/2002	7,7	12/03/2002	0,0	12/04/2002	0,6
13/01/2002	0,0	13/02/2002	7,5	13/03/2002	17,6	13/04/2002	0,0
14/01/2002	4,8	14/02/2002	29,5	14/03/2002	0,0	14/04/2002	19,1
15/01/2002	26,8	15/02/2002	25,6	15/03/2002	3,0	15/04/2002	0,0
16/01/2002	33,4	16/02/2002	0,0	16/03/2002	11,6	16/04/2002	0,0
17/01/2002	2,3	17/02/2002	57,7	17/03/2002	17,1	17/04/2002	0,0
18/01/2002	4,6	18/02/2002	44,7	18/03/2002	44,0	18/04/2002	0,0
19/01/2002	14,7	19/02/2002	67,4	19/03/2002	14,1	19/04/2002	0,0
20/01/2002	0,0	20/02/2002	32,0	20/03/2002	50,4	20/04/2002	0,0
21/01/2002	1,6	21/02/2002	0,0	21/03/2002	0,0	21/04/2002	0,0
22/01/2002	18,8	22/02/2002	0,0	22/03/2002	0,1	22/04/2002	0,0
23/01/2002	0,0	23/02/2002	0,0	23/03/2002	18,6	23/04/2002	0,0
24/01/2002	3,1	24/02/2002	0,0	24/03/2002	0,0	24/04/2002	0,0
25/01/2002	0,0	25/02/2002	8,0	25/03/2002	17,0	25/04/2002	0,0
26/01/2002	0,0	26/02/2002	26,2	26/03/2002	3,6	26/04/2002	0,0
27/01/2002	0,0	27/02/2002	7,4	27/03/2002	49,6	27/04/2002	0,0
28/01/2002	16,4	28/02/2002	0,0	28/03/2002	2,5	28/04/2002	0,0
29/01/2002	2,5			29/03/2002	0,0	29/04/2002	0,0
30/01/2002	0,0			30/03/2002	0,0	30/04/2002	0,0
31/01/2002	0,0			31/03/2002	0,0		

PERÍODO	Média Compensada	PERÍODO	Média Compensada	PERÍODO	Média Compensada	PERÍODO	Média Compensada
01/01/2002	24,0	01/02/2002	24,7	01/03/2002	25,1	01/04/2002	26,6
02/01/2002	25,3	02/02/2002	26,3	02/03/2002	25,9	02/04/2002	26,9
03/01/2002	26,5	03/02/2002	24,0	03/03/2002	26,6	03/04/2002	27,0
04/01/2002	24,6	04/02/2002	22,8	04/03/2002	25,6	04/04/2002	26,7
05/01/2002	24,5	05/02/2002	23,2	05/03/2002	24,3	05/04/2002	26,2
06/01/2002	25,7	06/02/2002	24,8	06/03/2002	24,4	06/04/2002	26,2
07/01/2002	24,6	07/02/2002	23,7	07/03/2002	24,7	07/04/2002	24,7
08/01/2002	24,2	08/02/2002	23,4	08/03/2002	26,7	08/04/2002	23,9
09/01/2002	22,7	09/02/2002	21,8	09/03/2002	27,5	09/04/2002	25,0
10/01/2002	21,6	10/02/2002	23,4	10/03/2002	27,7	10/04/2002	25,1
11/01/2002	24,3	11/02/2002	23,2	11/03/2002	26,1	11/04/2002	25,3
12/01/2002	25,1	12/02/2002	22,5	12/03/2002	24,4	12/04/2002	24,8
13/01/2002	24,6	13/02/2002	23,5	13/03/2002	26,0	13/04/2002	24,5
14/01/2002	23,8	14/02/2002	23,2	14/03/2002	26,9	14/04/2002	26,3
15/01/2002	22,1	15/02/2002	24,0	15/03/2002	24,3	15/04/2002	26,2
16/01/2002	22,9	16/02/2002	24,3	16/03/2002	25,2	16/04/2002	24,9
17/01/2002	23,4	17/02/2002	23,2	17/03/2002	22,5	17/04/2002	25,2
18/01/2002	23,1	18/02/2002	23,9	18/03/2002	24,5	18/04/2002	26,4
19/01/2002	23,6	19/02/2002	24,1	19/03/2002	23,6	19/04/2002	26,3
20/01/2002	25,2	20/02/2002	25,0	20/03/2002	25,2	20/04/2002	26,8
21/01/2002	23,8	21/02/2002	25,5	21/03/2002	25,1	21/04/2002	26,3
22/01/2002	26,6	22/02/2002	26,6	22/03/2002	23,3	22/04/2002	26,0
23/01/2002	25,7	23/02/2002	26,0	23/03/2002	24,4	23/04/2002	25,5
24/01/2002	26,7	24/02/2002	25,8	24/03/2002	23,4	24/04/2002	25,7
25/01/2002	27,3	25/02/2002	25,7	25/03/2002	23,3	25/04/2002	25,3
26/01/2002	26,9	26/02/2002	22,0	26/03/2002	25,0	26/04/2002	25,8
27/01/2002	25,1	27/02/2002	25,5	27/03/2002	23,7	27/04/2002	25,9
28/01/2002	24,9	28/02/2002	25,8	28/03/2002	26,5	28/04/2002	25,7
29/01/2002	25,9			29/03/2002	25,7	29/04/2002	25,2
30/01/2002	27,1			30/03/2002	26,2	30/04/2002	25,1
31/01/2002	24,6			31/03/2002	26,0		

PERÍODO	Umidade	PERÍODO	Umidade	PERÍODO	Umidade	PERÍODO	Umidade
01/01/2002	86%	01/02/2002	75	01/03/2002	46	01/04/2002	39
02/01/2002	71%	02/02/2002	63	02/03/2002	39	02/04/2002	40
03/01/2002	54%	03/02/2002	77	03/03/2002	38	03/04/2002	39
04/01/2002	71%	04/02/2002	80	04/03/2002	47	04/04/2002	36
05/01/2002	72%	05/02/2002	79	05/03/2002	41	05/04/2002	45
06/01/2002	71%	06/02/2002	73	06/03/2002	45	06/04/2002	37
07/01/2002	77%	07/02/2002	83	07/03/2002	52	07/04/2002	72
08/01/2002	83%	08/02/2002	83	08/03/2002	42	08/04/2002	45
09/01/2002	85%	09/02/2002	85	09/03/2002	45	09/04/2002	43
10/01/2002	88%	10/02/2002	83	10/03/2002	38	10/04/2002	43
11/01/2002	72%	11/02/2002	84	11/03/2002	43	11/04/2002	56
12/01/2002	71%	12/02/2002	87	12/03/2002	57	12/04/2002	65
13/01/2002	84%	13/02/2002	77	13/03/2002	51	13/04/2002	45
14/01/2002	73%	14/02/2002	81	14/03/2002	47	14/04/2002	47
15/01/2002	89%	15/02/2002	78	15/03/2002	60	15/04/2002	40
16/01/2002	89%	16/02/2002	78	16/03/2002	57	16/04/2002	57
17/01/2002	79%	17/02/2002	83	17/03/2002	68	17/04/2002	51
18/01/2002	88%	18/02/2002	79	18/03/2002	56	18/04/2002	40
19/01/2002	82%	19/02/2002	87	19/03/2002	56	19/04/2002	43
20/01/2002	71%	20/02/2002	73	20/03/2002	56	20/04/2002	37
21/01/2002	83%	21/02/2002	72	21/03/2002	56	21/04/2002	32
22/01/2002	62%	22/02/2002	61	22/03/2002	72	22/04/2002	46
23/01/2002	68%	23/02/2002	73	23/03/2002	56	23/04/2002	44
24/01/2002	58%	24/02/2002	75	24/03/2002	69	24/04/2002	37
25/01/2002	56%	25/02/2002	83	25/03/2002	68	25/04/2002	35
26/01/2002	61%	26/02/2002	87	26/03/2002	77	26/04/2002	34
27/01/2002	76%	27/02/2002	69	27/03/2002	62	27/04/2002	41
28/01/2002	79%	28/02/2002	53	28/03/2002	47	28/04/2002	33
29/01/2002	69%			29/03/2002	40	29/04/2002	32
30/01/2002	62%			30/03/2002	44	30/04/2002	40
31/01/2002	72%			31/03/2002	54		

Fonte: (INMET, 2004).

ANEXO C – Exemplo de conta energia das 4 maiores elevatórias do SDA João Leite da Saneago obtidas do SGE

EN139 MANTEM FATURA SANEAGO: 02/02/2005
 NUMERO CONTA ENERGIA: 1107199 - 0 ths EN139T02: 11:15:19
 REFERENCIA.....: 1 / 2002

 Numero do Processo.: / Numero da Fatura....: 22350
 Data Apresentacao...: 13-02-2002 Data do Vencimento...: 28-02-2002
 Codigo do Medidor...: 3
 Cidade....: GOIANIA Unid.Cons.Energia: EEAT JOAO LEITE
 Custo Energia Ativa: Ponta - 21.993,700 Fora Ponta - 73.692,470
 Custo Demanda Reg. : Ponta - 61.174,500 Fora Ponta - 21.315,760
 Custo Demanda Ultr.: Ponta - Fora Ponta -
 Custo Demanda Reat.: Ponta - Fora Ponta -
 Custo KVARH.....: Ponta - Fora Ponta -
 Custo KW 00-06...:
 Custo KWH 00-06...: 26.356,840
 Custo KVARH 00-06...: Devolucao Vl. Cobr.:

 Custo Taxa.....: Encargo emergencial:
 Custo Multa.....: ICMS encargo emerg.:
 Custo ICMS.....: 68.177,760 Iluminacao publica.:
 TOTAL FATURA.: 272.711,03

- CONTINUA ----- C A I E

PF 1-Aju 2-Con 3-Vol 4-Men 5-Exc 6-Can 7-RePg 8-AvPg 9-PFs 10-**

EN139 MANTEM FATURA SANEAGO: 02/02/2005
NUMERO CONTA ENERGIA: 1107207 - 6 ths EN139T02: 11:17:30
REFERENCIA.....: 1 / 2002

Numero do Processo.: / Numero da Fatura....: 22350
Data Apresentacao...: 13-02-2002 Data do Vencimento...: 28-02-2002
Codigo do Medidor...: 4
Cidade....: GOIANIA Unid.Cons.Energia: EEAT SENAC
Custo Energia Ativa: Ponta - 1.725,280 Fora Ponta - 9.037,520
Custo Demanda Reg. : Ponta - 8.868,750 Fora Ponta - 5.312,250
Custo Demanda Ultr.: Ponta - Fora Ponta -
Custo Demanda Reat.: Ponta - Fora Ponta -
Custo KVARH.....: Ponta - 646,980 Fora Ponta - 3.134,870
Custo KW 00-06...:
Custo KWH 00-06...: 2.655,530
Custo KVARH 00-06...: 178,270 Devolucao Vl. Cobr.:

Custo Taxa.....: Encargo emergencial:
Custo Multa.....: ICMS encargo emerg.:
Custo ICMS.....: 10.519,830 Iluminacao publica.:
TOTAL FATURA.: 42.079,28

- CONTINUA ----- C A I E

PF 1-Aju 2-Con 3-Vol 4-Men 5-Exc 6-Can 7-RePg 8-AvPg 9-PFs 10-***
11-*** 12-Sai

UM1A0005A CONSULTA EFETUADA.

4-© 1 Sess-1 172.16.1.70 5/23

EN139 MANTEM FATURA SANEAGO: 02/02/2005
NUMERO CONTA ENERGIA: 1106772 - X ths EN139T02: 11:18:18
REFERENCIA.....: 1 / 2002

Numero do Processo.: / Numero da Fatura....: 22350
Data Apresentacao...: 13-02-2002 Data do Vencimento...: 28-02-2002
Codigo do Medidor...: 1
Cidade....: GOIANIA Unid.Cons.Energia: EEAT CASCALHO
Custo Energia Ativa: Ponta - 3.938,440 Fora Ponta - 16.162,950
Custo Demanda Reg. : Ponta - 16.141,120 Fora Ponta - 5.371,270
Custo Demanda Ultr.: Ponta - Fora Ponta -
Custo Demanda Reat.: Ponta - Fora Ponta -
Custo KVARH.....: Ponta - 194,980 Fora Ponta - 766,570
Custo KW 00-06...:
Custo KWH 00-06...: 4.883,900
Custo KVARH 00-06...: 40,930 Devolucao Vl. Cobr.:

Custo Taxa.....: Encargo emergencial:
Custo Multa.....: ICMS encargo emerg.:
Custo ICMS.....: 15.833,420 Iluminacao publica.:
TOTAL FATURA.: 63.333,58

- CONTINUA ----- C A I E

PF 1-Aju 2-Con 3-Vol 4-Men 5-Exc 6-Can 7-RePg 8-AvPg 9-PFs 10-***
11-*** 12-Sai

UM1A0005A CONSULTA EFETUADA.

4-© 1 Sess-1 172.16.1.70 5/23

EN139 MANTEM FATURA SANEAGO: 02/02/2005
NUMERO CONTA ENERGIA: 1131312 - 2 ths EN139T02: 11:19:06
REFERENCIA.....: 1 / 2002

Numero do Processo.: / Numero da Fatura....: 22350
Data Apresentacao...: 13-02-2002 Data do Vencimento...: 28-02-2002
Codigo do Medidor...: 1268
Cidade....: GOIANIA Unid.Cons.Energia: EEAT PEDRO LUDOVICO
Custo Energia Ativa: Ponta - 895,420 Fora Ponta - 9.464,950
Custo Demanda Reg. : Ponta - Fora Ponta - 1.972,530
Custo Demanda Ultr.: Ponta - Fora Ponta -
Custo Demanda Reat.: Ponta - Fora Ponta - 221,340
Custo KVARH.....: Ponta - 98,650 Fora Ponta - 1.017,880
Custo KW 00-06...:
Custo KWH 00-06...: 2.496,010
Custo KVARH 00-06...: 47,710 Devolucao Vl. Cobr.:

Custo Taxa.....: Encargo emergencial:
Custo Multa.....: ICMS encargo emerg.:
Custo ICMS.....: 5.404,840 Iluminacao publica.:
TOTAL FATURA.: 21.619,33

- CONTINUA ----- C A I E

PF 1-Aju 2-Con 3-Vol 4-Men 5-Exc 6-Can 7-RePg 8-AvPg 9-PFs 10-***
11-*** 12-Sai

UM1A0014A PF NAO UTILIZADA NESTA FUNCAO.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)