MARCELO DE SOUZA

GESTÃO E OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DO CICLO DE SANEAMENTO PELO EMPREGO COMBINADO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS COM SISTEMAS SUPERVISÓRIOS EM TEMPO REAL DE OPERAÇÃO

Tese Apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Doutor em Engenharia

São Paulo

2011

MARCELO DE SOUZA

GESTÃO E OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DO CICLO DE SANEAMENTO PELO EMPREGO COMBINADO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS COM SISTEMAS SUPERVISÓRIOS EM TEMPO REAL DE OPERAÇÃO

Tese Apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Automação

Orientador:
Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira

São Paulo
2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Marcelo de

Gestão e otimização integrada do ciclo de saneamento pelo emprego combinado de sistemas especialistas com sistemas supervisórios em tempo real de operação / M. de Souza. - São Paulo, 2011.

197 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Sistemas especialistas 2. Saneamento 3. Recursos hídricos 4. Sustentabilidade 5. Automação 6. Gestão I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que me deram toda a base para entender o significado das palavras amor, respeito e dignidade.

À memória de Celso Crispim de Souza; sua presença será sempre sentida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a “Deus”, por permitir a realização de todos os trabalhos efetuados até o momento e também pela minha vida.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira, pela capacidade de orientar, pelo constante incentivo e amizade de longo tempo.

Ao amigo Carlos Henrique de Castro Ralize da Sabesp, por partilhar seu conhecimento para o aprimoramento deste trabalho.

Ao amigo Frederico Augusto de Mello Prado, por ter colocado sua genialidade a favor deste trabalho.

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp, pelos recursos fornecidos.

Aos colegas da Sabesp, pela amizade e apoio.

Ao Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas - PEA da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por ter-me dado as condições e oportunidades para a realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a execução deste trabalho de tese.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS

RESUMO

ABSTRACT

Pág.

1 IMPORTÂNCIA DOS RECURSOS HÍDRICOS – USO E GESTÃO PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 19

1.1 Introdução 19

1.2 Importância da Água na Vida humana e no Crescimento Sustentável . 19

1.3 Gestão dos Recursos Hídricos 22

1.4 Macrodeficiência do Sistema de Saneamento no Brasil 24

1.5 Tecnologia de Automação como Ferramenta de Melhoria na Gestão dos Recursos Hídricos 30

1.6 Justificativa e Objetivo deste Trabalho de Pesquisa 37

2 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E CENÁRIO DA INFRAESTRUTURA DE SANEAMENTO 44

2.1 Introdução 44

2.2 Partes Constituintes do Sistema de Abastecimento de Água 44

2.3 Cenário da Atual Infraestrutura do Saneamento no Brasil 53

2.3.1 Consumos Médios Per Capita de Água 63

2.3.2 Perdas de Água 67

2.3.3 Tarifas e Despesas Médias 72

2.4 Cenário da Atual Gestão de Saneamento com Emprego da Tecnologia de Automação 78

3 TÓPICOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, SISTEMA ESPECIALISTA E ESTADO DA ARTE DO EMPREGO DE SISTEMAS INTELIGENTES NO SANEAMENTO 86

3.1 Introdução 86

3.2 Conceituação de Inteligência 86

3.3 Introdução à Inteligência Artificial 87

3.4 Áreas da Inteligência Artificial 88
3.4.1 Lógica Fuzzy 90
3.4.2 Redes Neurais 91
3.4.3 Algoritmo Genético 92
3.4.4 Aprendizado de Máquina 94
3.4.5 Sistema Especialista 96

3.5 Fundamentos e Aplicação de Sistema Especialista 100
3.5.1 Principais Aplicações Práticas e Divisões dos Problemas Resolvidos pelos S.E.s 104
3.5.2 Metodologias Construtivas dos S.E.s 109
3.5.3 Técnicas de Aquisição de Conhecimento e Construção de Bases de Conhecimento 112
3.5.4 Estruturação do Conhecimento em Regras 113
3.5.5 Técnicas de Elaboração de Máquina de Inferência 116
3.5.6 Ferramenta Computacional para Elaboração de S.E.s 119

3.6 Estado da Arte do Emprego de Sistemas Inteligentes no Saneamento 121

4 METODOLOGIA DA ARQUITETURA DE HARDWARE E ARQUITETURA DE SOFTWARE DO SIGASI 124

4.1 Introdução 124

4.2 Metodologia da Arquitetura de hardware, software e Metodologia Operativa do SIGASI 124
4.2.1 Módulo de Instrumentação e Automação do Saneamento – MIAS 126
4.2.2 Sistema de Supervisão e Controle de Saneamento – SSCS 127
4.2.3 – Sistema de Integração de Sistemas Especialistas e Supervisórios – SISES 128
4.2.4 Sistema Especialista de Gestão do Saneamento – SEGS 129

4.3 Etapas para Implementação e Validação do SIGASI 141
4.3.1 Meta e Subprocesso Monitorados pelo SIGASI 141

4.3.2 Desenvolvimento do Sistema Especialista..... 157
4.3.3 Desenvolvimento e Implementação do SIGASI Virtual 171

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES 181

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 185

ANEXOS 193

ANEXO A – TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR NO TRANSCORRER DA PESQUISA 194

ANEXO B – MACROFLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA GENÉRICA 196

ANEXO C – DIAGRAMA E PROCESSO DE INSTRUMENTAÇÃO – P&ID - ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA GENÉRICA 197

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 1.1 - Indicador de Perda de Água no Âmbito Internacional - Fonte: [10] [11] ... 27
Tabela 1.2 - Indicadores de Consumo de Energia Elétrica do Processo de Água e Esgoto - Companhias Estaduais, Média por Região - Fonte: SNIS – 2010 29
Tabela 2.1 - Distribuição de Água na Biosfera e Tempo de Renovação - Fonte: ABEAS (1998)..... 53
Tabela 2.2- Consumo de Água por Setor Consumidor - Fonte: Tundisi (2005) 54
Tabela 2.3 - Evolução do Número de Habitantes no Brasil - Fonte: IBGE (2010) 57
Tabela 2.4 - Níveis de Atendimento com Água e Esgoto no Brasil, segundo região Geográfica - Fonte: SNIS (2008) 59
Tabela 2.5 - Distribuição dos prestadores de serviços e quantidade de municípios participantes do SNIS em 2008 62
Tabela 2.6 - Níveis de atendimento com água e esgoto no Brasil, segundo tipo de prestador de serviços - Fonte: SNIS (2008) 62
Tabela 2.7 - Caracterização Global dos Sistemas de Água e Esgoto dos Prestadores de Serviços - Fonte: SNIS (2008) 63
Tabela 2.8 - Valores do Consumo Médio Per Capita de Água dos Prestadores de Serviços - Fonte: SNIS 65
Tabela 2.9 - Índice Médio de Perdas de Água dos Prestadores de Serviços - Fonte: SNIS (2008) 68
Tabela 2.10 - Dados Financeiros dos Prestadores, Segundo Abrangência - Fonte: SNIS em 2008 73
Tabela 2.11 - Tarifa Média Praticada dos Prestadores de Serviços, segundo estado, região geográfica e Brasil - Fonte: SNIS em 2008 75
Tabela 3.1 - Principais Tipos de Problemas Resolvidos Pelos S.E.s [56]..... 107
Tabela 3.2 - Exemplo de Regra Simples e Pattern – Matching..... 115
Tabela 3.3 - Vantagens e Limitações das Regras [21]..... 116
Tabela 3.4 - Vantagens e Desvantagens do Encadeamento para Frente e para Trás fonte: [21]. [56] 118
Tabela 4.1 – Modelo da Estrutura da Premissa – Fonte:[21] 131
Tabela 4.2 – Modelo da Estrutura da Conclusão – Fonte: [21] 133
Tabela 4.3 – Elementos de um Sistema de Automação de uma EEA Genérica..... 147
Tabela 4.4 – Sumarização das principais variáveis supervisionadas e suas representações no S.S. de uma EEA Genérica - Fonte: Sabesp 149
Tabela 4.5 – Sumarização das principais sinalizações de alarmes e sua representação no S.S. de uma EEA Genérica - Fonte: Sabesp 150
Tabela 4.6 – Resumo da contingência do processo de construção do SIGASI 163
Tabela 4.7 – Exemplo da regra elaborada do SEGS, conforme figura 43 168

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1 - Níveis de Controle Industrial – Pirâmide de Automação [19],[20] 34
Figura 2 - Processo Automático da Coleta de Dados no Sistema de Saneamento 35
Figura 3- Ciclo do Saneamento - Fonte: Sabesp (2005) 36
Figura 4 – Proposta da Metodologia de Gestão do Ciclo de Saneamento 39
Figura 5 – Estruturação do Trabalho de Pesquisa 43
Figura 6 - Sistema de Abastecimento de Água - Fonte: Orsini (1996) 45
Figura 7 - Esquema Geral de uma Estação de Tratamento de Água - Fonte: Universidade da Água (2006) 48
Figura 8 – Consumo Hídrico no Mundo. Fonte: ONU (1999) 55
Figura 9 - Índice de Perdas de Água dos Prestadores de Serviços de Abrangência Regional Fonte: SNIS (2008) 69
Figura 10 - Tarifa Média Praticada dos Prestadores de Serviços, segundo estado - Fonte: SNIS (2008) 76
Figura 11 – Conjunto Básico de Automação no Saneamento 80
Figura 12 – Supervisão e Controle Operacional do Sistema de Abastecimento de Água - Fonte: Sabesp (2011) 82
Figura 13 – Supervisão e Controle Operacional do Sistema de Abastecimento de Água - Fonte: Sabesp (2011) 83
Figura 14 – Supervisão e Controle Operacional do Sistema de Abastecimento de Água - Fonte: Sabesp (2011) 84
Figura 15 - Principais Áreas da Inteligência Artificial 89
Figura 16 - Estrutura de um Sistema Clássico de Software 101
Figura 17 - Arquitetura de um Sistema Especialista Genérico – Fonte: Neves (2004) 103
Figura 18 - Principais Áreas de Aplicação dos S.E.s – Fonte: Durkin (1994) 105
Figura 19 - Principais Campos de Aplicação dos S.E.s – Fonte: Durkin (1994) 108
Figura 20 - Fases de Desenvolvimento de um S.E.s – Fonte: [21],[56] 110
Figura 21 - Macroarquitetura de Hardware do SIGASI 125
Figura 22 - Arquitetura Básica do Sistema Especialista Gerado no SEGS 129
Figura 23 – Tipificação de Variáveis – Fonte [21] 134
Figura 24 – Abertura de bases de dados preexistentes – Fonte: [21] 135
Figura 25 – Criação de sistemas novos – Fonte: [21] 135
Figura 26 – Criação de novas Variáveis – Fonte: [21] 136
Figura 27 – Edição de novas Variáveis – Fonte: [21] 137
Figura 28 – Edição de novas Regras – Fonte: [21] 138
Figura 29 – Criação de novas Regras – Fonte: [21] 139
Figura 30 – Adição de nova cláusula à regra – Fonte: [21] 139
Figura 31 – Escolha de variáveis para a regra – Fonte: [21] 140
Figura 32 – Escolha de variáveis objetivos para a regra – Fonte: [21] 140
Figura 33 – Fotografia dos Conjuntos Motobombas da EEA Taubaté – Fonte: Sabesp (2010) 143

Figura 34 – Fotografia da Sala de Painéis da EEA Consolação – Fonte: Sabesp (2010) 144
Figura 35 – Diagrama de Blocos de uma EEA Genérica - Fonte: Sabesp (2010) 145
Figura 36 – Tela do Sistema Geral de uma EEAT Genérica – Fonte: Sabesp 152
Figura 37 – Tela do Sistema Elétrico da EEAT - Genérica – Fonte: Sabesp..... 153
Figura 38 – Tela das Variáveis do Conjunto Motobomba da EEA Genérica – Fonte: Sabesp..... 153
Figura 39 - Tela Sinóptica do Sistema de Alimentação da EEAB Rio Grande - Fonte: Sabesp..... 154
Figura 40 - Tela Sinóptica do Sistema de Bombeamento da EEAB Rio Grande - Fonte: Sabesp..... 156
Figura 41– Elaboração da base do conhecimento do processo de saneamento..... 165
Figura 42 – Exemplo do desenvolvimento da base do conhecimento do Processo de Saneamento..... 166
Figura 43 – Exemplo de elaboração das regras do Processo de Saneamento 167
Figura 44 - Processo de encadeamento para trás - Fonte: [21], [56]..... 170
Figura 45 - Estratégias para elaboração de S.E. no SEGS 172
Figura 46 – Macroarquitetura do Hardware Virtual do Modelo de Validação do SIGASI 173
Figura 47 – Visão geral da plataforma de software da validação do SIGASI..... 175
Figura 48 – Linhas sumarizadas do programa (ladder) do CLP empregado no processo de automação da EEA..... 176
Figura 49 – Exemplo de Tela gerada pelo SEGS no processo de teste da automação da EEA..... 178
Figura 50 – Exemplo de tela gerada pelo SEGS no processo de teste da automação da EEA..... 178
Figura 51 – Vista geral da árvore de decisão gerada pelo SEGS..... 179
Figura 52 – Detalhe da árvore de decisão gerada pelo SEGS 180

LISTA DE ABREVIATURAS

AG – Algoritmo Genético

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BC – Base Conhecimento

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CAP - Capítulo

CCO – Centro de Controle Operacional

CLP – Controlador Lógico Programável

CID – Classificação Internacional de Doenças

D/A – Digital/Analógico

DATASUS – Departamento de Informática do SUS

DIP – Doenças Infecciosas e Parasitárias

DLL - Dynamic Link Library

EA – Entrada Analógica

EEA – Estação Elevatória de Água

EEAB – Estação Elevatória de Água Bruta

ETA – Estação Tratamento de Água

EEE – Estação Elevatória de Esgoto

ERP – Enterprise Resource Planning

EUA – Estados Unidos da América

Frame Relay – Tecnologia de comunicação usada para transmitir informação digital, por meio de uma rede de dados, dividindo essas informações em frames (quadros)

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IA – Inteligência Artificial

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IHM – Interface Homem-Máquina

IPCA – Índice de Preços ao Consumidor Amplo

I/O – Input/Output

IP – Internet Protocol

ISA - Instrument Society of America

ISO – International Standard Organization

JICA – Japan International Cooperation Agency

ODBC – Open Database Connectivity

OLE – Object Link Embedded

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

ONS – Operadora Nacional dos Sistemas

OPC - OLE for Process Control

OSI – Open System Interconnection

MIAS - Módulo de Instrumentação e Automação do Saneamento

PAC - Provavelmente Aproximadamente Correto

PEA – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Pág.- Página

PID – Proporcional Integral Derivativo

P&ID – Processo de Instrumentação (Diagrama)

PIMS – Process Information Management Systems

PLANASA – Plano Nacional de Saneamento

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

SCOA – Sistema de Controle Operacional de Abastecimento

SE – Sistemas Especialistas

SEGS - Sistema Especialista e Gestão do Saneamento

SGA - Sistema de Gestão da Adução

SIG – Sistema de Informação Georreferenciado

SIGASI – Sistema Integrado da Gestão Automatizada de Saneamento Inteligente

SIN – Sistema Nacional de Informações

SISES – Sistema de Integração Sistemas Especialistas e Supervisório

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SS – Sistemas Supervisórios

SSCS - Sistema de Supervisão e Controle do Saneamento

SUS – Sistema Único de Saúde

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

RN – Redes Neurais

VRP – Válvula Redutora de Pressão

RESUMO

Este trabalho de pesquisa insere-se no campo do desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias de automação, apresentando uma nova proposta a ser implementada na gestão do ciclo de saneamento, com o intuito de otimizar o uso dos recursos hídricos e contribuir para o desenvolvimento sustentável. A metodologia desenvolvida, denominada Sistema Integrado da Gestão Automatizada de Saneamento Inteligente (SIGASI), é constituída por uma arquitetura de hardware e software que integra Sistemas Especialistas (Inteligência Artificial) e Sistemas Supervisórios em tempo real de operação. A proposta foi validada virtualmente em uma Estação Elevatória de Água, um subprocesso dentro do conjunto de operações do ciclo de saneamento, segundo estratégia e critérios empregados pelas atuais empresas de água. Os testes foram realizados tendo em vista metas fixadas em função da redução de consumo e despesas com energia elétrica pelo bombeamento de água, redução do índice de perda de água no sistema de abastecimento com o emprego de sistemas inteligentes, otimização dos quantitativos de insumos na produção de água, otimização e embasamento das ações de manutenção do ciclo do saneamento e geração de banco de dados em tempo real. Os resultados aferidos mostram que o SIGASI traz muitos benefícios técnicos e econômicos em comparação ao sistema de gestão empregado, atualmente, pelos gestores das empresas de saneamento do país. Estes benefícios são: maior embasamento na tomada de ações de manutenção, maior rapidez na resposta às perturbações do processo, sistematização dos procedimentos empregados para tomada de decisão, acúmulo de conhecimentos dos especialistas atuantes na condução dos subprocessos do ciclo de saneamento e tomada de decisão automática, em tempo real, inclusive em setores ainda não automatizados. O SIGASI, quando e se implementado, será uma poderosa ferramenta de engenharia na gestão dos recursos hídricos e consequentemente, também

constituirá medida importante dentro de procedimentos voltados ao desenvolvimento sustentável.

Palavras - chave: Automação. Sistema Especialista. Gestão. Saneamento. Recursos Hídricos. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This research is integrated into the field of development of new automation technologies and methodologies and submits a new proposal to manage the water and sanitation cycle intended to optimize the use of water resources and contribute to sustainable development. The methodology developed, referred to as Integrated System of Intelligent Automated Management of Water and Sanitation (SIGASI), consists of a hardware and software architecture that integrates Expert Systems (Artificial Intelligence) and Supervisory Systems in real-time. The proposal has been virtually validated in a Water Pumping Station, a sub-process within the group of operations of the water and sanitation cycle, in accordance with the strategy and criteria employed by existing water and sanitation companies. Tests have been performed considering the targets established for reduction of energy consumption and expenses from water pumping, reduction of the water loss index in supply systems with the use of intelligent systems, optimization of quantities of inputs in water production, optimization of and technical basis for maintenance actions of the water and sanitation cycle, and generation of a real-time database. The results show that the SIGASI brings a number of technical and economic benefits when compared to the management system currently used by decision makers in Brazilian water and sanitation companies. These benefits are: more robust technical basis for maintenance actions, faster responses to disturbances in the processes, standardization of decision-making procedures, acquisition of knowledge by specialists in charge of sub-processes of the water and sanitation cycle, and automatic and real-time decisions, inclusive in non-automated sectors. The SIGASI when and if implemented will be a powerful engineering tool to manage water resources and, consequently, an important component of the procedures towards sustainable development.

Key words: Automation. Expert System. Management. Water and Sanitation. Water Resources. Sustainability.

1 IMPORTÂNCIA DOS RECURSOS HÍDRICOS – USO E GESTÃO PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

1.1 Introdução

Este capítulo, ao discorrer sobre a importância da água na vida humana, independentemente do grau de desenvolvimento socioeconômico atingido pela sociedade, destaca a necessidade de uma boa gestão dos recursos hídricos, essencial para um crescimento sustentável. Tal gestão pode contar com a aplicação da ciência da tecnologia de automação como ferramenta de melhoria. Dado que este trabalho volta-se para a realidade brasileira, é apresentado um breve relato das macrodeficiências do sistema de saneamento bem como de sua gestão. Inserem-se também neste capítulo, a justificativa e o objetivo desta tese.

1.2 Importância da Água na Vida humana e no Crescimento Sustentável

A água, além de ser um elemento essencial à vida humana, é um fator de vital importância nos processos de desenvolvimento socioeconômico, assumindo, cada vez mais, um papel fundamental no desenvolvimento sustentável da humanidade. É notório e evidente que a preocupação com a água, ou com a falta dela, tem lançado, de forma crescente, desafios às diferentes sociedades e órgãos governamentais. Contudo, a questão não se esgota na existência dos recursos hídricos, mas se estende ao seu uso e aos seus sistemas de abastecimento, necessários para suprir necessidades relacionadas à saúde da população e ao desenvolvimento econômico, sustentável [2] [12].

Inúmeros são os benefícios diretos proporcionados pela água à saúde: ajuda na preparação de alimentos, favorecendo uma nutrição saudável, possibilita a higiene corporal e a limpeza do ambiente e contribui para a hidratação do organismo; quando fluoretada, fortalece o esmalte dos dentes durante a formação da dentição permanente, reduzindo, de forma bastante expressiva (65%), a incidência de cáries dentárias [2]. Todavia, ela também pode ser um dos vetores de transmissão das doenças infecciosas, dependendo das concentrações de sais dissolvidos, partículas em suspensão e microrganismos que nela existem.

As enfermidades transmissíveis pela água pertencem ao grupo das Doenças Infecciosas e Parasitárias – DIP, conforme Classificação Internacional de Doenças – CID, estabelecida pela Organização Mundial da Saúde – OMS. O grupo de idade mais atingido por essas doenças é o de crianças até nove anos. Entre as DIP, as enfermidades diretamente relacionadas com a água contaminada são as doenças infecciosas intestinais, caracterizadas pelas diarréias. O combate a elas pode ocorrer em ação preventiva, via saneamento ambiental, e, mais especificamente, saneamento dos sistemas de abastecimento de água.

O enorme benefício do saneamento dos sistemas de abastecimento de água dirige-se, diretamente, à saúde da população em todos os estratos sociais, proporcionando adequadas condições de higiene, conforto, e bem-estar mesmo às camadas mais desfavorecidas, com um reflexo imediato na redução da demanda por serviços de saúde. Segundo dados do DATASUS [4] [2], as DIP no Brasil, em 1950 representavam cerca de 60% de todos os óbitos, sendo que, em 1979, representaram 10,26% sobre o total de mortes. Em 1995, elas passaram a representar 4,33% e, em 2006, 4,1%. A redução das taxas de mortalidade por doenças infecciosas chega a provocar mudanças nos padrões epidemiológicos de todas as sociedades (ao mesmo tempo há aumento das doenças crônico-degenerativas [2]. Os cuidados médicos e os avanços tecnológicos na área da saúde mostraram ter importância secundária nessas

transformações [2],[3] em que, uma das suas principais causas foi a melhoria do saneamento ambiental, aliada a um estado nutricional da população mais satisfatório e redução das taxas de natalidade.

A proporção entre óbitos, internações e consultas médicas, apresentada pelo Sistema Único de Saúde – SUS - em 1995 foi de 1: 14: 356, respectivamente [2]. Assim, pode-se constatar que, por trás da redução de óbitos mostrada pelos dados do DATASUS, também há um contingente enorme de pessoas que deixa de procurar os serviços de saúde pela redução da ocorrência de enfermidades [2] [3]. Com isso, obtém-se um alívio no orçamento dos setores da Saúde, da Previdência e da Educação. Segundo dados divulgados pela OMS - Organização Mundial da Saúde - a cada real empregado na área do saneamento é possível economizar de quatro a cinco reais em gastos com saúde pública.

Em contrapartida, os sistemas de abastecimento de água, quando construídos e operados de maneira inadequada, podem prejudicar a saúde da população. Mesmo nos países desenvolvidos há vários exemplos de surtos de doenças transmitidas pela água, provocados por falhas na operação ou na construção dos sistemas de abastecimento. Segundo Payment [9], o custo dos surtos causados pela contaminação da água dos sistemas públicos de abastecimento nos Estados Unidos, avaliado no período de 1992 a 1995, foi de US$ 3 milhões por ano, principalmente pelo absenteísmo no trabalho provocado pelas enfermidades.

De acordo com Anderson [7], entre 1980 e 1995 ocorreram 90 surtos de doenças transmitidas pela água na Suécia, envolvendo 50 mil pessoas com dois óbitos. De acordo com Lahti [8], entre 1980 e 1992, houve 24 surtos na Finlândia, atingindo 7.700 pessoas. As principais causas dos surtos nesses dois países foram falhas na desinfecção da água.

Milhares de pessoas foram afetadas por surtos de hepatite na Índia, em 1956 e 1972, causados por água contaminada por esgoto. Verificou-se que a tubulação de água estava assentada abaixo da rede coletora de esgotos. As

tubulações de ferro galvanizado apresentavam sinais de ferrugem e muitos pontos de vazamentos [7]. Em virtude das constantes paradas no abastecimento, os esgotos eram sugados para dentro das tubulações, contaminando a água.

Em todos esses casos, o maior prejuízo é a perda da confiança da população na empresa de saneamento básico, e esta é a situação mais difícil de ser revertida.

Assim sendo, é fundamental equacionar de maneira adequada a expansão e a operação dos sistemas de abastecimento de água nas cidades, a fim de atender à demanda da população e fornecer um produto com a melhor qualidade e o menor custo. A boa gestão do uso dos recursos hídricos é condição imprescindível para que isso ocorra.

1.3 Gestão dos Recursos Hídricos

O uso da água para diversas finalidades foi-se ampliando em função da intensificação das atividades humanas e econômicas e do crescimento populacional [1],[2]. Assim, em momentos de aceleração dos processos de desenvolvimento, ocorre um aumento na demanda de recursos básicos, entre eles, da água. Foi o que se observou em parte do mundo na segunda metade do século passado. Com isto, a gestão dos recursos hídricos também foi assumindo maior importância e complexidade, beneficiando-se de teorias e práticas de análise de sistemas e pesquisas operacionais desde o término da Segunda Guerra Mundial em 1945 [1].

O evento da guerra (1939-1945) representou um marco importante nesse processo, pois nessa época, diversos avanços tecnológicos foram realizados como o computador digital e as técnicas de pesquisa operacional, desenvolvidas para auxiliar os processos de logística militar. Também os anos do pós-guerra proporcionaram uma fase de grande desenvolvimento socio-

econômico, principalmente nos Estados Unidos da América – EUA - e na Europa Ocidental, devido à necessidade de reconstrução do continente europeu. Os países como Reino Unido, França e Alemanha Ocidental, que se mantiveram sob a esfera de influência dos EUA, receberam significativos recursos financeiros destinados a obras de infraestrutura e de reconstrução [1]. Esse esforço, denominado Plano Marshall, foi uma das formas de a nação norte-americana fazer frente à expansão da então União Soviética.

No caso brasileiro, no período do pós-guerra a partir da década de 50, o país inicia um processo de intensa industrialização. Para tanto, havia a necessidade de expandir o parque gerador de energia elétrica. Optou-se, então, pelo desenvolvimento da hidroeletricidade, devido ao vasto potencial hidráulico do território. Várias usinas de grande porte, interligadas posteriormente a um sistema denominado Sistema Interligado Nacional – SIN [1] [12], foram construídas a partir dessa época. A base geradora de energia elétrica no Brasil tem, assim, a característica de ser eminentemente hidráulica (71%) [5],[6], o que diferencia o Setor Elétrico Brasileiro de qualquer outro no contexto internacional.

Durante as décadas de 70 e 80, o Sistema Interligado Nacional já incluía um número expressivo de usinas hidrelétricas, o que causou um aumento na complexidade da operação do sistema em relação às décadas anteriores. Esse aumento da complexidade da operação do sistema exigiu um esforço do setor elétrico para melhorar e desenvolver novas ferramentas e técnicas de modelagem de operação de reservatórios e de previsões de afluência de vazão. O SIN, atualmente com sua rede de transmissão, integra as usinas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte do Brasil. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na Região Amazônica [5]. A interligação deste sistema viabiliza a troca de energia entre regiões, permitindo, assim, obterem-se os benefícios da diversidade de regime

dos rios das diferentes bacias hidrográficas brasileiras. Desde meados da década de 70, o sistema eletroenergético brasileiro é operado de forma coordenada, no intuito de se obterem ganhos sinérgicos a partir da interação entre os agentes. Segundo a Operadora Nacional dos Sistemas [5], a operação coordenada busca minimizar os custos globais de produção de energia elétrica, contemplar restrições intra e extra-setoriais e aumentar a confiabilidade do atendimento.

Juntamente com este processo de industrialização ocorreu a urbanização, com aumento significativo da demanda de água para consumo humano, tornando-se necessário ampliar o sistema existente de abastecimento de água nas grandes cidades. Assim, na década de 70, por exemplo, começou a ser construído o Sistema Cantareira para proporcionar a melhoria do abastecimento da Grande São Paulo. Anos depois, no início da década de 90, foi implantado o Sistema Alto Tietê com o mesmo objetivo, ou seja, ampliar o fornecimento para atender à demanda do abastecimento de água [2] [12].

Tais medidas foram fundamentais para promover a gestão dos recursos hidrícos de forma adequada, a fim de suportar as necessidades de desenvolvimento da sociedade. Atualmente ações desta natureza visam, também, subsidiar um crescimento sustentável.

1.4 Macrodeficiência do Sistema de Saneamento no Brasil

De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), “infraestrutura econômica abrange os principais setores que subsidiam os domicílios e a produção, a saber: setores de energia elétrica, telecomunicações, saneamento básico e logística (rodovias, ferrovias e portos)” [14].

Há muito se reconhece a importância de uma infraestrutura econômica adequada para a geração de um ambiente propício ao desenvolvimento. Diversos autores, como: (ESTACHE; (2007), STRAUB; (2008) e SÁNCHEZ;

(2009)) [13], tem discutido a relevância da infraestrutura na provisão de insumos produtivos (água, energia, transportes, telecomunicações, rodovias, etc.) no crescimento econômico e na redução da pobreza e da desigualdade social.

A oferta eficiente de serviços públicos de infraestrutura é um dos aspectos mais importantes das políticas de desenvolvimento econômico e social. A prestação eficiente de tais serviços condiciona significativamente a produtividade e a competitividade do sistema econômico, ao mesmo tempo em que melhora o bem-estar social. Portanto, uma adequada disponibilidade de infraestrutura e de seus serviços correlatos é condição indispensável para que o país possa desenvolver vantagens competitivas, alcançando maior grau de especialização produtiva. Os investimentos em infraestrutura elevam a competitividade sistêmica da economia, melhorando as condições de transportes, de comunicação e de fornecimento de energia. Além disso, tais inversões promovem efeitos multiplicadores e dinamizadores nos demais setores, induzindo a outras ações [13].

Dado que o sistema de saneamento no Brasil é o contexto para o qual se dirige este trabalho de pesquisa, faz-se necessário apontar algumas macrodeficiências na infraestrutura deste setor, que se minimizadas poderão contribuir com o crescimento sustentável e com uma gestão mais eficiente, por exemplo:

a. Estagnação do setor de saneamento em decorrência de uma série de indefinições advindas da ausência de um marco regulatório federal. Até o final da década de 90, inexistia um marco regulatório que proporcionasse um ambiente favorável aos investimentos com regras claras e bem definidas pelo governo. O último marco foi instituído pelo Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) no final da década de 60, em que seu texto constava diversas indefinições para o setor, colaborando para tal estagnação. Junto a esta estagnação, a cultura da auto-regulação, herdada

pelas concessionárias estaduais e municipais durante a vigência do PLANASA, contribuiu para tornar o saneamento um dos setores mais ineficientes da infraestrutura brasileira [2]. O Brasil enfrenta, portanto, um grande déficit nos serviços de abastecimento de água e esgotos, com graves consequências para a saúde pública e para a qualidade de vida da população. Para reverter este cenário, o governo federal, por meio de lei, vem promovendo ações regulamentares sobre o uso e a exploração dos recursos hídricos. Em 1997, por exemplo, estabeceu a lei Federal 9433/97, que trata da Politica Nacional do uso dos Recursos Hídricos. Em consonância com essa medida, os estados brasileiros têm atualizado e aprovado suas respectivas leis, instituindo os Sistemas Estaduais de Recursos Hídricos e trazendo à pauta a discussão sobre a aplicação dos diversos instrumentos de gestão como a outorga do direito de uso dos recursos hídricos, o planejamento deste uso e a cobrança pela sua exploração.

Em Janeiro de 2007, foi sancionada pelo Presidente da República a lei N◦11.445. Esta lei estabelece as diretrizes nacionais para o setor de saneamento básico e a política federal que visa minimizar as diversas deficiências existentes, como a falta de regras para o saneamento, falta de transparência nas atribuições dos estados e municípios, falta de transparência na fixação das tarifas dos serviços e, sobretudo, falta de fiscalização dos serviços prestados por estados e municípios; também busca manter a integração das infraestruturas e a universalização dos serviços, com a gestão eficiente dos recursos. A criação recente das agências reguladoras em vários estados, já é um reflexo das ações regulamentares.

b. Falta de dispositivo estabelecendo o monitoramento e o incentivo à melhoria de desempenho na redução das perdas nos sistemas de abastecimento de água. Segundo Tsutiya [2], em 2001, as perdas medidas através da relação

entre volumes faturados e volumes disponibilizados para a distribuição foi de 40,6% do valor médio nacional. Também em 2001, as companhias estaduais registraram uma média de perdas de faturamento de 40,4%. Já em 2007 e 2008, este valor ficou em 39,1% e 37,4% respectivamente, segundo relatório do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. As perdas físicas, representadas pelos vazamentos nas redes de distribuição têm sérias consequências no desempenho empresarial. Uma vez que a água perdida não é faturada, as perdas representam maiores custos de produção e gastos com energia elétrica e produtos químicos do tratamento da água, que acabam incorporados à tarifa. Apesar da melhora de 1,7 pontos percentual entre 2007 e 2008, são valores preocupantes para o sistema de abastecimento de água e, portanto, devem ser minimizados para melhorar sua eficiência, sobretudo para contribuir com o desenvolvimento sustentável.

No âmbito internacional, em média, a Ásia apresenta perda em seus sistemas de água em torno de 42%, África 39%, América do Norte 15% e América Latina e Caribe em média 42% [10]. Por exemplo, a cidade de Delhi (Índia) apresenta um índice de perda de água não faturada de 53%. Por outro lado, a cidade de Tóquio, no Japão, onde estão às cidades com mais baixos indicadores de perdas no sistema de abastecimento no âmbito internacional, apresenta um índice de perdas da ordem de 4,5%. Já para a cidade de Nova Iorque (Estados Unidos), o indicador de perda de água no sistema é de 30%. A tabela 1.1 apresenta alguns indicadores de perdas no sistema de abastecimento de água no âmbito internacional.

Tabela 1.1 - **Indicador de Perda de Água no Âmbito Internacional - Fonte: [10] [11]**

Índice de Perda de Água no Sistema de Abastecimento à Nível Internacional (%)							
Estados Unidos/Cidades		**Japão/Cidades**		**África/País**		**Europa/País**	
Boston	**New York**	**Tóquio**	**Osaka**	**Zimbabwe**	**Angola**	**Alemanha**	**Inglaterra**
16%	30%	4,5%	7%	30%	60%	7%	19,%

De acordo com o Banco Mundial [30], os índices de perdas recomendado para um sistema de abastecimento de água, devem atingir patamares abaixo de 25%, considerando o ponto de vista econômico que relaciona o investimento necessário para alcance e manutenção destes índices e o custo marginal de obtenção, tratamento e distribuição da água.

c. Ineficiência na operacionalização dos sistemas de saneamento, que devem ser otimizados com o emprego de técnicas mais racionais e com trabalhos científicos, possivelmente por meio de parcerias com as universidades. Um claro exemplo de otimização seria atentar para a questão do consumo de energia elétrica no ciclo do saneamento e encaminhá-la de forma mais eficiente, pois a energia elétrica é o item mais significativo no custo do saneamento do Brasil, ficando atrás, em geral, apenas para a folha de pagamento. Exemplicando com dados da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp [15], observa-se que, em 2010, o indicador de quilowatt horas/m³ no processo de produção de água foi 0, 613 kWh/m³, com consumo de 1.810.291.074 kWh, volume produzido de 2.952.386.248 m³ e o custo por quilowatt hora de 0,24158 (R$/kWh). Já no processo de tratamento de esgoto o indicador foi de 0,411 kWh/m³, consumo de 320.942.186 kWh, volume tratado de 780.950.895 m³ e o custo de 0,24994(R$/kWh).

   A tabela 1.2 ilustra os indicadores de consumo de energia elétrica dos prestadores de serviços de abrangência Regional (companhias estaduais) e por região (Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste), segundo dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS, divulgados em 2010 e com diagnóstico de 2008.

Tabela 1.2 - Indicadores de Consumo de Energia Elétrica do Processo de Água e Esgoto - Companhias Estaduais, Média por Região - Fonte: SNIS – 2010

REGIÃO	INDICADOR PROCESSO DE ÁGUA (kWh/m³)	INDICADOR PROCESSO DE ESGOTO (kWh/m³)
NORTE	0,74	0,15
NORDESTE	0,78	0,23
SUDESTE	0,64	0,22
SUL	0,78	0,20
CENTRO-OESTE	0,81	0,33

Conforme os dados apresentados pela Sabesp e também na tabela 1.1 [15], [25], os indicadores de consumo de energia elétrica são significativos no custo do saneamento. Sendo assim, a perspectiva de solução para este problema seria o aumento da eficiencia energética, questão para a qual este trabalho de pesquisa visa dar sua contribuição.

d. Necessidade de otimização no uso dos produtos químicos empregados no sistema de água e esgoto, por meio de controle automatizado e eficiente, uma vez que estes produtos influenciam, diretamente, na tarifação da água.

e. Necessidade de automatização dos processos, empregando a Tecnologia de Automação, associada ao sistema inteligente, como ferramenta de melhoria na gestão dos recursos hídricos — principal objetivo deste trabalho de pesquisa.

1.5 Tecnologia de Automação como Ferramenta de Melhoria na Gestão dos Recursos Hídricos

As empresas de saneamento no Brasil têm uma necessidade premente de melhorar seus resultados operacionais devido às novas necessidades impostas pela sociedade civil e governamental, principalmente do ponto de vista ambiental e de sustentabilidade. Assim sendo, graças aos avanços da engenharia eletrônica nas últimas décadas, foi possível desenvolver sistemas computacionais e equipamentos sofisticados destinados à automação dos sistemas de abastecimento de água e de esgoto sanitário. Segundo Pereira [17] [18]:

> Automação é a ciência que estuda e aplica metodologias, ferramentas e equipamentos, objetivando definir quando e como converter o controle de um processo manual para automático. Ela também possibilita a coleta metodológica e precisa de dados que podem ser empregados para se obter a otimização do processo.

Atualmente, existe grande interesse por sistemas de automação, pois a automação possibilita a redução do custo de todo o sistema produtivo, com consequente aumento dos lucros. Existe grande demanda de automação, especificamente no setor industrial, devido aos seguintes motivos:

a. redução dos custos de produção;
b. rápida resposta às necessidades ou distúrbios da produção;
c. redução no volume, tamanho e custo dos equipamentos;
d. restabelecimento mais rápido do sistema produtivo;
e. repetibilidade e maior qualidade na produção;
f. possibilidade de introdução de sistemas produtivos interligados, com maior volume de informação gerada pelo processo produtivo, possibilitando sua gestão global.

Paralelamente aos pontos positivos mencionados, a automação industrial implica elevados investimentos iniciais e custos de manutenção mais altos, pois depende de mão de obra bastante qualificada. Em geral, esses inconvenientes são compensados pela garantia de qualidade da produção que, dessa forma, torna-se mais homogênea. A automação, por si só, não tem a capacidade de melhorar um produto final, mas, sim, de torná-lo mais homogêneo de acordo com um padrão pré-estabelecido. Por outro lado, devido ao crescimento das necessidades da indústria moderna, os sistemas estão cada vez mais complexos, aumentando, com isso, a abrangência de todo o processo de automação. Assim, os sistemas automatizados e o processo de automatizar apresentam maior complexidade e abrangência. Isto acontece devido à tecnologia, que permite maiores recursos para tal finalidade. Consequentemente, a automação pode atingir uma quantidade cada vez maior de processos. Os processos que exigiam maior atenção e esforço por parte de seus responsáveis já podem ser automatizados por sistemas muito confiáveis. Isto faz com que os processos de automação adquiram uma maior complexidade em relação ao que existia anteriormente.

Para melhor compreender a automação nos processos produtivos foram desenvolvidos alguns modelos representativos, por exemplo, a pirâmide de automação representada por cinco níveis hierárquicos [19],[20],[21],[25]. Nível 1 - Máquina, Nível 2 – Estação, Nível 3 - Célula, Nível 4 – Central e Nível 5 – Planta.

Os exemplos abaixo descrevem dispositivos e produtos para aplicação em projetos de automação industrial. De acordo com o nível proposto no modelo da pirâmide de automação pode-se citar:

a. **Nível 1** – Neste nível de controle encontram-se os instrumentos de processo que incluem sensores e atuadores. Estes, além de fornecerem o meio de interagir com o processo que está sendo controlado, executam os processamentos iniciais e finais dos sinais

trocados entre o processo e o sistema de controle. Executam, por exemplo, a correção da não-linearidade dos sensores de temperatura, pressão, nível, umidade, pH, e dos medidores de vazão.

b. Nível 2 – Neste segundo nível de controle, variáveis selecionadas como pressão, fluxos e velocidades são reguladas para permanecer em valores determinados (“setpoints”), estabelecidos pela gerência ou pelo operador local. Este nível responsabiliza-se pelo controle do processo propriamente dito, fazendo a aquisição de dados e gerando variáveis de controle através da aplicação de algoritmos. Ainda neste nível situam-se os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), Inversores de frequência, Soft Starters e demais drivers de acionamento, com integração parcial das funções.

c. Nível 3 – Este nível de controle, chamado de coordenação, coordena, aloca recursos, supervisiona e estabelece pontos de operação de todos os controladores do primeiro nível. Concentra informações sobre toda a instalação em salas de controle, normalmente situadas em pontos distantes do local de controle do processo, e em computadores centrais de supervisão da operação. Essa concentração de informações permite que os operadores centrais tomem decisões sobre políticas a serem adotadas e sobre os valores dos pontos de operação dos controladores do nível inferior. Estes pontos de operação podem também ser recebidos do nível hierárquico superior e, neste caso, o operador central apenas monitora os valores recebidos. Os produtos supervisórios disponíveis no mercado e seus respectivos representantes são os seguintes, entre outros: Citect, comercializado pela SoftBrasil

Automação Ltda e Schneider Electric, FixDmacs, pela Intellution Inc. e General Electric do Brasil Ltda.- Fanuc, Elipse Scada e Elipse E3, pela Elipse Software Ltda., RSview pela Rockwell Automation Brasil, e Power CC, pela Siemens Ltda.

d. Nível 4 – Neste nível de controle (otimização do processo) são gerados os valores dos pontos de operação e demais parâmetros necessários para que se obtenha o melhor rendimento possível das instalações. Isto é feito por meio da execução de algoritmos de otimização que fornecem valores de acordo com os modelos matemáticos dos respectivos processos e que, teoricamente, produzirão o desempenho desejado. Este nível caracteriza-se pela aplicação dos sistemas MRP (Material Requirement Planning), just-in-time, PIMS (Process Information Management Systems), MES (Manufacturing Execution System), e MRP II (Manufacturing Resource Planning).

e. Nível 5 – Este nível representa o topo da hierarquia, ou seja, é o nível de gerenciamento, responsável pela determinação da estratégia e política global da operação produtiva. Implementa as estratégias de produção baseado na análise da disponibilidade de recursos físicos, matérias-primas, energia, recursos humanos e demanda do mercado. Além disso, gera informações que, conjugadas com informações dos outros níveis de controle, permitem a avaliação do desempenho da operação produtiva, a melhora dos modelos e algoritmos e os acertos no sistema de controle para aperfeiçoamento contínuo e melhor desempenho global. Os Sistemas ERP (Enterprise Resource Planning), por exemplo, são utilizados neste nível.

A Figura 1 ilustra os níveis de automação industrial, segundo a classificação adotada:

Figura 1 - Níveis de Controle Industrial – Pirâmide de Automação [19],[20]

A automação em sistemas de abastecimento de água e esgotos sanitários consiste em coletar, concentrar e processar as informações do processo com o uso da tecnologia de informação [25]. Baseados nos resultados obtidos, os sistemas de automação agem de forma autônoma sobre os estados e as grandezas do processo para obtenção dos resultados desejados.

A figura 2 ilustra o processo de coleta de dados e atuação no sistema de Saneamento:

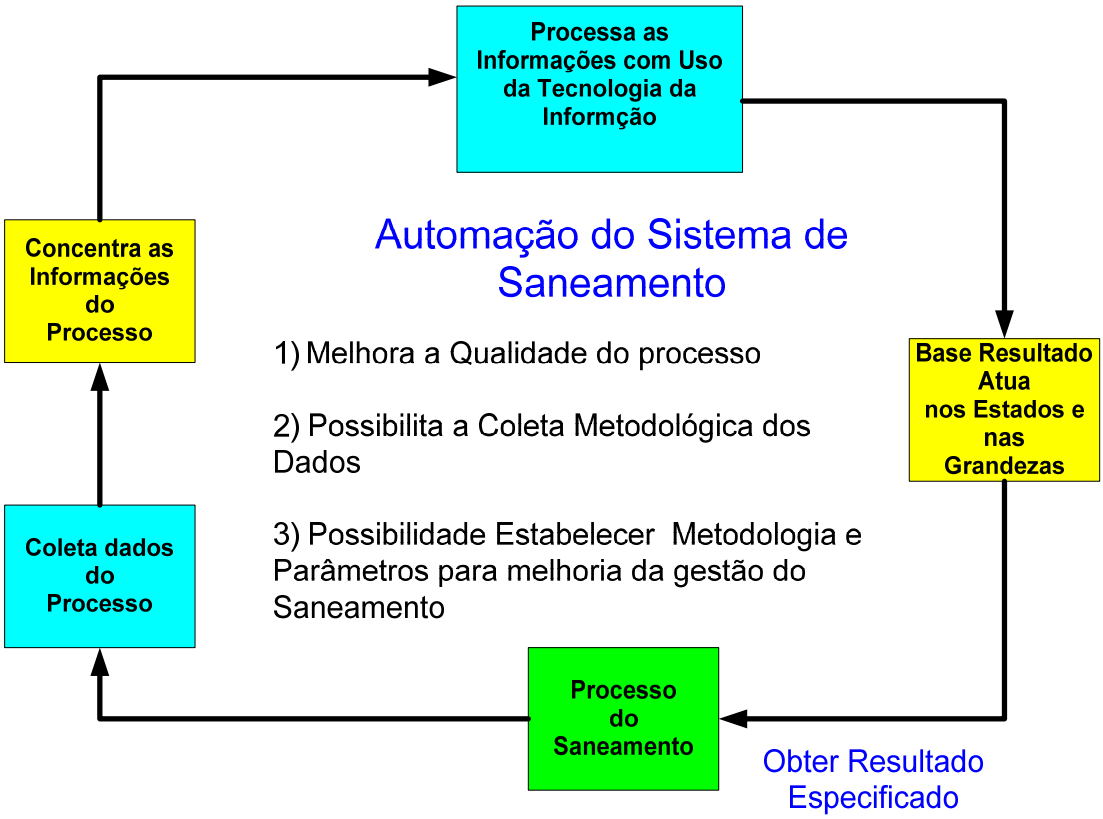


Figura 2 - Processo Automático da Coleta de Dados no Sistema de Saneamento

Entretanto, a automação do saneamento básico necessita de avanços nas técnicas de captação, tratamento e distribuição de água, coleta, interceptação, tratamento e disposição final de esgoto. Necessita, ainda, de sistemas de supervisão e controle a fim de que os processos operem continuadamente, segundo os critérios de qualidade especificados.

Assim sendo, a Tecnologia de Automação surge como uma ferramenta poderosa na melhoria da gestão do ciclo do saneamento, pois além de melhorar a qualidade do processo, possibilita a coleta metodológica dos dados de forma integrada e hierarquizada. Por meio dessas informações, é possível estabelecer metodologias e parâmetros para melhoria da gestão do ciclo do saneamento. A figura 3 ilustra os subprocessos do ciclo de saneamento.

Figura 3- Ciclo do Saneamento - Fonte: Sabesp (2005)

A figura 3 mostra que o ciclo do saneamento envolve todas as estações de tratamento de água, estações de tratamento de esgoto, elevatórias de água, reservatórios e todas as fontes de recursos hídricos; sendo assim, o número de pontos de comunicação envolvido (troca de dados entre sinais de campo e controladores - tags, como conhecidos na literatura técnica e comercial) é bastante expressivo. Tal fato exige um aperfeiçoamento dos sistemas de automação para atender à necessidade de as organizações realizarem uma gestão global de seus processos.

A maior complexidade dos processos de automação requer, então, de seus responsáveis, maiores empenhos e habilidades para gerenciar uma quantidade elevada de pontos de comunicação. Exemplificando com dados da Companhia de água - SABESP, que atende aproximadamente 20 milhões de habitantes na região Metropolitana de São Paulo (RMSP), abrangendo 27

municípios, em uma mancha urbana que ultrapassa 8.500km de área e utiliza um Centro de Controle Operacional – CCO, composto por um sistema supervisório para monitorar e controlar o sistema de adução de água da RMSP: atualmente, seu número de pontos de comunicação consiste em, aproximadamente, quinze mil (15.000) tags. E o mesmo sistema supervisório, para atender à necessidade e à demanda da automação atual está sendo adequado para controlar cento e cinquenta mil (150.000) tags.

1.6 Justificativa e Objetivo deste Trabalho de Pesquisa

Dado que o sistema de saneamento é o contexto em que se desenvolve este trabalho de pesquisa, faz-se necessário apresentar algumas de suas coordenadas de funcionamento e apontar certas fragilidades de sua gestão.

a. Para realizar a gestão e o controle dos subsistemas do ciclo do saneamento, a maioria dos gerentes e supervisores, denominado neste trabalho de pesquisa gestores do saneamento, emprega um modelo de gestão convencional em que os dados são tratados de forma sequencial, ou seja, os mesmos emitem um resultado final e processam um volume de dados de maneira repetitiva para chegar à solução de um problema. Tal modelo, possivelmente, não realizará ações mais eficientes e otimizadas como, por exemplo, sistematizar, de forma automática, o conhecimento por meio de regras e procedimentos, para permitir uma melhor tomada de decisão, bem como uniformizar, de forma sistemática, o conhecimento entre os gestores do saneamento;

b. A atuação do gestor do saneamento ocorre no terceiro nível do modelo teórico da pirâmide de automação (vide item 1.5). Este nível opera o Sistema Supervisório, que recebe informações de dispositivos controladores como Controladores Lógicos Programáveis (CLP), inversores de frequência,

válvulas de controle, etc. Este sistema executa diversas funções vitais em um processo automatizado e também opera como Interface Homem Máquina (IHM), com os operadores e gestores, para que os mesmos possam analisar, diagnosticar, inferir e tomar decisões no processo. Os gestores e operadores passam boa parte do tempo de trabalho operando o Sistema Supervisório. Esta operação, normalmente, é efetuada por vários gestores nos diversos subsistemas do ciclo do saneamento. Pela teoria geral da automação [22], a ação do homem em um processo automatizado é considerada uma ação manual, e, consequentemente, está sujeita a todos os tipos de ocorrências decorrentes dos processos não automatizados;

c. Os procedimentos envolvidos no ciclo de saneamento, normalmente, são de conhecimento de seus responsáveis, mas este conhecimento, geralmente, não está plenamente sistematizado. Portanto, nem sempre o uso do conhecimento dos gestores dos subsistemas é feito de forma assertiva e eficiente nos sistemas de automação. Também fatores como reestruturação de quadros funcionais e aposentadoria fazem com que o conhecimento acumulado pelos operadores e gestores do saneamento tenda a se perder, acarretando custos decorrentes da operação indevida e de novos treinamentos para a mão de obra substituta. Mesmo realizando um esforço de treinamento, normalmente, isto não é suficiente para assegurar, de forma completa, a transmissão do conhecimento adquirido pelos gestores ao longo dos anos.

As deficiências apontadas no campo da gestão do sistema de saneamento brasileiro mostram a necessidade de desenvolver uma metodologia eficiente e capaz de garantir a preservação do conhecimento dos responsáveis pelo funcionamento e operação dos subsistemas de saneamento**,** permitir uma nova maneira de sistematizar os procedimentos e conhecimentos dos subsistemas do ciclo de saneamento e também otimizar as rotinas de operação. Para tanto, o emprego da Engenharia do Conhecimento e Sistemas Especialistas no

terceiro nível do modelo teórico da pirâmide de automação, mais especificamente na base dos sistemas supervisórios, surge como alternativa aos métodos empregados atualmente pelos gestores do sistema de saneamento do Brasil.

A figura 4 ilustra a proposta desta metodologia:

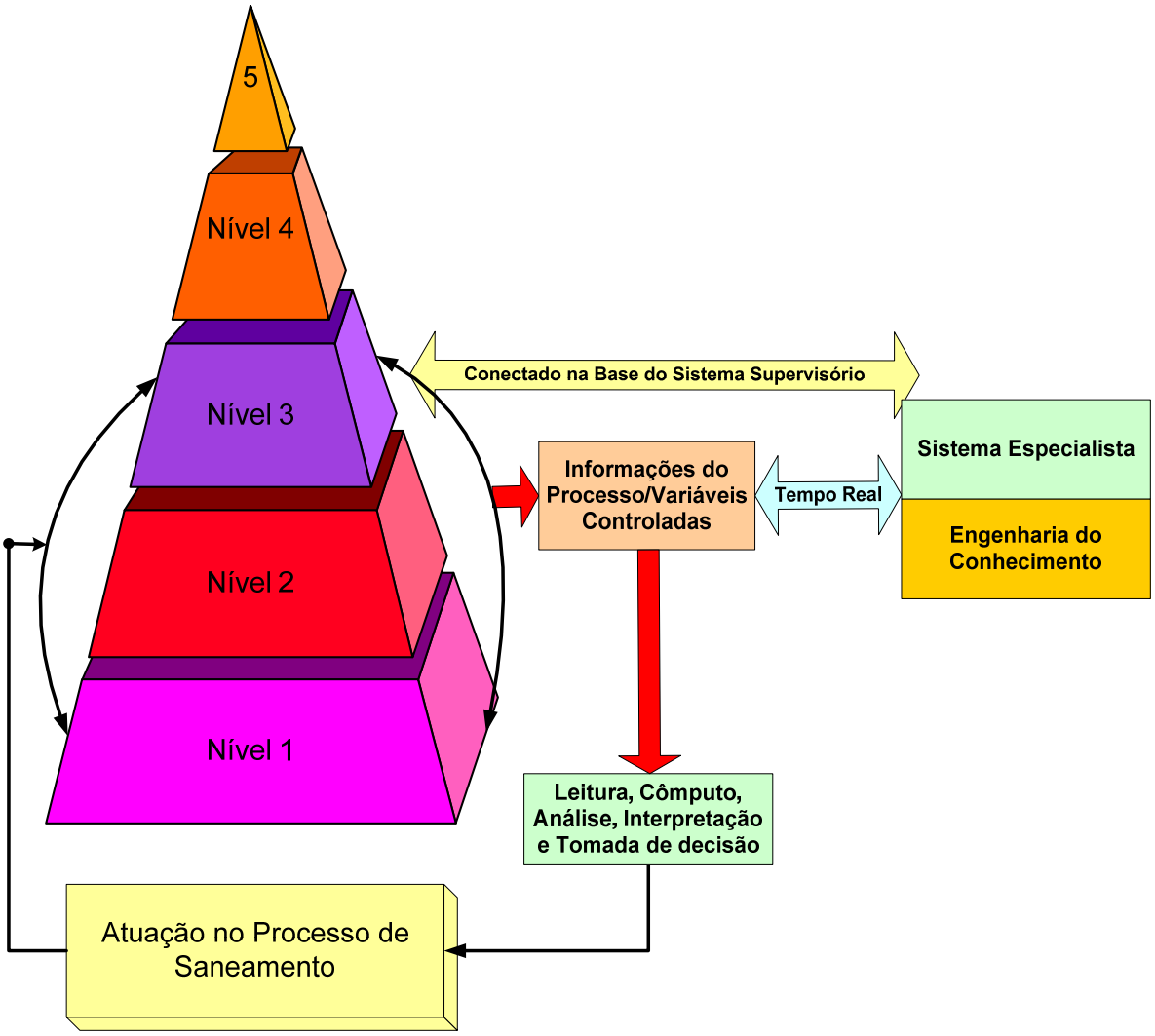


Figura 4 – **Proposta da Metodologia de Gestão do Ciclo de Saneamento**

A figura 4 ilustra a atuação do operador do sistema, bem como a atuação do Sistema Especialista, para promover a gestão integrada do ciclo de saneamento.

Nota-se que essa atuação pode ocorrer principalmente nos três níveis mais baixos da pirâmide de automação, de acordo com o seguinte ciclo:

a. O operador percebe as informações do processo no S.S por meio de seus sentidos;
b. O operador utiliza suas capacidades cerebrais para análise e interpretação dos dados, tomando ou não decisões;
c. Após decisão, o operador, altera parâmetros de operação que podem ser desde auxilio e diagnóstico de manutenção (nível 1), verificações de lógicas de funcionamento (nível 2) ou principalmente operando diretamente o S.S (nível 3);
d. O Sistema Especialista opera em tempo real com a base do S.S para aconselhar e/ou automatizar as funções executadas pelos operadores do sistema de saneamento, por meio de regras e procedimentos armazenados na base do Sistema Especialista.

Assim sendo, esta metodologia proposta possibilita duas formas de operação e gestão:

1. Operar, como substituto total ou parcial dos gestores e operadores, no ciclo de saneamento nos processos decisórios;
2. Operar, em tempo real, como um conselheiro dos gestores e operadores no processo de saneamento.

Desta maneira, de acordo com a habilidade operacional que os Sistemas Supervisórios possuem e a capacidade de lidar com o conhecimento dos Sistemas Especialistas, a união da arquitetura de hardware e da arquitetura de software, neste trabalho viabiliza o auxílio ou mesmo a automação da tomada de decisões na operação e gestão do ciclo de saneamento. Assim, o objetivo deste estudo é desenvolver um modelo de gestão integrada que empregue Sistema Especialista, que, se implementado, poderá aconselhar, de forma automática, o operador na gestão do ciclo do saneamento. Esta arquitetura proposta é denominada neste estudo: Sistema Integrado da Gestão Automatizada de Saneamento Inteligente – “SIGASI”.

Para o desenvolvimento da metodologia deste trabalho de pesquisa contou-se com o estudo de Andrade [21], em que foi elaborada solução de software para funcionamento de Sistemas Especialistas “on-line” com Sistemas Supervisórios de automação industrial, intitulada de “SISES” (Sistema de Integração Sistemas Especialistas e Supervisórios).

Em resumo, ao atentar para as questões de saneamento e gerenciamento de recursos hídricos, este trabalho busca destacar a necessidade de que a água, um dos mais importantes recursos naturais do planeta, seja disponibilizada e usada de modo mais racional e também possa contribuir para a melhoria da sustentabilidade do desenvolvimento humano, por meio de uma gestão mais eficiente e otimizada do ciclo de saneamento.

A apresentação desta tese está estruturada da seguinte forma:

O capítulo um discorre sobre a importância dos recursos hídricos para a vida humana e o desenvolvimento de um país, apontando questões relativas a saneamento e gestão dos recursos hídricos. Em vista do contexto exposto, são apresentadas a justificativa e o objetivo deste trabalho de pesquisa.

O capítulo dois apresenta as partes constituintes de um sistema de abastecimento de água, delineia o cenário da infraestrutura do saneamento no

Brasil, bem como sua atual sistemática de gestão com emprego da Tecnologia de Automação.

O capítulo três apresenta os fundamentos de Inteligência Artificial, Sistemas Especialistas e o estado da arte do emprego de Sistemas Inteligentes no saneamento.

O capítulo quatro apresenta o desenvolvimento da metodologia da arquitetura de hardware e arquitetura de software do SIGASI, testes por meio de simulação e análise dos resultados de desempenho do SIGASI.

O capítulo cinco apresenta as considerações finais, apontando as contribuições deste trabalho e sugerindo propostas para estudos futuros.

O capítulo seis apresenta as referências bibliográficas deste trabalho de pesquisa.

A figura 5 deste trabalho de pesquisa ilustra esta estruturação.

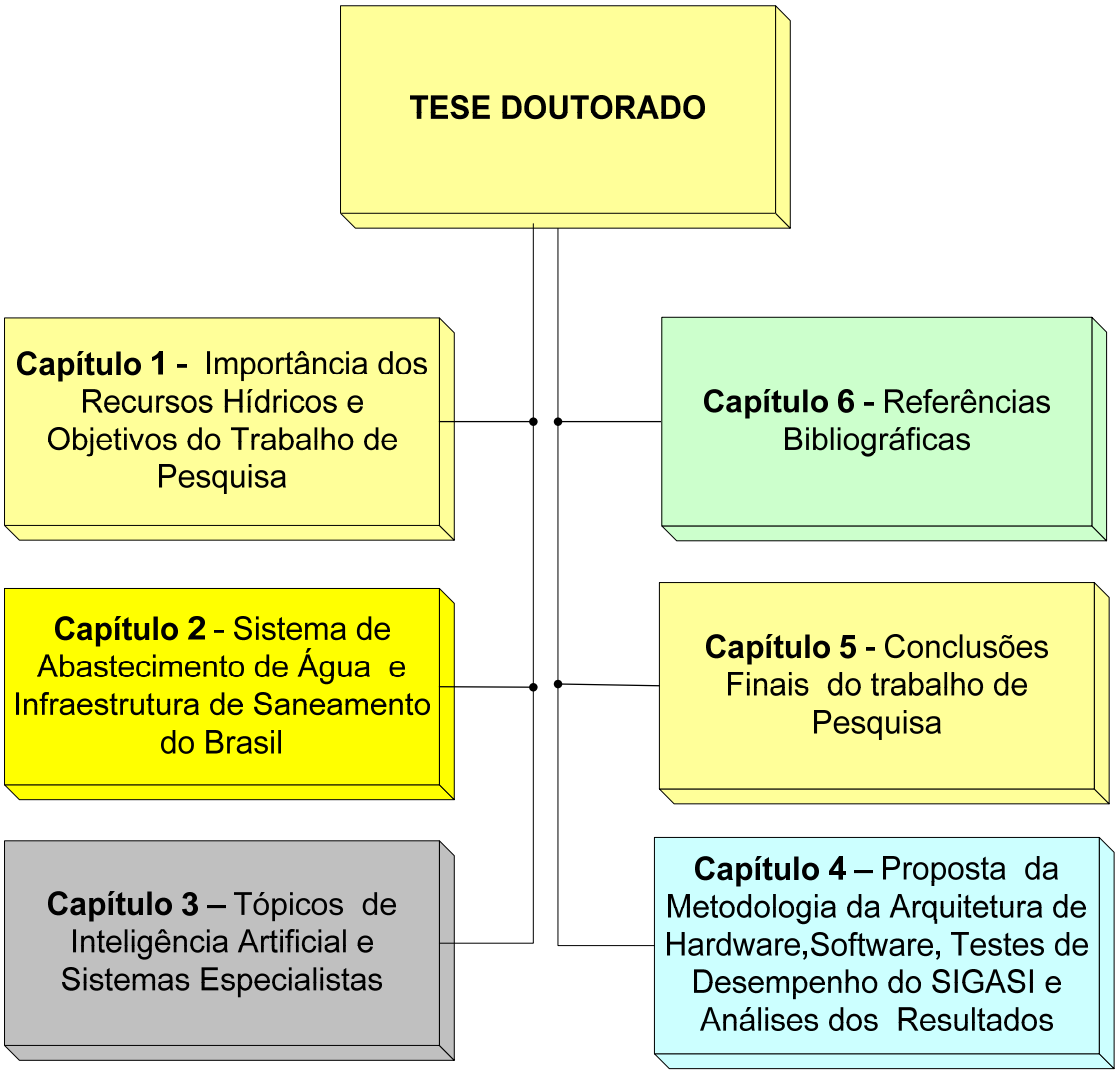


Figura 5 – Estruturação do Trabalho de Pesquisa

2 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E CENÁRIO DA INFRAESTRUTURA DE SANEAMENTO

2.1 Introdução

O abastecimento de água implica no funcionamento conjunto de várias partes, compondo um sistema, que apresenta relações entre o local em que é oferecido e os mananciais ali existentes. Assim, este capítulo apresenta, primeiramente, as partes constituintes de um sistema de abastecimento de água e traça um breve panorama do cenário atual da infraestrutura de saneamento do Brasil. Dado que a gestão dos recursos é fator de primordial importância para o desenvolvimento, coloca-se em pauta, também, a atual sistemática de gestão do saneamento com emprego da Tecnologia de Automação (TA).

2.2 Partes Constituintes do Sistema de Abastecimento de Água

A concepção dos sistemas de abastecimento de água varia muito conforme o porte da cidade, sua topografia e localização geográfica em relação aos mananciais. De um modo geral, os sistemas são constituídos dos seguintes elementos: manancial, estruturas para captação, estação elevatória (EE), adutora, estação de tratamento de água (ETA), reservatório e rede de distribuição [23]. A figura 6 ilustra as partes constituintes de um sistema de abastecimento de água.

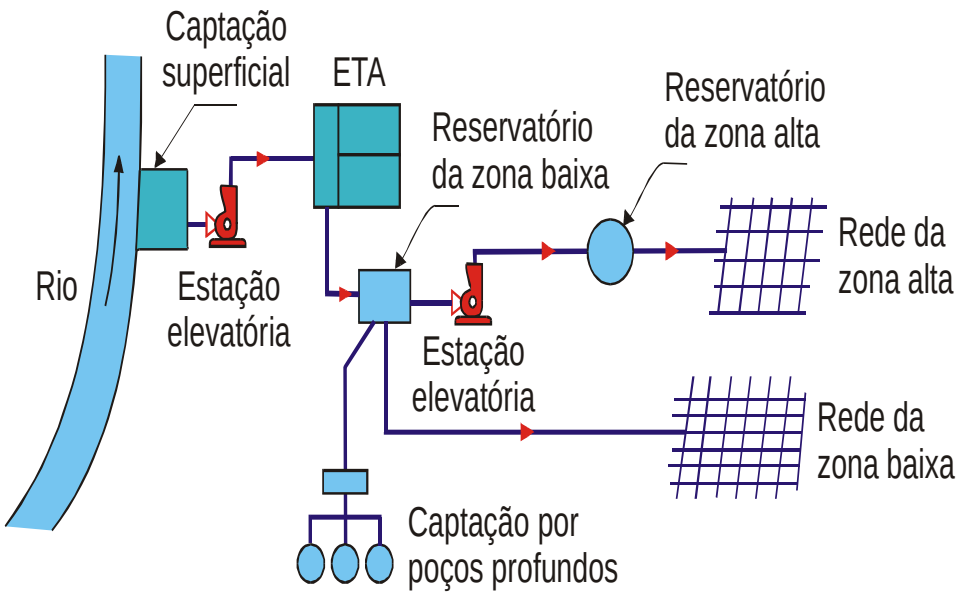


Figura 6 - Sistema de Abastecimento de Água - Fonte: Orsini (1996)

Os principais componentes do sistema abastecimento de água são compostos por:

a. Manancial

É o corpo de água, superficial ou subterrâneo, de onde é retirada a água para o abastecimento. Deve fornecer vazão suficiente para atender à demanda no período de projeto e ser considerado satisfatório sob o ponto de vista sanitário.

b. Captação

É o conjunto de obras destinadas a retirar a água do manancial. Existem vários tipos de captação nos mananciais de superfície, cujas características são determinadas pelo porte e conformação do leito desses corpos de água associados à topografia e geologia locais, bem como pela velocidade, qualidade e variação do nível da água. Na maioria dos casos utiliza-se captação direta

com estruturas como barragem de nível, canal de regularização, canal de derivação, torre de tomada, poço de derivação e reservatório de regularização.

As obras de captação devem ser projetadas e construídas para proporcionar e assegurar, tanto quanto possível, as condições necessárias para a entrada de água da melhor qualidade durante todo o ano. Portanto, durante a elaboração de um projeto, deve-se ter sempre em vista a facilidade de operação e a manutenção a longo prazo [2] [23].

c. Estação Elevatória

Os sistemas de abastecimento de água possuem, normalmente, várias estações elevatórias para o recalque de água bruta e de água tratada. Possuem, também, “boosters”, que são elevatórias destinadas a aumentar a pressão em adutoras ou em redes de distribuição da água. As estações elevatórias de água funcionam com bombas centrífugas que retiram a água do poço de sucção e a recalcam para outra unidade do sistema, como a ETA (Estação de Tratamento de Água), o reservatório ou a rede.

d. Adutora

Adutoras são canalizações dos sistemas de abastecimento que transportam a água entre as unidades que precedem a rede de distribuição. Não distribuem a água aos consumidores, mas podem possuir derivações, as subadutoras. Quanto à natureza da água transportada, as adutoras podem ser classificadas em adutoras de água bruta e adutoras de água tratada. Sob o ponto de vista hidráulico dividem-se nos tipos [2]:

a. adutoras por gravidade, que transportam a água de uma cota mais elevada para outra mais baixa e que podem ser em conduto forçado, onde a água está sob pressão maior do que a pressão atmosférica;

em conduto livre, onde a água permanece sob pressão atmosférica; ou podem, ainda, ser uma combinação de condutos forçados e livres;

b. adutoras de recalque, que transportam a água de uma cota mais baixa a outra mais elevada por meio de uma elevatória; podem ter uma única instalação de recalque ou instalações de recalques múltiplos;

c. adutoras mistas, com trechos por gravidade e trechos por recalque.

e. Estação de Tratamento de Água

Os sistemas de abastecimento de água devem fornecer água potável de boa qualidade à população, sempre em estrita conformidade com as normas e padrões de potabilidade vigentes no país. A Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde [27] estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. O tratamento de água pode se utilizar da coagulação química ou prescindir desse processo. As tecnologias diferenciam-se, também, conforme o tipo de filtração, que pode ser rápida ou lenta [24] [25].

O tratamento de água é composto por várias etapas, representadas por unidades específicas, onde ocorrem processos físicos ou químicos.

Os métodos gerais de tratamento visam à melhoria da qualidade da água para abastecimento, e têm como objetivos a remoção de bactérias, protozoários, microrganismos e demais substâncias e compostos orgânicos deletérios à saúde humana; remoção de gosto e odor; redução da mineralização excessiva e da turbidez e corrosividade.

O processo de tratamento inclui as seguintes etapas: aeração, coagulação, floculação, decantação ou sedimentação, filtração, tratamento por contato, correção da dureza, desinfecção, remoção de gosto e odor, controle da corrosão, cloração e fluoretação. O tratamento inicia-se na entrada da água na estação, na fase chamada de pré-tratamento, que consiste na aplicação de sulfato de alumínio, cal e cloro. A água bombeada do manancial ou água bruta recebe quantidades maiores ou menores desses produtos químicos, conforme a qualidade que apresenta.

A Figura 7 ilustra um esquema geral de tratamento de água, em que são detalhadas as etapas constituintes deste processo [25][26].

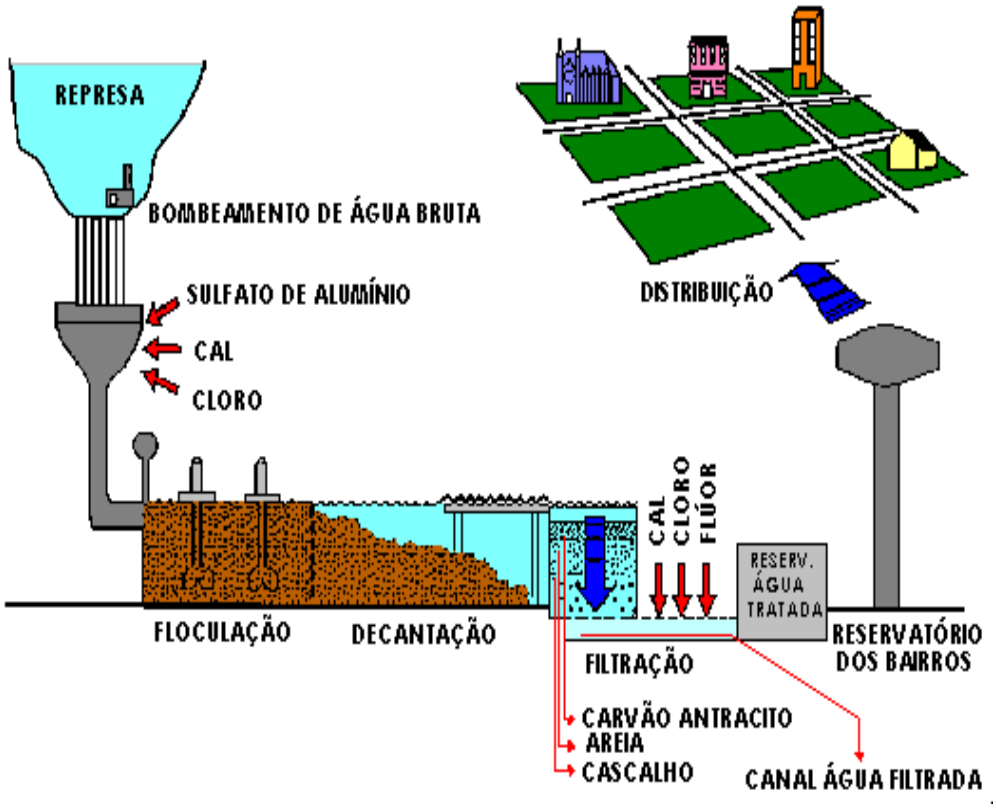


Figura 7 - **Esquema Geral de uma Estação de Tratamento de Água - Fonte: Universidade da Água (2006)**

Aeração é o processo de tratamento que promove o aumento da área de contato entre a água e o ar, a fim de facilitar o intercâmbio ou troca de gases e substâncias voláteis entre eles. A aeração, de modo geral, destina-se a remover gases dissolvidos; introduzir oxigênio na água; remover substâncias causadoras de gosto e odor; remover gás carbônico e reduzir corrosividade e consumo de álcalis a fim de se atingir valor mais elevado de pH (6,0 a 9,5).

O processo de aeração será satisfatório se as seguintes condições forem atingidas simultaneamente: a) concentração de oxigênio dissolvido entre 7 e 10 ppm; b) concentração de gás carbônico entre 3 e 5 ppm; e c) ausência completa de gás sulfídrico [24] [26].

A coagulação aglutina as partículas finas em suspensão e em estado coloidal e as impurezas dissolvidas na água; essa aglutinação resulta em flocos gelatinosos que serão, subsequentemente, removidos pela decantação e filtração.

Os reagentes empregados neste processo são coagulantes, alcalinizantes e auxiliares da coagulação. Os processos de coagulação envolvem a dispersão coagulante, a reação com a alcalinidade para a formação de gel e hidróxido e, finalmente, a aglomeração dessa gelatina para a formação do floco. Esse fenômeno ocorre em dois pontos da ETA; durante a coagulação propriamente dita, que é considerada um processo de mistura rápida e lenta, e durante a floculação, que é considerada um processo de mistura lenta.

Floculação é o processo subsequente ou simultâneo à coagulação, cuja característica fundamental é a formação de aglomerados gelatinosos ou flocos, resultado da reação entre o produto químico coagulante e as impurezas da água.

Decantação ou Sedimentação é o processo de deposição de matérias em suspensão provocado pela ação da gravidade, ou seja, é etapa na qual os flocos submergem e se depositam no fundo do tanque de decantação, separando-se da água. A decantação é a operação de preparo da água para a filtração. Quanto mais eficiente for a decantação, melhor será a filtração.

Filtração consiste em passar a água através de materiais porosos capazes de remover impurezas. Nesta etapa, os filtros retêm os pequenos flocos e impurezas em suspensão que não foram removidos no decantador. Em geral, as unidades filtrantes são formadas por camadas de carvão antracitoso, areia e seixos de tamanhos variados e possuem reservatório para lavagem, que é realizada em períodos preestabelecidos ou determinada pela perda de carga dos filtros.

Correção de Dureza é o processo que controla o excesso de sais de cálcio e magnésio, substâncias que provocam incrustações e conferem gosto acentuado à água.

Correção de pH (6,0 a 9,5) consiste na aplicação de produtos químicos para correção do excesso de acidez ou alcalinidade, que também possuem propriedades incrustantes e acentuam o gosto de sais de cálcio e magnésio presentes na água. O principal objetivo desta ação é proteger as estruturas de armazenamento e distribuição da água da formação de crostas.

Desinfecção é a destruição ou inativação de patógenos transmissores de doenças e de outros organismos indesejáveis.

Controle de Gosto e Odor são os processos físicos e químicos que visam melhorar o paladar de certas águas. As principais causas da ocorrência de

gosto e odor são algas, vegetais em decomposição, bactérias e resíduos industriais.

Fluoretação consiste na aplicação de compostos químicos contendo flúor em dosagens adequadas para a prevenção de cárie dentária. Segundo estudos [2], essa aplicação reduz a incidência de cáries dentárias em até 60%.

Casa de Química é a instalação responsável pela armazenagem, preparação e dosagem dos produtos químicos aplicados nos diversos pontos estratégicos da linha de tratamento da ETA.

f. Reservatório

Os reservatórios de distribuição de água são projetados para cumprir as seguintes funções: funcionar como volantes da distribuição, atendendo à variação horária do consumo; assegurar uma reserva de água para combate a incêndios; manter uma reserva para atender a emergências, como acidentes, reparo nas instalações, interrupções da adução, etc. e manter a pressão na rede de distribuição. Dependendo da configuração e posição em relação à rede de distribuição, podem ser classificados em enterrados, semienterrados, apoiados ou elevados, de montante ou de jusante.

g. Rede de Distribuição

É a unidade do sistema constituída por um conjunto de tubulações que conduz a água para os pontos de consumo. Na rede de distribuição há condutos principais e secundários. Condutos principais são as canalizações de maior diâmetro, responsáveis pela alimentação dos condutos secundários. São dispostos conforme os diferentes traçados das redes que podem ser

ramificadas, malhadas ou mistas. Os condutos secundários, de menor diâmetro, abastecem os consumidores atendidos pelo sistema.

Os valores de pressão recomendados para o funcionamento da rede de distribuição de água no Estado de São Paulo são [2]:

a. pressão estática máxima de 500 kPa (50 m H2O);
b. pressão dinâmica mínima de100 kPa (10 m H2O).

Para atender a esses limites, as redes de distribuição podem ser divididas por zonas de controle de pressão, com reservatórios próprios ou, simplesmente, com válvulas redutoras de pressão – VRP [2],[30].

O estágio final do abastecimento de água é a medição das unidades individuais de consumo, por meio de medidores de pequenas vazões, empregando hidrômetros. Este tipo de medição é denominado micromedição. As medições intermediárias das redes de distribuições são aferidas pela macromedição, feita por equipamentos instalados entre as tubulações de saídas das ETAs e reservatórios ou em malhas de alimentação.

As diferenças entre esses dois tipos de medições formam a base de cálculo para a determinação das perdas físicas de um sistema de abastecimento de água, ponto vital para a atuação da manutenção, que, através de técnicas de gestão, objetiva reduzir o desperdício do produto.

Uma das técnicas utilizadas para redução de perdas físicas envolve a instalação de macromedidores eletromagnéticos (medidores de vazão) nas tubulações de saída de água para a distribuição. Esses medidores fornecem vazões instantâneas de consumo e, por meio de software especialista, podem-se obter curvas de vazão de distribuição e vazões médias / mínimas noturnas. Com isso é possível detectar as oscilações que indicam irregularidade no abastecimento, permitindo o reparo imediato ou direcionando atividades de identificação de fraudes [32].

2.3 Cenário da Atual Infraestrutura do Saneamento no Brasil

Dentre todos os recursos naturais, certamente o mais importante para a existência da vida da humanidade é a água. Durante milênios, constituiu-se em um patrimônio inteiramente livre, de que os habitantes da Terra se serviam despreocupadamente. O volume total de água no planeta é constante e as reservas somam, aproximadamente, 1.400 bilhões de m³. O volume de água doce representa cerca de 37,8 bilhões de m³, ou 2,7% da quantidade total de água no planeta. Deste volume total, os rios representam 0,00009%, os lagos 0,009% e a água contida na atmosfera 0,0009%. O restante da água do planeta está distribuído entre oceanos, calotas polares, geleiras, água subterrânea e água misturada ao solo [37].

A tabela 2.1 apresenta a distribuição de água na biosfera e seu tempo de renovação.

Tabela 2.1 - **Distribuição de Água na Biosfera e Tempo de Renovação - Fonte: ABEAS (1998)**

Local	Volume (m³)	Percentual do Total e da Água Doce * (%)	Tempo de Renovação
Oceanos	1.362.200.000	97,30	3100 anos
Água doce	37.800.000 *	2,70	-
Calotas polares e geleiras	29.181.000	77,20 *	16000 anos
Água subterrânea	8.467.200	22,40 *	300 anos
Água doce de lagos	132.300	0,35 *	1-100 anos
Rios	34.020	0,09 *	12-20 dias
Vapor d'água na atmosfera	15.120	0,04 *	9 dias

O homem tem utilizado, em suas atividades, aproximadamente 2,5 vezes mais água do que a quantidade disponível em todos os rios do planeta, o que vem ocasionando, assim, a utilização desmedida da água existente nos lagos e em lençóis subterrâneos [31].

A tabela 2.2 apresenta o consumo de água no planeta do ano de 1900 até o ano 2000, por setor consumidor.

Tabela 2.2- Consumo de Água por Setor Consumidor - Fonte: Tundisi (2005)

Setor/consumo anual (m^3)	1900	1950	1970	1980	2000
Agricultura	409.000	859.000	1.400.000	1.730.000	2.500.000
Indústria	4.000	15.000	38.000	62.000	117.000
Municipal	4.000	14.000	29.000	41.000	65.000
Reservatório	-	7.000	66.000	120.000	220.000
Total	417.000	895.000	1.533.000	1.953.000	2.902.000

O planeta Terra tem água nos três estados (sólido, líquido e gasoso); as mudanças de estado físico da água no ciclo hidrológico são fundamentais e influenciam os processos biogeoquímicos nos ecossistemas terrestres e aquáticos.

A figura 7 apresenta, com base nas informações do “World Resources Institute” – ONU [33], a porcentagem de consumo hídrico no mundo, por atividade.

Destaca-se a agricultura, por meio da irrigação, como a atividade que mais utiliza água no mundo.

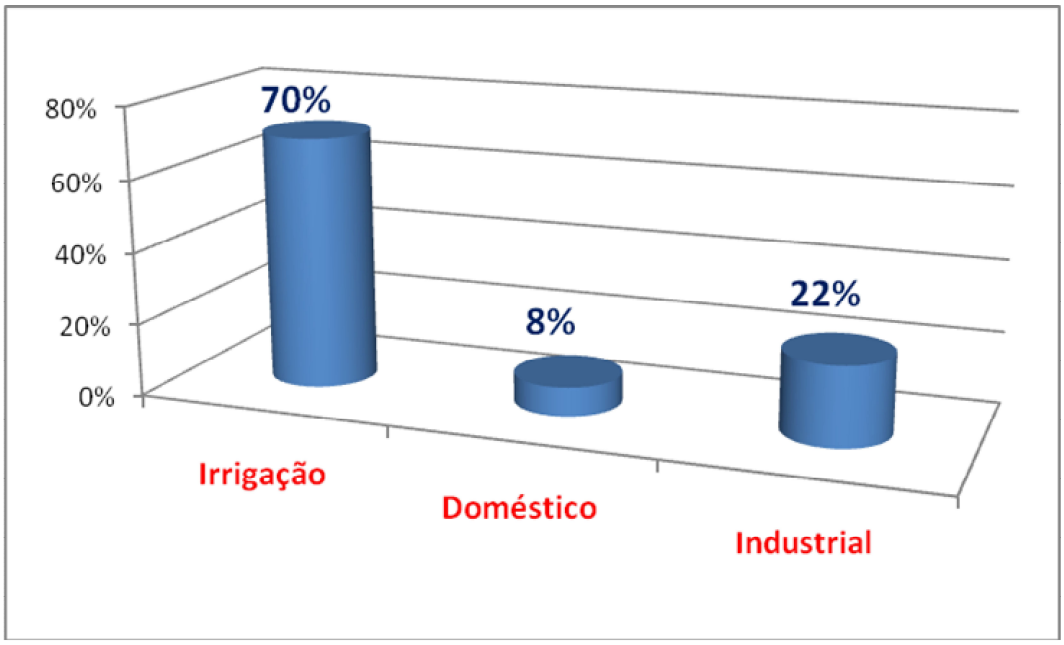


Figura 8 – Consumo Hídrico no Mundo. Fonte: ONU (1999)

Segundo os estudos da ANA – Agência Nacional das Águas [36] a América Latina apresenta a melhor disponibilidade hídrica do planeta, dispondo de 24.973 m³/habitante/ano, valor muito superior à média mundial de 7.055 m³/habitante/ano. A Ásia e parte da África apresentam situação crítica, devido à enorme população concentrada nos países desses continentes. Inserido no contexto Latino-Americano, o Brasil é um país privilegiado no que se refere à disponibilidade hídrica global, dispondo de um volume médio anual de 8.130.000 m³, que representa um volume per capita de 50.810 m³/habitante/ano. Entretanto, a concentração da população brasileira em conglomerados urbanos, alguns dos quais já se caracterizando como mega-cidades, vem ocasionando pressões crescentes sobre o uso dos recursos hídricos.

O Brasil possui, aproximadamente, 12% a 16% das águas doces do planeta, distribuídas desigualmente, sendo que sempre houve grande dependência dos recursos hídricos para o seu desenvolvimento econômico [31].

A água funciona como fator de desenvolvimento, pois ela é empregada em inúmeras aplicações e está diretamente relacionada com a sustentabilidade da economia (regional, nacional e internacional). Os usos mais comuns e frequentes dos recursos hídricos são: água para uso doméstico, irrigação, uso industrial e hidroeletricidade.

A urbanização acelerada em todo o planeta produz inúmeras alterações no ciclo hidrólogo e aumenta, consideravelmente, as demandas para grandes volumes de água, ampliando, também os custos do tratamento, a necessidade de mais energia para distribuição de água e a pressão sobre os mananciais. À medida que se processa o desenvolvimento econômico e se eleva a renda per capita, aumenta a pressão sobre o uso destes recursos hídricos superficiais e subterrâneos [29].

No contexto brasileiro, de acordo com o último Censo (2010), o Brasil apresenta, atualmente, uma população de cento e noventa milhões, setecentos e trinta e dois mil e seiscentos e noventa quatro (190.732.694) habitantes [16]. Esta quantia faz, do país, a quinta nação mais populosa do planeta, ficando atrás apenas dos países: China, Índia, Estados Unidos e Indonésia, enumerados por ordem decrescente em termos populacionais.

O Brasil é um país populoso, porém considerado uma nação pouco povoada, com baixo índice de densidade demográfica. Esta afirmação pode ser entendida pelo fato de a densidade demográfica ser o resultado da divisão da população de um determinado lugar por sua extensão territorial. Assim, no Brasil, são 190.732.694 pessoas em uma extensão territorial de 8.514.876 km², apresentando, aproximadamente, 22 habitantes por km².

O primeiro Censo demográfico realizado no Brasil foi em 1872. A tabela 2.3 ilustra a evolução do número de habitantes, segundo Censo realizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Tabela 2.3 - Evolução do Número de Habitantes no Brasil - Fonte: IBGE (2010)

ANO	NÚMERO DE HABITANTES (milhões)
1872	9.930,478
1900	17.438,434
1950	51.994,397
2000	169.590,693
2010	190.732.694

Conforme estimativas do IBGE, a população brasileira em 2050 será de, aproximadamente, 260 milhões de pessoas, apresentando um aumento populacional de quase 70 milhões de habitantes em relação à população atual. O conhecimento quantitativo da população é de fundamental importância, pois esses dados possibilitam a realização de estimativas sobre mercado de consumo, disponibilidade de mão de obra, além de planejamentos para a elaboração de políticas públicas destinadas à saúde, educação, infraestrutura e saneamento básico.

Os dados apresentados pelo IBGE mostram que, cada vez mais, o setor de saneamento brasileiro necessita atentar para a gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos, uma vez que a população vem aumentando ao longo dos anos e com a perspectiva de continuidade deste processo. Deve-se, também, considerar a escassez contínua dos mananciais, em função da ocupação desordenada das grandes metrópoles, sem nenhum planejamento de

ocupação do solo, bem como dos desdobramentos da industrialização e urbanização.

De acordo com a IWA – “International Water Association” [35]:

> Atualmente existe uma crise de água no mundo. Entretanto, essa crise não é de falta de disponibilidade de água para atender as necessidades da população. É uma crise de falta de gerenciamento dos recursos hídricos que está ameaçando milhões de pessoas e o meio ambiente.

A distribuição de água no planeta não é uniforme, o que produz alterações continentais, regionais e locais no uso dos recursos hídricos, com profundas implicações econômicas [36].

A desigualdade regional do Brasil também reflete-se nos diferentes níveis de acesso ao saneamento básico da população. Segundo Victor Arroyo, chefe de Água e Saneamento para América Latina e Caribe da On-Habitat, agência da Organização das Nações Unidas (ONU) [39]:

> O Brasil possui companhias de saneamento que operam no mesmo padrão de excelência das companhias de primeiro mundo. Entretanto, infelizmente este padrão de qualidade somente está disponível em média para metade da população.

Nas regiões Nordeste e Norte, por exemplo, em termos de saneamento básico, os patamares são semelhantes a diversos países do mundo subdesenvolvido.

Esta avaliação é comprovada com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). A tabela 2.4 apresenta os níveis de atendimento com água e esgotos por unidade consumidora dos prestadores de serviços cadastrados no SNIS, segundo região geográfica.

Tabela 2.4 - Níveis de Atendimento com Água e Esgoto no Brasil, segundo região Geográfica - Fonte: SNIS (2008)

Regiões	Índice de Atendimento por Unidade Consumidora (%)				Índice de Tratamento dos Esgotos Gerados (%)
	Água		Coleta de Esgotos		
	Total	Urbano	Total	Urbano	Total
Norte	57,6	72,0	5,6	7,0	11,2
Nordeste	68,0	89,4	18,9	25,6	34,5
Sudeste	90,3	97,6	66,6	72,1	36,1
Sul	86,7	98,2	32,4	38,3	31,1
Centro-Oeste	89,5	95,6	44,8	49,5	41,6
Brasil	81,2	94,7	43,2	50,6	34,6

A região Sudeste tem o maior percentual de atendimento do país, 90,3% da população em relação à água e 66,6% para coleta de esgoto. A área urbana é ainda melhor assistida, com 97,6 pontos percentuais e 72,1 pontos percentuais, respectivamente. Na região Norte do país, em média, pouco mais da metade da população (57,6%) pode contar com o recurso hídrico e, aproximadamente, 5,6% da população, com a coleta de resíduos.

Os índices médios nacionais de atendimento da população total (urbana e rural), identificados pelo SNIS em 2008, foram de 81,2% para o abastecimento de água e de 43,2% para a coleta de esgotos. Considerando somente a população urbana, os dados evidenciam um elevado atendimento pelos serviços de água, com índice médio nacional igual a 94,7%, enquanto que na coleta de esgotos esse indicador foi de 50,6%. Segundo SNIS (2008), a

visualização espacial do índice de atendimento total com abastecimento de água e com coleta de esgoto distribuída por faixas percentuais, segundo os estados brasileiros, são: para atendimento de água, os estados como Mato Grosso do Sul e São Paulo, mais o Distrito Federal situaram-se na maior faixa (maior que 90%). Na segunda faixa (80,1% a 90,0%) houve uma maior quantidade de estados, num total de 10, sendo que a única região ausente foi a Nordeste. Na terceira faixa (60,1% a 80,0%) apareceram 8 estados, concentrados no Nordeste, à exceção de Tocantins, na região Norte. Nos menores índices, observam-se 5 estados na faixa de 40,0% a 60,0% e apenas um estado, o Acre, na menor faixa (menor que 40%).

Quanto ao índice de atendimento total com coleta de esgotos, os dois casos com melhores marcas (maior que 70%) foram o estado de São Paulo e o Distrito Federal, enquanto que na pior faixa (menor que 10%) situaram-se 4 estados: Rondônia, Pará, Amapá e Piauí. Na segunda melhor faixa (40,1 a 70,0%) ficaram os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Paraná. Os demais estados distribuíram-se nas outras duas faixas, sendo 8 estados entre 20,1% e 40%, e 10 estados na faixa de 10,1 a 20%.

No ano de referência de 2008, a amostra correspondeu à totalização de dados de 4.627 municípios atendidos com os serviços de água e de 1.468 com os serviços de esgotos (respectivamente, 83,1% e 26,4% do total dos municípios brasileiros). Considerando esses dados, os prestadores de serviços da amostra atuam em municípios que possuem uma população urbana de 153,6 milhões de pessoas, no caso dos serviços de água, e 121,0 milhões, no caso dos serviços de esgotos (respectivamente, 80,5% e 63,6% do total do país). A elevada representatividade da amostra do SNIS possibilita uma boa segurança nas análises de desempenho e evolução da prestação dos serviços por agrupamento no que se refere aos estados, bacias hidrográficas, e macrorregiões do país.

Em relação a essas populações é importante ressaltar que não se tratam de populações atendidas com os referidos serviços, mas sim aquelas

residentes nos municípios cujos sistemas são operados pelos respectivos prestadores.

Estas amostras de prestadores de serviços com dados publicados são constituídas por 661 entidades. De acordo com a abrangência adotada pelo SNIS, a amostra está distribuída da seguinte forma: 26 prestadores de abrangência regional (as chamadas companhias estaduais); 7 de abrangência microrregional (empresas e autarquias que atendem a dois ou mais municípios vizinhos em determinados estados) e 628 de abrangência local (os chamados serviços municipais). Para a abrangência local, os dados são organizados e divulgados segundo a natureza jurídica da organização; por exemplo, em 2008, as prestadoras distribuíram-se em 571 prestadoras de direito público (autarquias, departamentos e secretarias municipais), 16 prestadoras de direito privado (sociedade de economia mista, empresas públicas e organizações sociais) e 41 empresas privadas.

A tabela 2.5 ilustra como se distribuem as quantidades de municípios e respectivas populações urbanas no tocante ao uso dos serviços de água e esgoto. A tabela 2.6 apresenta uma distribuição estrutural, segundo o tipo de prestador de serviço para os níveis de atendimento de água e esgoto por unidade consumidora.

Tabela 2.5 - Distribuição dos prestadores de serviços e quantidade de municípios participantes do SNIS em 2008

Prestador de Serviços		População Urbana dos Municípios Atendidos		Quantidade de Municípios Atendidos	
Abrangência	Quantidade	Água	Esgotos	Água	Esgotos
Regional	26	116.455.034	87.844.464	3.980	1.082
Microrregional	7	663.572	604.573	20	14
Local	628	36.463.402	32.517.216	627	372
Brasil	661	153.582.008	120.966.253	4.627	1.468

Tabela 2.6 - Níveis de atendimento com água e esgoto no Brasil, segundo tipo de prestador de serviços - Fonte: SNIS (2008)

Tipos de Prestador de Serviços	Índice de Atendimento por unidade Consumidora (%)				Índice de Tratamento dos Esgotos Gerados (%)
	Água		Coleta de Esgotos		
	Total	Urbano	Total	Urbano	Total
Regional	77,9	93,0	36,3	43,7	36,2
Microrregional	94,8	98,1	55,0	63,9	68,8
Local Direito Público	87,5	95,0	70,7	76,2	26,8
Local Direito Privado	98,1	99,4	72,2	73,7	29,9
Local – Empresa Privada	91,6	96,2	52,8	54,6	44,7
Brasil	81,2	94,7	43,2	50,6	34,6

Com relação à infraestrutura dos sistemas de água e esgoto do Brasil, a tabela 2.7 apresenta uma caracterização global, segundo SNIS - 2008, que permite identificar a estrutura física dos prestadores de serviços cadastrados no SNIS.

Tabela 2.7 - Caracterização Global dos Sistemas de Água e Esgoto dos Prestadores de Serviços - Fonte: SNIS (2008)

Informação	Unidade	Valor
Quantidade de Ligações de Água	unid.	41.055.764
Extensão da Rede de Água	km	469.581
Volume de Água Produzido	mil m3	14.790.079
Volume de Água Consumido	mil m3	5.764.361
Quantidade de Ligações de Esgoto	unid.	18.996.664
Extensão da Rede de Esgotos	km	192.058
Volume de Esgoto Coletado	mil m3	4.150.386
Volume de Esgoto Tratado	mil m3	1.480.998

A tabela 2.7 mostra a diferença da estrutura física do sistema de água em relação ao sistema de esgoto. Esta diferença aponta a necessidade de as companhias promoverem investimentos e planejamentos cada vez maiores na estrutura física do sistema de esgoto. Provavelmente, a coleta e o tratamento dos esgotos sanitários gerados no país são um dos maiores desafios das companhias de saneamento do Brasil.

2.3.1 Consumos Médios Per Capita de Água

Uma informação relevante são os números de consumos médios per capita de água, importantes para as projeções de demanda, para o dimensionamento de sistemas de água e de esgotos e o controle operacional. Estas informações permitem estabelecer parâmetros de referência. A tabela 2.8 apresenta os valores médios per capita publicados pelo SNIS em 2007 e 2008,

segundo os estados, agrupados por região geográfica e totalizando valores do país.

Tabela 2.8 - **Valores do Consumo Médio Per Capita de Água dos Prestadores de Serviços - Fonte: SNIS**

Estados/Regiões	litro/hab/dia Ano 2007	litro/hab/dia Ano 2008	Variação (%) 2008/2007
Acre	118,7	143,7	21,1%
Amazonas	133,3	134,1	0,6%
Amapá	156,7	160,7	2,6%
Pará	151,4	147,4	-2,6%
Rondônia	94,0.	107,3	14,1%
Roraima	154,7	134,1	-13,3%
Tocantins	118,2	123,1	4,1%
Norte	134,1	135,7	1,2%
Alagoas	89,7	89,2	-0,6%
Bahia	122,1	121,7	-0,3%
Ceará	151,8	131,0	-13,7%
Maranhão	115,4	103,8	-10,1%
Paraíba	98,0	92,0	-6,1%
Pernambuco	85,1	90,2	6,0%
Piauí	103,5	109,8	6,1%
Rio Grande do Norte	126,8	116,0	-8,5%
Sergipe	119,1	117,9	-1,0%
Nordeste	114,8	110,5	-3,7%
Espírito Santo	192,4	185,0	-3,8%
Minas Gerais	142,5	138,3	-2,9%
Rio de Janeiro	205,8	236,3	14,8%
São Paulo	175,0	176,0	0,6%
Sudeste	173,8	178,1	2,5%
Paraná	127,0	127,5	0,4%
Rio Grande do Sul	143,7	145,4	1,2%
Santa Catarina	134,0	141,0	5,2%
Sul	134,9	137,2	1,7%
Distrito Federal	182,9	175,6	-4,0%
Goiás	127,1	125,5	-1,3%
Mato Grosso do Sul	122,4	125,5	-1,3%
Mato Grosso	165,4	166,1	0,4%
Centro Oeste	145,2	143,8	-1,0%
Brasil	149,6	151,2	1,1%

A tabela 2.8 mostra que o consumo médio per capita do país em 2008 foi de 151,2 litro/habitante/dia, sendo que, nas médias regionais, resultou em 135,7 litro/habitante/dia na região Norte, 110,5 litro/habitante/dia na região Nordeste, 178,1 litro/habitante/dia na região Sudeste, 137,2 litro/habitante/dia na região Sul e 148,8 litro/habitante/dia na região Centro-Oeste. A região Sudeste, com maior consumo médio regional, foi a única região com valor superior à média do país (18% maior), enquanto que a região Nordeste, com menor valor regional, apresentou resultado 27% inferior à média de todo o conjunto apresentado pelo SNIS.

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), o consumo médio ideal para suprir as necessidades humanas é em torno de 110 litros/habitante/dia. As normas para cálculo de sistemas de abastecimento de água estipulam médias em torno de 150 litros/habitante/dia. Assim como em 2007, também no ano de 2008 o maior consumo médio per capita de água no país foi registrado no estado do Rio de Janeiro (236,3 litro/habitante/dia), 33% superior à média da região Sudeste e 56% maior que a média do país.

O valor do estado foi fortemente influenciado pelo consumo médio per capita da Companhia estadual (CEDAE/Rio Janeiro), igual a 259,5 litro/habitante/dia. Foi o maior valor entre as companhias estaduais, 30% superior ao segundo maior valor, o da CESAN/Espírito Santo (198,8 litro/habitante/dia) e 214% superior ao valor mais baixo, o da CASAL/Alagoas (82,4 litros/habitante/dia). Por sua vez, o menor consumo médio estadual, em 2007, ocorreu no estado de Pernambuco, enquanto que, em 2008, foi registrado em Alagoas (89,2 litros/habitante/dia).

Em ambos os estados o valor médio foi muito baixo nos dois anos, cerca de 20% menor que a média da região Nordeste e 40% inferior à média do país, sendo até mesmo inferior ao recomendado pela ONU.

O consumo per capita de água depende de diversos fatores, entre os quais: hábitos higiênicos e culturais das comunidades, índice de micromedição no sistema de abastecimento, instalações e equipamentos hidráulicos e sanitários dos imóveis, controle exercido sobre o consumo, valor da tarifa e subsídios sociais ou políticos, abundância ou escassez de mananciais, índices de industrialização, pressão na rede e ainda diversos outros fatores [29].

Vale ressaltar que esses dados tratam de valores médios. Diferenças de consumo podem ser encontradas em localidades com padrões diferentes de poder aquisitivo. Por exemplo, na região sudeste, na cidade de São Paulo, no bairro de Higienópolis, o consumo por habitante é de, aproximadamente, 500 litros/dia, enquanto bairros periféricos da zona sul, como Parelheiros, apresentam consumos diários de pouco mais de 100/litros/dia. Nos Estados Unidos, em média, o consumo per capita é cinco vezes maior que no Oriente Médio [28].

2.3.2 Perdas de Água

Segundo dados do SNIS, o valor médio de perdas de água para os prestadores de serviço em 2008 foi de 37,4%, menor valor de toda a série histórica de 14 anos de SNIS, iniciada em 1995. Em relação ao ano de 2007, verifica-se que houve uma evolução de 1,7 ponto percentual. A tabela 2.9 apresenta as perdas de água, em valores médios, segundo tipo de prestadores de serviços, região geográfica e média do país.

Tabela 2.9 - Índice Médio de Perdas de Água dos Prestadores de Serviços - Fonte: SNIS (2008)

Regiões	Tipos de Prestadores de Serviços					Total
	Regional	Micro Regional	Local Direito Público	Local Direito Privado	Local Empresa Privada	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Norte	52,4	-	37,6	-	65,4	53,4
Nordeste	45,8	22,1	37,6	-	-	44,8
Sudeste	36,0	36,4	38,4	27,8	26,4	36,2
Sul	24,8	17,7	29,9	45,4	34,2	26,7
Centro-Oeste	31,8	35,7	34,7	47,6	32,4	33,7
Brasil	37,4	34,2	37,0	32,6	43,8	37,4

Segundo SNIS (2008), para os prestadores de serviços de abrangência regional (as chamadas companhias estaduais), quatro apresentaram índice inferior a 25% (SANEPAR/Paraná, 21%; SANEATINS/Tocantins, 22,8%; CAGECE/Ceará, 23,0%; e CASAN/Santa Catarina, 24,7%) posição ocupada em 2007 apenas pela SANEPAR/Paraná, com 22,3%; isto mostra a ampliação da quantidade de companhias com índices na melhor faixa. Por outro lado, 10 prestadores de abrangência regional apresentaram índices superiores a 50%: AGESPISA/Piauí (52,7%), CAERN/Rio Grande do Norte (53,1%) ,CAER/Roraima (53,2%), CASAL/Alagoas (54,6%), COMPESA/Pernambuco (57,3%), DEAS/Acre (58,7%), CAERD/Rondônia (67,5%), CAEMA/Maranhão (70,3%), CAESA/Amapá (75,0%) e COSAMA/Amazonas (80,7%).

Para o indicador médio de todo o subconjunto de abrangência regional, o índice médio atual (37,4%) apresentou melhora de 1,7 ponto percentual em relação ao do ano de 2007 (39,1%), indicando uma melhora na prestação de serviços desses prestadores.

A figura 9 apresenta os valores do índice médio de perdas de água para os prestadores de serviços regionais, segundo SNIS em 2008.

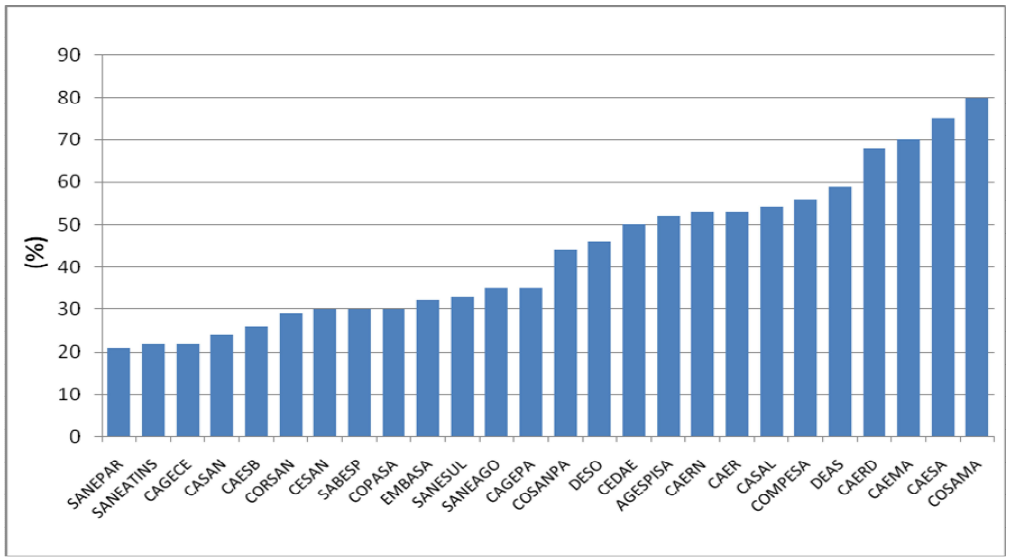


Figura 9 - Índice de Perdas de Água dos Prestadores de Serviços de Abrangência Regional Fonte: SNIS (2008)

Para os prestadores de serviços de abrangência local (os chamados serviços municipais), observam-se, também, diferenças significativas entre valores do indicador de perdas de água, conforme ilustram os números: 245 prestadores com índices menores que 25% e 94 prestadores com índices superiores a 50%. Os resultados apontam um indicador médio de 37,4% para os prestadores de abrangência local. Neste, também, observa-se uma diminuição igual a ocorrida nos prestadores regionais, ou seja, 1,7 ponto percentual em relação ao ano de 2007, quando o indicador foi de 39,1%.

Mesmo entre os subconjuntos de prestadores locais foram verificadas variações no índice médio, conforme dados apresentados: 37,0% nos serviços prestados por entes de direito público; 32,6% no subconjunto de serviços organizados como entes de direito privado e 43,8% nas empresas privadas.

Índices elevados de perdas são consequências de uma infraestrutura física de má qualidade e também de uma deficiência na gestão dos sistemas. Neste sentido, são fundamentais os investimentos na melhoria operacional e na reforma da gestão, de um lado, e o recomendável não investimento em novos sistemas de produção de água, de outro, pois ampliar a produção em um cenário de elevadas perdas pode ter, como conseqüência, perdas de água ainda maiores. Ao reduzir as perdas no sistema de produção de água é possível atender ao crescimento da demanda da população, sem a necessidade de ampliar novos sistemas de sua produção.

Conforme dados fornecidos pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp (2007), a perda de água média no Estado de São Paulo, por exemplo, é de 30,8% em relação ao volume produzido. A perda equivale a um volume de água de, aproximadamente, 1 bilhão de litros de água por dia (12,3 metros cúbicos por segundo) [28], portanto, é necessário estabelecer metas de diminuição das perdas do sistema de água. A Sabesp, que opera o sistema de água e esgoto num número próximo a 366 municípios do Estado de São Paulo, estabeleceu um programa corporativo de redução de perdas de água, por meio de parceria com o governo do Japão – “Japan International Cooperation Agency” - (JICA), que possui, atualmente, um dos melhores índices no tocante a perdas no sistema de abastecimento de água no mundo; em média, pouco menos de 10% do volume produzido.

Segundo o Engenheiro Masahiro Shimomura, consultor do governo japonês (2004) [28], “na cidade de Tóquio a perda média de água não ultrapassa os 4,5%”. O objetivo principal do programa de redução de perdas de água é o de aumentar a eficiência operacional da empresa, buscando redução das perdas, por meio da integração de todas as ações e suporte financeiro que assegure a execução das mesmas. Este programa envolve diversas ações, desde o treinamento dos profissionais nos diversos níveis da companhia, melhorias e ampliação da infraestrutura, combate às fraudes, como também conscientização da população. O Programa de Redução de Perdas de Água da

Sabesp teve início em 2008 com horizonte de 11 anos de execução, tendo, como objetivo, diminuir as perdas do índice de 29,5% (2009) para o índice 13,1% em 2019. De acordo com a Sabesp, são necessários altos investimentos para alcançar esse objetivo, bem como o comprometimento dos profissionais de todos os níveis da companhia, e claro, da colaboração da sociedade.

Segundo a SABESP (2009) [28], esses investimentos são compensados com o retorno financeiro obtido por meio do programa como a redução das perdas reais de água, aliada ao uso racional e redução de desperdícios (principalmente com a implantação de ações visando melhoria da micromedição e redução de fraudes), o que contribui, significativamente, para a preservação dos mananciais. Os benefícios econômico-financeiros obtidos com a implantação do programa são:

a. Redução dos custos de tratamento de água;
b. Redução das despesas com energia elétrica;
c. Redução dos custos de manutenção com a menor quantidade dos reparos de vazamentos, por meio da melhoria da infraestrutura;
d. Redução dos custos financeiros com a postergação de investimentos em ampliação de sistemas de produção de água;
e. Redução dos custos operacionais, por meio da melhoria da qualidade dos serviços, executados com o desenvolvimento de um sistema de capacitação de mão de obra;
f. Aumento do faturamento da empresa, por meio da melhoria da micromedição e redução das fraudes.

2.3.3 Tarifas e Despesas Médias

Os prestadores de serviços participantes do SNIS em 2008 obtiveram receita operacional total de R$ 27,1 bilhões, valor 8,8% maior do que o obtido em 2007, e despesa total com os serviços de R$ 25,6 bilhões, 11,3% maior que em 2007. Em ambos os casos, a variação foi superior à inflação de 2008, medida pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA, que apresentou índice de 5,9%.

De acordo com os dados apresentados pelo SNIS, 79,2% da receita total correspondem aos prestadores de serviços de abrangência regional, 20,4% aos de abrangência local e 0,4% aos de abrangência microrregional, mantendo, aproximadamente, as mesmas proporções verificadas em anos anteriores. Em relação à despesa total com os serviços, verifica-se, também, uma distribuição entre os subconjuntos com valores proporcionais próximos dos obtidos em anos anteriores e também muito similares aos da receita, sendo que, 80,9% correspondem aos prestadores de abrangência regional, 18,7% aos de abrangência local e 0,4% aos de abrangência microrregional.

A tabela 2.10 apresenta dados financeiros dos prestadores de serviços participantes dos SNIS em 2008, segundo abrangência.

Tabela 2.10 - Dados Financeiros dos Prestadores, Segundo Abrangência - Fonte: SNIS em 2008

Abrangência	Receita Operacional total (R$ milhões)	Despesa Total com os Serviços (R$ milhões)	Variação da Tarifa (Média) (R$/ m³)	Tarifa Média (R$/ m³)	Variação da Despesa Total Média (R$/ m³)	Despesa total Média (R$/ m³)
Regional	21.492,6	20.741,12	0,93 a 3,45	2,15	1,10 a 5,35	2,14
Microrregional	114,1	101,0	0,93 a 3,51	2,55	0,90 a 3,02	2,21
Local	5.537,6	4.795,8	0,13 a 3,63	1,40	0,14 a 4,57	1,33
Brasil	27.144,3	25.638,0	0,13 a 3,63	1,95	0,14 a 5,35	1,93

As despesas médias totais com os serviços por m³ faturado dos prestadores de abrangência regional, em 2008, foram maiores que as correspondentes aos serviços locais, tanto no limite inferior da faixa de variação quanto no superior, conforme apresentado na tabela 2.8. Em termos de indicador médio, os prestadores regionais apresentaram um resultado de R$ 2,14/m³ (7,5% maior que no ano de 2007,de R$ 1,99/m³); entre os prestadores de serviços de abrangência local, este valor foi de R$ 1,33/m³ (8,1% maior que o valor de 2007, R$ 1,23/m³).

Para todo o conjunto de prestadores de serviços, a despesa total média foi de R$ 1,93/m³, representando um crescimento de 7,8% em relação ao valor de 2007, que foi de R$ 1,79/m³. Quanto à tarifa média praticada, os prestadores regionais apresentaram um valor de R$ 2,15/m³ (4,4% maior que o valor de

2007, R$ 2,06/m³); entre os prestadores de abrangência local essa tarifa foi de R$ de 1,40/m³ (3,0% maior que o valor de 2007, R$ 1,35/m³).

Para todo o conjunto de prestadores de serviços, a tarifa média praticada foi de R$ 1,95/m³, representando um crescimento de 4,3% em relação ao valor de 2007,(R$ 1,87/m³).

A tabela 2.11 apresenta os valores estaduais da tarifa média para os prestadores de serviços participantes do SNIS em 2008.

Tabela 2.11 - Tarifa Média Praticada dos Prestadores de Serviços, segundo estado, região geográfica e Brasil - Fonte: SNIS em 2008

Estados/Regiões	Tarifa Média (R$/ m³)
Acre	1,40
Amazonas	2,40
Amapá	1,62
Pará	1,40
Rondônia	2,75
Roraima	1,65
Tocantins	2,18
Norte	1,90
Alagoas	2,33
Bahia	1,69
Ceará	1,48
Maranhão	0,93
Paraíba	2,03
Pernambuco	1,93
Piauí	1,99
Rio Grande do Norte	1,79
Sergipe	2,38
Nordeste	1,72
Espírito Santo	1,72
Minas Gerais	1,91
Rio de Janeiro	2,36
São Paulo	1,82
Sudeste	1,92
Paraná	1,81
Rio Grande do Sul	2,48
Santa Catarina	2,34
Sul	2,16
Distrito Federal	2,56
Goiás	2,35
Mato Grosso do Sul	2,43
Mato Grosso	1,36
Centro Oeste	2,28
Brasil	1,95

Observa-se, na tabela 2.11, que o menor valor médio foi do estado do Maranhão (R$ 0,93/m³) e o maior foi de Rondônia (R$ 2,75/m³). Em termos regionais, os estados com maiores tarifas médias são: Rondônia, na região Norte; Sergipe, no Nordeste; Rio de Janeiro, na região Sudeste; Rio Grande do Sul, na região Sul; e Distrito Federal, no Centro-Oeste.

Os valores médios estaduais são representados na figura 10, em ordem crescente por tarifação.

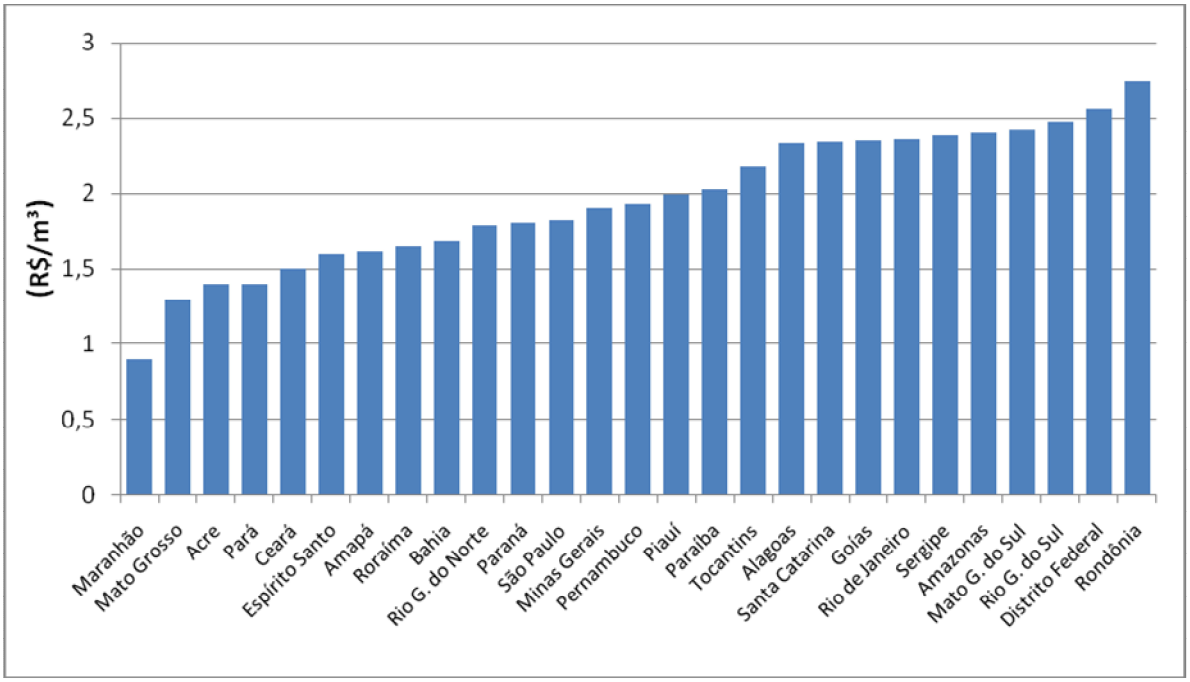


Figura 10 - Tarifa Média Praticada dos Prestadores de Serviços, segundo estado - Fonte: SNIS (2008)

Conforme apresentado neste capítulo, observa-se uma desigualdade regional e empresarial na infraestrutura de prestação de serviços e disponibilidade de água potável, coleta e tratamento do esgoto no país.

Victor Arroyo (chefe de Água e Saneamento para América Latina e Caribe da ON-Habitat, agência da Organização das Nações Unidas (ONU) - 2010), explica que é necessário um agrupamento de capacidade entre as companhias de serviços de água e esgoto no plano municipal. Neste sentido, é preciso

haver colaboração, um trabalho em conjunto para que as empresas mais desenvolvidas auxiliem no desenvolvimento das outras. De acordo com Arroyo [39]:

> Não é apenas um problema de acesso à água, mas também porque não há técnicos formados, não há suficiente capacidade para fazer bons planos de saneamento. Além, é claro, do direcionamento de recursos.

João Gilberto Lotufo, Diretor da Agência Nacional de Águas (ANA), estima que seja necessário investimento de, pelo menos, R$ 41 bilhões até 2015 para a metade dos municípios brasileiros já analisados pelo atlas de abastecimento, elaborado pela agência reguladora [39]. Para Lotufo, caso nada mude, a perspectiva é problemática. Ainda mais nas grandes metrópoles, onde os mananciais estão cada vez mais escassos por conta do crescimento desordenado das cidades.

A ONU (2009) estima que, atualmente, 1 bilhão de pessoas não têm acesso à água potável, e que, nos próximos 25 anos, a situação tende a se agravar, principalmente nas cidades dos chamados países em desenvolvimento; portanto, são necessárias iniciativas que melhorem e otimizem a gestão do uso dos recursos naturais.

As empresas sempre procuram aplicar novas tecnologias para atender aos projetos de renovação, manutenção, ampliação e otimização dos serviços, com vistas à disponibilidade do produto e redução do desperdício. A automação é uma das tecnologias que vêm sendo aplicadas para esse fim. Percebe-se que a automação de sistemas pode contribuir, significativamente, para um melhor controle e aproveitamento dos vários recursos naturais, seja no simples controle da uma estação elevatória de água ou no controle operacional de um sistema de abastecimento de água de uma cidade.

2.4 Cenário da Atual Gestão de Saneamento com Emprego da Tecnologia de Automação

Devido à importância dos sistemas de abastecimento de água têm-se envidado grandes esforços e direcionado elevados investimentos, particularmente nas últimas décadas (1990 e 2000), para levar água de boa qualidade ao maior número possível de usuários. Isso vem ocorrendo, de maneira acentuada, na maioria dos países em desenvolvimento, cujo fornecimento desse serviço é realizado de uma forma mais precária. Além de um serviço de qualidade, é necessário promover a otimização das condições operacionais e de gestão.

A realidade brasileira em relação ao sistema de abastecimento é marcada por desigualdades de abastecimento e de qualidade dos serviços prestados [vide item 2.3]. Enquanto que algumas regiões são atendidas por sistemas de abastecimento comparados a sistemas de abastecimento de países subdesenvolvidos, outras são atendidas por companhias cujo padrão é de reconhecida excelência. Muitas destas companhias têm desenvolvido e implementado projetos de automação em sistema de abastecimento (Sabesp-São Paulo, Sanepar - Paraná, Embasa - Bahia e Copasa – Minas Gerais). Entretanto, deve-se observar que não existe, até o presente momento, uma cultura de padronização de projetos instituída e definida entre as companhias.

Entre as inúmeras tecnologias desenvolvidas, a automação de processos operacionais e administrativos representa a maior contribuição da Tecnologia da Informação aos sistemas de abastecimento de água, tanto operacional quanto gerencial [32].

Os principais motivos para se justificar o investimento em automação em sistema de abastecimento de água referem-se à melhoria do tratamento e distribuição de água através do monitoramento e controle em tempo real, redução de custos operacionais, por meio do gerenciamento de energia elétrica consumida e controle de perdas físicas no sistema.

Mário Filho [34] explica que o conceito de automação em sistemas de abastecimento de água assemelha-se muito ao que acontece no setor elétrico. Da mesma forma que esse segmento pode ser dividido em geração, transmissão e distribuição de energia, o setor de saneamento possui a produção de água, transporte para os reservatórios, distribuição aos consumidores, coleta e tratamento dos esgotos.

A automação em saneamento em muitas companhias ainda é pontual. Isto é reflexo da falta de planejamento e de recursos das companhias de saneamento, que se perpetuou por várias décadas (vide item 1.4). Um entrave enfrentado para a adoção da automação neste segmento são os aspectos geográficos, que influenciam os meios de comunicação. Geralmente, as unidades remotas de monitoração e controle estão instaladas em locais com pouca infraestrutura de telecomunicação ou energia elétrica, implicando na utilização de estruturas alternativas como a telefonia celular, transmissão por ondas de rádio, frame-relay, dentre outras.

O volume de recursos envolvidos na automação do sistema de abastecimento de água é significativo, mas pode ser dividido em três grandes conjuntos básicos: o controle automático, a supervisão e a aquisição de dados. Entretanto, dependendo do sistema e da localidade, cada um destes conjuntos é aplicado isoladamente:

A figura 11 ilustra os três grandes conjuntos básicos de automação empregados no sistema de saneamento.

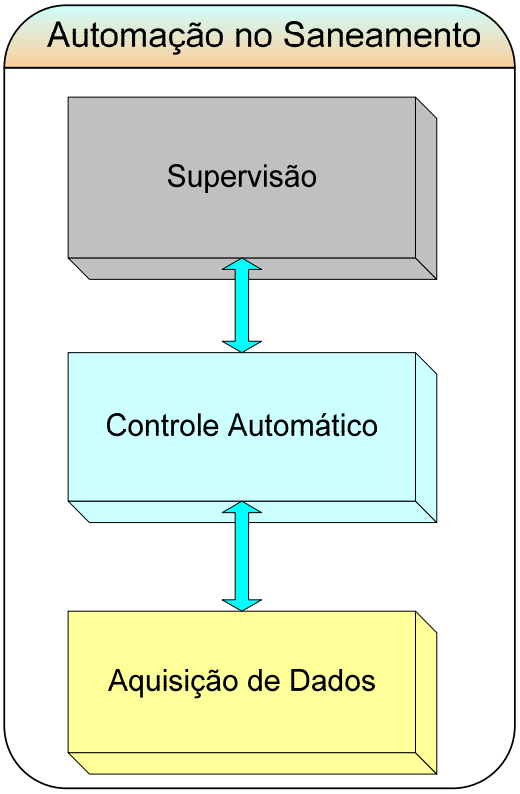


Figura 11 – **Conjunto Básico de Automação no Saneamento**

O controle automático é responsável pela manutenção das condições operacionais do processo dentro de parâmetros predefinidos, sem a necessidade de intervenção humana. Lê as condições do processo por meio de instrumentos e atua nos sistemas de controle de posição de válvulas, velocidade de motores, dosagem de produtos químicos, níveis dos reservatórios, vazões e pressões do sistema.

A supervisão eletrônica utiliza tecnologias de comunicação de dados e sistemas computacionais para concentrar todas as informações de um sistema, instalação ou conjunto de instalações em um único posto de operação. Este posto é denominado Centro de Controle Operacional – CCO. Este Centro é composto por uma estação SCADA (“Supervisory Control and Data Acquisition”), onde estão interligadas todas as áreas da automação com geração de alarmes, relatórios e gráficos de acompanhamento e, também,

algumas estações “Clients”, que fornecem informações para os setores de engenharia, manutenção e gerência administrativa da empresa, filtrando a informação conforme a necessidade de cada setor. Um ou mais operadores podem operar grande quantidade de equipamentos distribuídos ao longo de uma extensa área. Assim, reduz-se a necessidade de destacar operadores para todas as estações elevatórias de água. A utilização de recursos gráficos e rotinas de alarme possibilitam a visualização imediata do estado do processo e de falhas em equipamentos.

O processo de aquisição de dados emprega tecnologias de comunicação, sistemas computacionais e de banco de dados para o armazenamento e análise das informações sobre o processo. Os dados armazenados podem ser exibidos em forma de tabelas ou gráficos que apresentam uma visão instantânea da evolução do processo. Há também um esforço muito grande das companhias de água para integrar os dados do processo com o sistema corporativo, a fim de possibilitar a gestão global do sistema. Das tecnologias empregadas para este fim, pode-se destacar, por exemplo, o PIMS - (“Process Information Management Systems”). De forma geral, os dados armazenados são utilizados para otimizar parâmetros de controle, analisar grandes períodos de tempo, determinar causas de falhas, realizar manutenção preditiva e monitorar o comportamento hidráulico do sistema quando uma determinada bomba é ligada e desligada (análise e eventos)

Exemplificando com dados da Companhia de água Sabesp, as figuras 12, 13 e 14 ilustram telas de Supervisão e Controle Operacional em tempo real de um setor de abastecimento de água, na cidade de São Paulo.

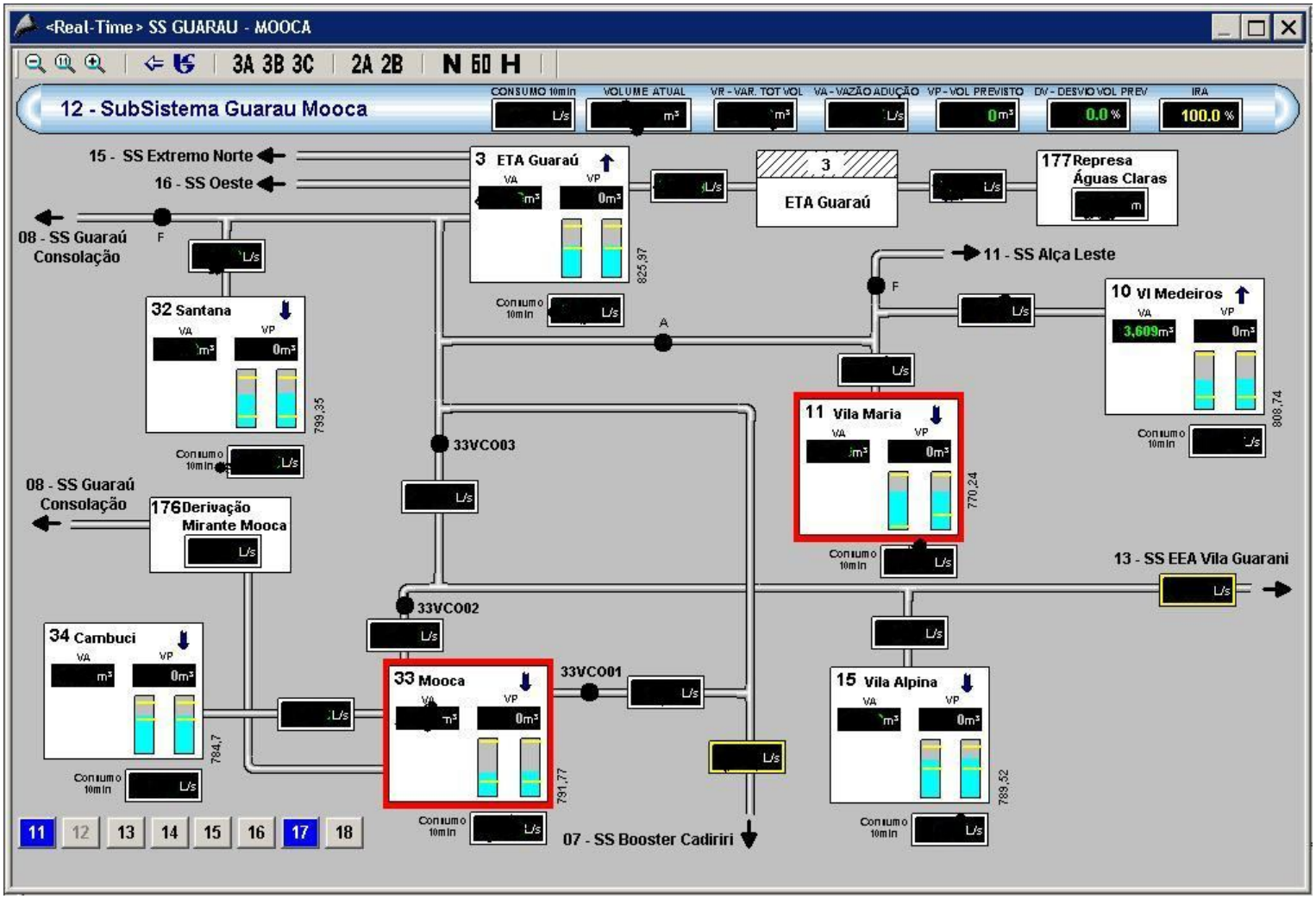


Figura 12 – Supervisão e Controle Operacional do Sistema de Abastecimento de Água - Fonte: Sabesp (2011)

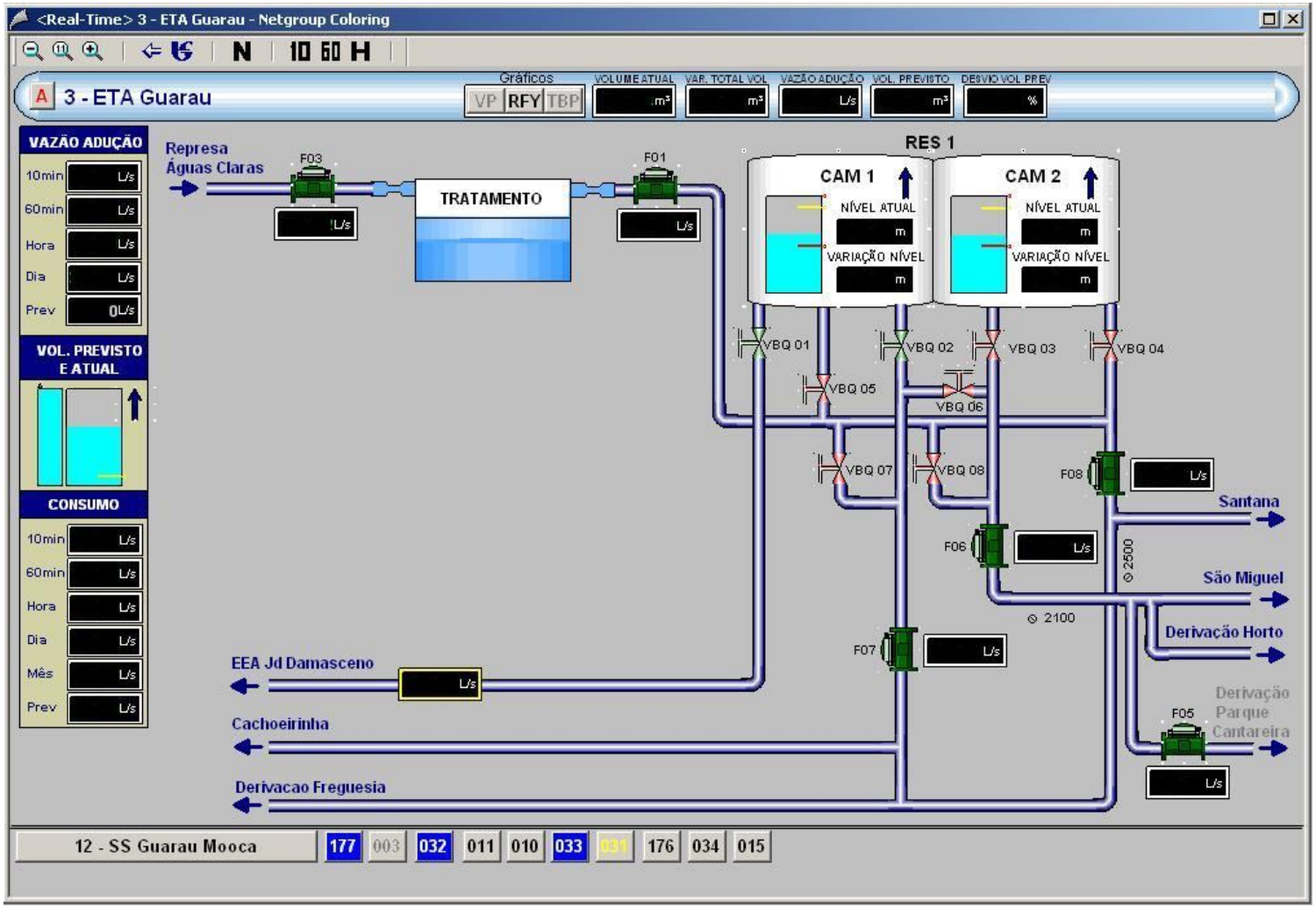


Figura 13 – Supervisão e Controle Operacional do Sistema de Abastecimento de Água - Fonte: Sabesp (2011)

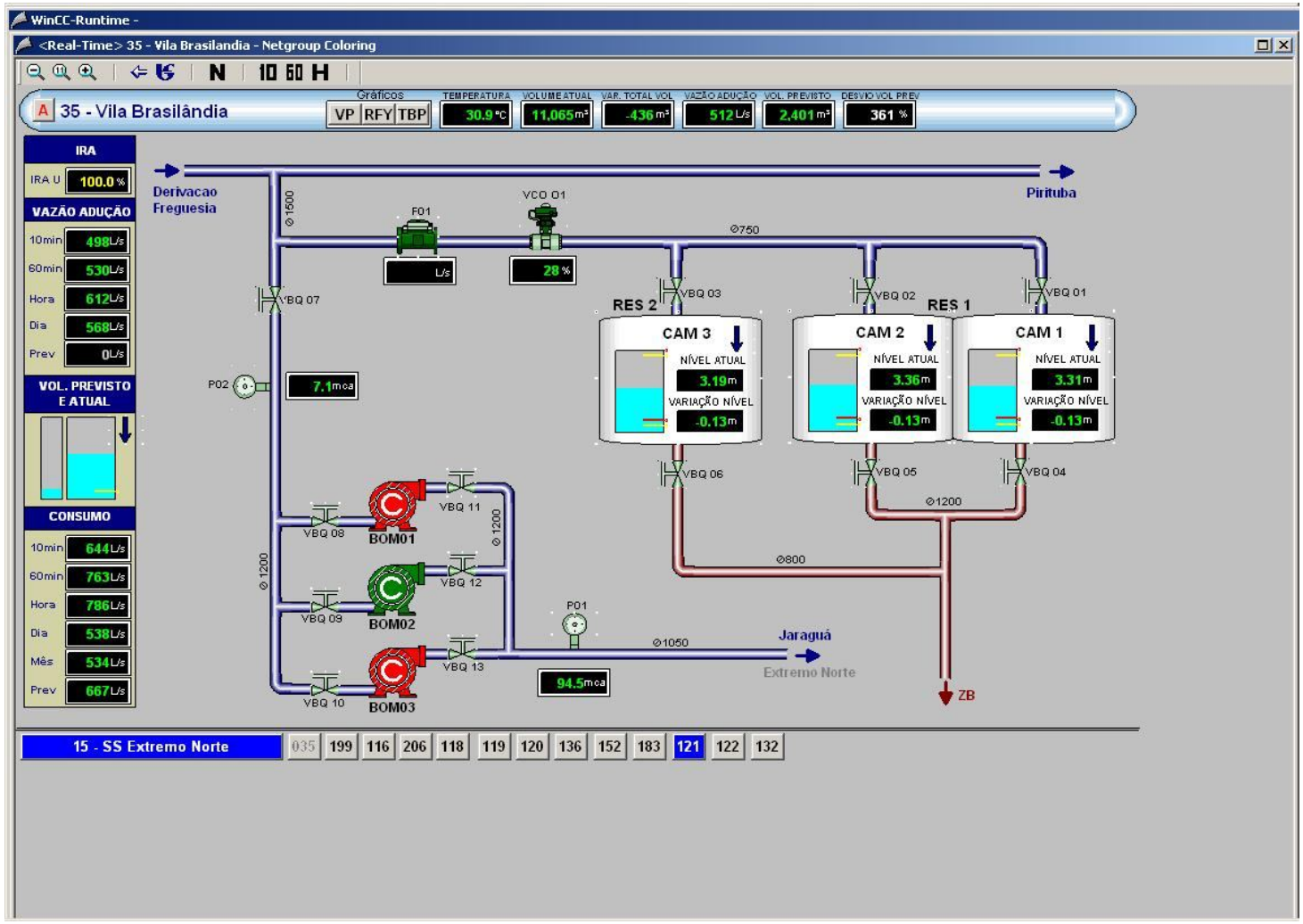


Figura 14 – Supervisão e Controle Operacional do Sistema de Abastecimento de Água - Fonte: Sabesp (2011)

A tecnologia de automação é empregada no sistema de saneamento com a intenção de otimizar os processos operacionais, sobretudo possibilitar a melhoria da gestão das companhias de saneamento básico do Brasil; contudo, infelizmente, ainda essa tecnologia não é empregada no saneamento, de forma padronizada, no país, dificultando a gestão e a otimização de todos os recursos hídricos disponíveis.

Deve-se observar que mesmo os sistemas de abastecimento mais modernos do Brasil deverão ser aprimorados para que os mesmos possam atender às necessidades crescentes de otimização dos recursos hídricos.

Neste contexto, no sentido de contribuir com a gestão dos sistemas de tratamento de água e dos recursos hídricos empregando a Tecnologia de Automação, em recente trabalho de mestrado, foi elaborada (Souza; Marcelo) [25] a dissertação intitulada: “Proposta de um Sistema de Gestão Empregando Instrumentação Inteligente e Redes de Campo na Automação do Processo de Tratamento de Água”.

A pesquisa do mestrado teve, como objetivo, propor uma nova sistemática de gestão no sistema de tratamento de água com base nos atuais desenvolvimentos tecnológicos da instrumentação inteligente e das redes de campo, denominada de “AETAII – Automação da Estação de Tratamento de Água com Instrumentação Inteligente”.

Neste trabalho de pesquisa, a proposta é desenvolver um modelo de gestão integrada que empregue Sistema Especialista e Engenharia do Conhecimento associadas à Tecnologia de Automação (TA); se implementado, este modelo poderá apoiar, de forma automática, os operadores e gestores do ciclo de saneamento na tomada de decisões, tornando-as, desta forma, sistematizada, assertivas e mais eficientes.

3 TÓPICOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, SISTEMA ESPECIALISTA E ESTADO DA ARTE DO EMPREGO DE SISTEMAS INTELIGENTES NO SANEAMENTO

3.1 Introdução

Conhecer os fundamentos básicos da ciência de inteligência artificial e suas áreas de aplicação é subsídio para compreender os Sistemas Especialistas e suas principais aplicações. Entre elas, seu possível emprego na área de saneamento. Estes são os assuntos abordados no presente capítulo que discorre, também, sobre o estado da arte dos sistemas inteligentes empregado em sistema de saneamento.

3.2 Conceituação de Inteligência

A Inteligência Artificial (I.A) nasceu pela tentativa de aprender como os seres humanos pensam e resolvem problemas, explicitando metodologias e introduzindo-as na programação de computadores. A ideia era construir sistemas que fossem “inteligentes” e capazes de pensar [40].

De uma maneira simplificada, pode-se afirmar que a área da Inteligência Artificial (I.A) procura utilizar os computadores para emular o processo do pensamento humano durante a resolução de determinados problemas. Entretanto, o conhecimento de como se processa o pensamento e a tomada de decisão no ser humano ainda não está completamente compreendido e possui vários mistérios. Muitas aplicações de I.A usam os computadores para realizar ou automatizar tarefas de uma forma “inteligente”, ou seja, de uma forma que, se feita por um ser humano, seria considerada uma ação inteligente. Estas aplicações, atualmente, são muitas vezes chamadas sistemas inteligentes.

Apesar de não haver uma definição totalmente aceita de forma unânime sobre o que é inteligência, assume-se que o ser humano possui um tipo de inteligência característica que se traduz pela capacidade de compreender, interpretar, sistematizar e transformar o universo a sua volta [21].

Qualquer aplicação computacional que execute tarefas, consideradas pelos seres humanos como inteligentes, pode ser denominada um sistema baseado em inteligência artificial. Os processos de pensar e decidir do ser humano apresentam as seguintes características:

a) Raciocínio – é o processo de inferência a partir de objetivos, fatos e conhecimentos, visando obter possíveis ações. Ele está associado à previsão e ao planejamento;
b) Decisão – é o processo que, considerando as incertezas e as preferências, escolhe apenas uma ação dentre as diversas alternativas, para o problema em questão;
c) Aprendizagem – é o processo que, a partir dos resultados alcançados por uma decisão, valoriza ou não, no futuro, decisões semelhantes.

Um sistema de inteligência artificial está interessado em modelar e implementar em computadores, programas que possuam uma ou várias dessas características citadas anteriormente.

3.3 Introdução à Inteligência Artificial

Segundo a Epistemologia, [21], [40] Inteligência vem do latim “intelligentia” que é faculdade de aprender ou compreender. Artificial vem do latim “artificiale”, produzido pela arte ou pela indústria, dissimulado, fingido. Sendo assim, Inteligência Artificial é um tipo de inteligência produzida pelo homem para dotar as máquinas de algum tipo de habilidade que simula ou emula a inteligência

humana. Existem diversas definições de Inteligência Artificial. Algumas das mais empregadas no meio acadêmico são:

> “Inteligência Artificial é o estudo de como fazer os computadores realizarem coisas, que no momento, as pessoas fazem melhor “[40].

> “Campo de estudo que procura explicar e emular comportamento inteligente em termos de processos computacionais”[42].

> “Um ramo da ciência da computação que se dedica à automação de comportamento inteligente”[41].

> “A arte da criação de máquinas que fazem funções que requerem inteligência quando feito por pessoas”[43].

Inteligência Artificial é o resultado da aplicação de técnicas e recursos, especialmente de natureza não numérica, viabilizando a solução de problemas que exigiriam do humano certos graus de raciocínio e de perícia. A solução destes problemas com recursos tipicamente numéricos é muito difícil. De uma maneira geral, pode-se dizer que um dos principais objetivos da I.A é tratar a inteligência genérica como um fenômeno e poder reproduzi-lo computacionalmente, conforme as necessidades.

3.4 Áreas da Inteligência Artificial

Os chamados sistemas inteligentes abrangem uma série de técnicas como: os sistemas especialistas, os sistemas baseados na lógica “fuzzy” ou difusa, as redes neurais, os algoritmos genéticos e aprendizado computacional / de máquina. Apesar de cada uma destas técnicas terem fundamentos e

aplicações diferentes, todas têm um ponto em comum: o fato de terem se originado na tentativa de imitar uma característica do ser humano ou da natureza. Excecão é feita ao Aprendizado de Máquina que tem, entre seus objetivos, o desenvolvimento de novos algoritmos para aprender a partir de dados e cujo foco principal é a eficiência computacional, do ponto de vista de formalismo matemático, e a complexidade computacional. As demais técnicas nasceram com a pretensão ou vontade de reproduzir artificialmente a inteligência dos seres humanos e da natureza não modelados ainda de maneira fenomenológica. Assim, as principais áreas da I.A são: Lógica “Fuzzy”, Redes Neurais, Algoritmo Genético, Aprendizagem de Máquina e Sistemas Especialistas. A figura 15 ilustra estas áreas.

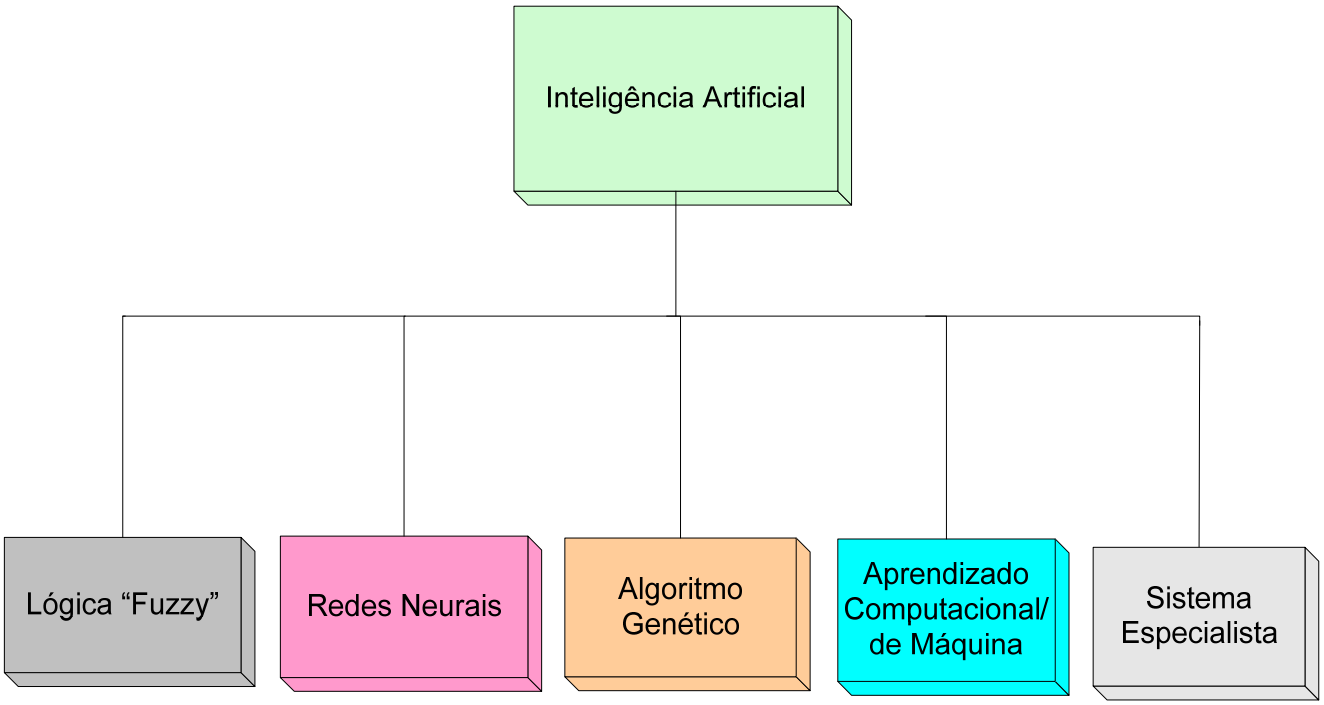


Figura 15 - Principais Áreas da Inteligência Artificial

3.4.1 Lógica Fuzzy

A teoria de subconjuntos “Fuzzy” nasceu da constatação de que quando a complexidade de um sistema aumenta, a habilidade para concluir fatos e tomar decisões que sejam, ao mesmo tempo, precisos e significativos, tende a diminuir até um limite a partir do qual precisão e relevância passam a ser características quase excludentes [44] [47]. Desta forma, esta teoria de subconjuntos Fuzzy teve, como objetivo, criar um sistema que permitisse representar conhecimentos complexos, incertos, contraditórios e incompletos de uma maneira matemática e lógica.

Lógica Fuzzy [21] é também denominada de conjuntos difusos ou lógica nebulosa. Ela foi estruturada por Lofti Zadeh, da Universidade da Califórnia, no ano de 1965. É uma metodologia que serve para representar, manipular e modelar informações incertas. A lógica difusa torna-se importante na medida em que o mundo em que os seres humanos vivem não é constituído por fatos absolutamente verdadeiros ou falsos. Essa lógica permite representar valores de pertinência (grau de verdade) intermediários entre os valores de verdadeiro e falso da lógica clássica (bivalente). A lógica difusa pode ser aplicada, por exemplo, na construção de Sistemas Especialistas para descrever fatos imprecisos como: velocidade (rápido, lento), tamanho (grande, médio, pequeno), etc. Para que isso seja feito é necessário estabelecer parâmetros de pertinência e não pertinência pelos quais os diferentes graus de verdade podem ser atribuídos.

Uma regra “Fuzzy” pode ser definida matematicamente, atribuindo a cada indivíduo um valor que represente o seu grau de pertinência. Esse grau corresponde a quão similar ou compatível o individuo é de uma dada regra “Fuzzy”. Esses graus de pertinência são, frequentemente, representados por números reais em um intervalo fechado entre 0 e 1. Devido ao conceito de membro total ou não membro total, respectivamente representados pelos

números 1 e 0, pode-se considerar que as regras clássicas são um caso restrito das regras Fuzzy, em que apenas esses dois valores (1 ou 0) são permitidos.

3.4.2 Redes Neurais

Muitos pesquisadores [46], [21], [51] consideram Redes Neurais “R.N.s” como um sistema de plausibilidade biológica, ou seja, dotado de uma arquitetura que não é mais do que uma aproximação da estrutura do cérebro animal e que, em vez de ser pré-programada, aprende em determinado ambiente de aprendizagem. “R.N.s” representam um conceito de sistema de processamento em que os modelos são feitos com base no que se sabe dos princípios do processamento neurofisiológico.

Com o advento e o desenvolvimento da Inteligência Artificial surgiu a ideia de representar, por meio de determinados programas, o funcionamento do processo de aprendizagem do cérebro humano. A tentativa de simular a rede neural do cérebro deu origem à chamada Rede Neural Artificial. Os trabalhos sobre R.N.s iniciaram-se na década de 40, na Universidade de Illinois, com o neurofisiologista McCulloch e o matemático Walter Pitts. Eles estabeleceram uma analogia entre o processo de comunicação das células nervosas vivas e o processo de comunicação por transmissão elétrica, e propuseram a criação de neurônios formais. Em 1947 eles conseguiram demonstrar que era possível conectar os neurônios formais e formar uma rede capaz de executar funções complexas.

Existem muitas referências [51], [47], [46] sobre a aplicação de R.N.s na resolução de diversos problemas, porém, a maioria refere-se à aplicação de um único tipo de rede “Back-Propagation”, cujo desempenho já foi testado e aprovado em muitas aplicações. Cada modelo de rede possui diferentes propriedades que, devido às características inerentes, as tornam adequadas à resolução de determinada classe de problemas. As R.N.s são modelos que

utilizam o paradigma conexionista na resolução de determinado tipo de problema, o qual procura entender e emular soluções baseado em propriedades com alto grau de Embora sejam diversas as aplicações de Redes Neurais, todas têm em comum a possibilidade de estabelecer associações entre entradas e saídas, conhecidas observando-se um grande número de exemplos. Uma das características importantes das RN's é a sua velocidade de resposta, mesmo se esta for aproximada. As RN's são utilizadas em substituição aos métodos tradicionais de programação, quando as regras não são determinísticas ou demasiadamente complexas. Entretanto, as RN's não são adequadas para problemas envolvendo regras bem definidas ou problemas procedurais, tais como estratégias, planejamento, ensino: nessas situações é conveniente o emprego de Sistemas Especialistas.

Algumas áreas de aplicação de Redes Neurais [50] incluem: reconhecimento de imagens, reconhecimento de caracteres de escrita manual, tradução automática de texto para voz, reconhecimento de sinais de radar, classificação de impressões digitais, prognóstico de reações químicas, entre outras.

3.4.3 Algoritmo Genético

Segundo Saiko [47], **"**os algoritmos genéticos são métodos de busca inspirados nos mecanismos de seleção natural (teoria da evolução) e da genética". Eles combinam um mecanismo de valorização dos melhores indivíduos, ou dos mais adaptados, ao objetivo em questão, com uma estrutura para combinar e reproduzir aleatoriamente estes indivíduos, criando uma nova população. Assim, a cada geração, um conjunto de novos indivíduos é criado, utilizando-se informações contidas na geração anterior.

Embora o algoritmo genético use um método heurístico e probabilístico para obter os novos elementos, ele não pode ser considerado uma simples

busca aleatória, uma vez que explora, inteligentemente, as informações disponíveis de forma a buscar novas criaturas ou soluções capazes de melhorar ainda mais um critério de desempenho.

Com o desenvolvimento da teoria da evolução e da genética, John Holland desenvolveu um algoritmo de busca chamado algoritmo genético. Este algoritmo ficou mais popularizado em 1989 por David E. Goldberg, que o aplicou para resolver um problema de controle e otimização na transmissão de gás natural em um gasoduto.

Assim como Darwin (teoria da evolução) analisava uma população de indivíduos que sofriam modificações ao longo das gerações, o algoritmo genético também tem, como base, a análise de uma população, formada de possíveis soluções do problema a ser tratado. Inicialmente, essas soluções são geradas aleatoriamente e são representadas pelos indivíduos ou cromossomos que serão manipulados. O sistema avança na direção da melhor solução por meio da aplicação dos operadores genéticos, tais como recombinação e mutação.

Segundo Goldberg [48], as principais características dos algoritmos genéticos são dadas pelos fatos de que:

a. Codificam o conjunto de parâmetros;
b. Trabalham com uma população de pontos a cada passo do método e não com um único ponto;
c. Usam apenas a informação do valor da função objetivo, e não outros conhecimentos como as suas derivadas;
d. Usam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

A codificação permite transformar, por exemplo, os parâmetros do problema em questão em um número binário (conjunto de 0 e 1’s). Este número será manipulado pelos operadores do algoritmo. A vantagem é que o algoritmo

genético – AG - pode tirar vantagem das similaridades entre dois números binários.

A cada passo do AG existe uma população de pontos ou de prováveis soluções, em que se avalia a função objetivo; trata-se de uma técnica de otimização. Esta função é utilizada para avaliar as soluções produzidas, associando a cada uma delas uma nota. A vantagem desta multiplicidade de pontos é que o algoritmo avalia vários picos ou regiões em paralelo, e a probabilidade de obter um ótimo local é menor do que outros métodos que trabalham com um único ponto a cada iteração.

O fato do AG não necessitar de outra informação, além do valor da função objetivo, torna este algoritmo mais robusto, pois pode ser aplicado a um número maior de problemas; portanto, ele não apresenta as restrições de continuidade e existência das derivadas da função objetivo. Ele também pode incorporar conhecimentos de um problema específico de forma a acelerar o processo de busca.

Os AGs possuem um procedimento determinístico de busca que usa a probabilidade como uma ferramenta para guiar na escolha dos novos pontos de busca. Eles não são um método puramente probabilístico ou aleatório. Essas quatro características dos algoritmos genéticos conferem a este método de otimização certa robustez que pode ser uma vantagem, quando comparado com outros métodos de busca para resolução de um dado problema.

3.4.4 Aprendizado de Máquina

Desde o começo da história da Inteligência Artificial (1950) [22], [51], pesquisa-se sobre a possibilidade das máquinas computacionais terem ou não capacidade de desenvolver as habilidades de inteligência e de aprendizado. O aprendizado computacional como ramo organizado da ciência surgiu com o artigo seminal de G. Valiant em 1984 em que um modelo teórico de

aprendizado, suficientemente geral, foi proposto. Com o modelo de Valiant como ponto de partida, a seguinte definição tornou-se aceita: “O aprendizado computacional é a teoria que estuda uma coleção de modelos matemáticos de aprendizado de máquina, e tem entre seus objetivos o desenvolvimento de novos algoritmos para aprender a partir de dados.” [22].

Esse ramo da ciência da computação aproxima-se de outras disciplinas com objetivos semelhantes, como a Estatística e Aprendizado de Máquina. No entanto, seu foco principal está na eficiência computacional, do ponto de vista de formalismo matemático e na complexidade computacional. O modelo proposto por Valiant baseia-se em três premissas fundamentais [22]: O Aprender é probabilístico (processo aleatório de geração de dados); Algoritmos eficientes e Algoritmos gerais. A ciência do aprendizado computacional tem diversas ramificações, sendo cada uma delas objeto de pesquisas variadas. Os principais ramos do aprendizado computacional são representados, basicamente, por dois módulos: aprendizagem – PAC (Probably Approximately Correct), denominado Provavelmente Aproximadamente Correto e Aprendizado de Máquina, sendo, o de máquina, composto por tais ramificações:

a. Máquinas de Vetor de Suporte;
b. Algoritmos Genéticos;
c. Aprendizagem Indutiva;
d. Aprendizagem Bayesiana;
e. Aprendizagem em Redes Neurais;
f. Aprendizagem em Árvore de Decisão e
g. Mineração de Dados.

No artigo original de 1984, Valiant propôs o conceito de sistema de aprendizado PAC. Na aplicação da teoria proposta por este autor, o mais importante é a conexão entre os exemplos de treinamento e os exemplos de teste; a hipótese deve ser aproximadamente correta no conjunto de teste e não

apenas no conjunto de treinamento. O aprendizado de máquina é definido da seguinte forma: [53] “Um programa de computador é dito aprender da experiência E com respeito a alguma classe de tarefas T e para medida de desempenho P, se seu desempenho em tarefas T, medido por P, melhora com experiência E”.

3.4.5 Sistema Especialista

Os Sistemas Especialistas – S.E - baseiam o seu raciocínio em regras bem determinadas, bem como em estratégias e planejamento, sendo previsíveis e explicáveis. A característica fundamental de um S.E é que, para ser de fato útil, depende de uma grande base de conhecimento, atualizada e precisa, extraída de especialistas humanos. Entretanto, um S.E não possui, normalmente, a capacidade de extrapolar fatos ou generalizar conclusões.

Segundo BARRETO [54], “Sistemas Especialistas (SEs) são sistemas computacionais que devem apresentar um comportamento semelhante a um especialista em um determinado domínio”.

RABUSKE [55] define sistemas especialistas como: “sistemas computacionais que resolvem problemas de uma maneira bastante parecida com o especialista humano baseados em conhecimento específico profundo sobre campos restritos do conhecimento” Sistemas Especialistas são caracterizados por:

a. utilizar lógica simbólica, ao invés de cálculos numéricos;
b. incorporar uma base de conhecimento explícita
c. ter capacidade para explicar suas conclusões.

Um Sistema Especialista pode apoiar o gestor e o operador de um sistema industrial e/ou produtivo no processo de tomada de decisões. Também pode ajudá-los a sistematizar o conhecimento, estabelecer regras de operação, planejar e estruturar o processo produtivo. O programa ajuda o tomador de decisões experiente a lembrar-se de diversos tópicos ou opções, que se considera que ele saiba, mas que possa ter esquecido ou ignorado por diversos fatores externos. Este é o uso mais comum em muitos sistemas industriais e financeiros.

Existem muitas vantagens na utilização do S.E, dentre elas [52]:

a. ajuda a reduzir falhas humanas e acelerar a execução de tarefas;
b. apresenta estabilidade e flexibilidade;
c. aumenta o desempenho e a qualidade na resolução de problemas;
d. combina e preserva o conhecimento dos especialistas;
e. contempla hipóteses múltiplas, simultaneamente;
f. integra várias ferramentas;
g. não é afetado por questões psicológicas, estresse e fatores externos;
h. apresenta maior eficiência e otimização de resultados;
i. possui maior rapidez na resolução de problemas;
j. uniformiza as decisões tomadas bem como a preservação do conhecimento institucional;
k. S.E.s são capazes de estender as facilidades de tomada de decisão para muitas pessoas. O conhecimento dos especialistas pode ser distribuído, de forma a ser utilizado por um grande número de indivíduos;
l. S.E.s reduzem o grau de dependência que as organizações mantêm quando se veem em situações críticas, inevitáveis, como, por exemplo, a falta de um especialista. Ao registrar o

> conhecimento de empregados nos S.E.s, promove-se uma significativa redução no grau de dependência entre empresa e presença física de empregados, o que é particularmente importante se o processo envolve algum risco físico ou ambiental.

A consolidação e a manutenção de conhecimento, e mais especificamente, a formação do conhecimento caracterizado pelo denominado “Know-how”, é uma das potenciais aplicações para Sistemas Especialistas.

A tentativa de manter a experiência de uma companhia em um documento “formal” não é uma prática trivial. Relatórios, memorial de cálculo e manuais são, frequentemente, considerados documentos de referência para consultas futuras em projetos, serviços de manutenção e suporte técnico. Tentar extrair os pontos principais e torná-los disponíveis, de forma rápida e objetiva, é, ainda, um desafio para a maioria das organizações. O conhecimento se expressa, também, por meio de normas e procedimentos de trabalho. Todas essas informações são traduções da experiência, da vivência das organizações, e são, originariamente, difusas, mas que, de alguma forma compiladas, tornam-se organizadas e formatadas a partir da mente de um conjunto de técnicos. Desta introdução, pode-se chegar a algumas conclusões. Técnicos dedicam grande parte do seu tempo buscando dados, analisando e descobrindo relações de causa e efeito, antes de seguirem adiante, quer seja tomando uma decisão, quer seja implementando estratégias de ação.

Os S.E.s podem ser aplicados nessa área de potencial interesse para qualquer organização, procurando extrair os focos principais de uma área de conhecimento, na tentativa de preencher lacunas criadas pela perda de especialistas [47].

S.E.s voltados à gestão do conhecimento podem ser implementados de diversas formas, utilizando-se ambientes próprios para a configuração da base de conhecimento. No entanto, sistemas dedicados esbarram em uma limitação estrutural como, por exemplo, o formato da expressão do conhecimento e o

universo de pessoas a serem alcançadas pelo mesmo. Atualmente, o compartilhamento da informação de alta relevância é premissa para aplicações que visam consolidar práticas ou técnicas de qualquer natureza para o fortalecimento de equipes e gestão, sejam elas de engenharia, manutenção, operação, dentre outras. Neste contexto, o conceito de aplicação baseado na “Internet” adquire uma vantagem em relação a outros sistemas desenvolvidos sobre diversas plataformas distintas de software. Seu alcance é ilimitado dentro de qualquer organização, e os próprios usuários do conhecimento podem ser cooptados para integrar a rede de conhecimento por meio dos chamados fóruns da “web”.

Estruturas de S.E.s voltados a contemplar todas as formas de conhecimento devem ser isentas de estruturas rigorosas de apresentação da informação. As premissas desses sistemas são a síntese da informação, utilizando, para isso, todos os recursos para garantir esta objetividade. Diferentemente das soluções apresentadas por um típico sistema especialista, o processo de depuração de um problema não se limita a soluções estanques. Chamadas às normas internacionais, sítio de fornecedores e a um número cada vez maior de recursos transformam o S.E de gestão do conhecimento em uma aplicação integrada a diversas aplicações na “web”. Os benefícios advindos do desenvolvimento de S.E.s, baseados em ambiente “web”, são enormes. Podem-se destacar [47]:

a. consolidação da experiência da organização;
b. estabelecimento de um mecanismo melhor e mais rápido para investigação de assuntos;
c. integração de comunidades de especialistas, criando sinergias e padrões de comunicação;
d. treinamento;
e. consolidação dos investimentos em Intranet e Internet.

Conforme apresentado na figura 15 e exposto neste capítulo, a ciência e a tecnologia de inteligência artificial abrangem diversas áreas. Entretanto, devido à habilidade dos S.E.s em lidar com o conhecimento, pode-se afirmar que os mesmos são um proeminente campo de estudos e de pesquisas para o desenvolvimento de sistemas de gestão dos recursos hídricos inteligentes.

Existem várias contingências não contempladas pelo sistema automático, em que a atuação dos operadores e gestores de saneamento é necessária. Essa atuação dá-se por meio de procedimentos operacionais que foram estabelecidos com o passar dos anos de funcionamento da planta e também de conhecimentos acumulados pelos operadores, sobretudo os mais velhos.

Para tornar o sistema de saneamento menos dependente dos operadores, alguns dos quais chegando próximo à aposentadoria, seria conveniente uma ferramenta que acumulasse o seu conhecimento e pudesse, de maneira fácil, transmiti-lo para outros operadores, até mesmo, treinando-os para melhor agir em uma dada contingência.

Neste contexto, este trabalho de pesquisa concentra-se no desenvolvimento e emprego de Sistemas Especialistas com vistas a atender a esta finalidade.

3.5 Fundamentos e Aplicação de Sistema Especialista

Sistemas Especialistas (S.E.s) [21],[54] são programas de computador que procuram atingir soluções de determinados problemas do mesmo modo que especialistas humanos, se estiverem sob as mesmas condições. Ou ainda:

> Sistemas Especialistas são sistemas desenvolvidos para conter em si o conhecimento de um ou mais especialista, ou seja, são sistemas projetados para solucionar problemas e realizar tarefas simulando a tomada de decisão de especialistas em diferentes áreas.

Esses sistemas baseados em conhecimentos construídos, principalmente, com regras que produzem o conhecimento de um ou mais perito, são utilizados para solucionar determinados problemas em domínios específicos.

Os S.E.s partem do paradigma simbolista da I.A, que consiste na manipulação simbólica de um grande número de fatos especializados sobre um domínio restrito. O outro paradigma principal da I.A é o conexionista [48], utilizado nas redes neurais.

Os S.E.s são baseados em buscas heurísticas: conjunto de regras e métodos que conduzem à invenção e à resolução de problemas. Um processo heurístico, normalmente, conduz a soluções de maneira rápida; porém, pode não conduzir a solução alguma; por outro lado, um processo de algoritmos está baseado em uma série de cálculos matemáticos que sempre conduzem a uma resposta. Ele é projetado para processar volumes de dados de maneira repetitiva e terminar emitindo um resultado final unívoco.

A figura 16 ilustra um sistema convencional de software.

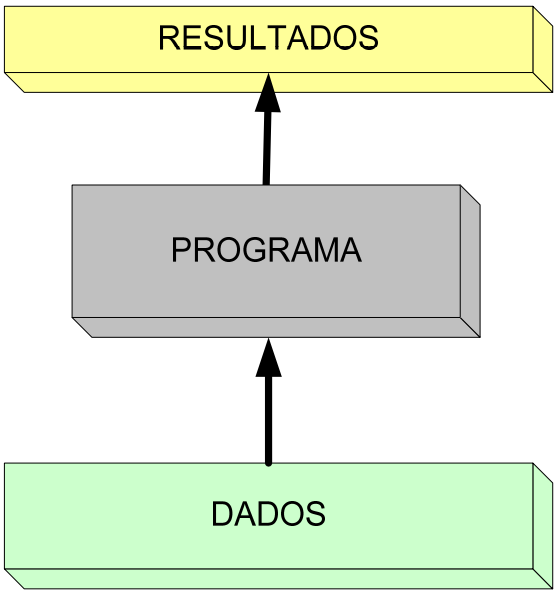


Figura 16 - Estrutura de um Sistema Clássico de Software

No Sistema Especialista existe um motor ou máquina de inferência que utiliza os dados disponíveis e os conhecimentos armazenados na base do S.S para gerar inferências de forma interativa, até chegar à solução do problema. Nestes sistemas, os conhecimentos necessários à solução de um determinado problema são obtidos e organizados em uma base de conhecimento, por meio de regras ou procedimentos. A obtenção desses conhecimentos ou competências e a organização explícita dos mesmos por meio de regras são a parte mais difícil e consumidora de tempo no desenvolvimento de um S.E [21],[54].

A máquina de inferência é a parte dinâmica do S.E. Este módulo contém um conjunto de algoritmos de busca para explorar a base de conhecimentos e gerar as conclusões e resultados desejados. Esta máquina de inferência é, portanto, um conjunto de inferência ou de raciocínio. Uma parte também muito importante de um S.E é a sua interface com o usuário e com outros sistemas computacionais, onde são solicitadas novas informações e obtidos novos dados.

A Figura 17 ilustra o funcionamento simplificado de um Sistema Especialista genérico.

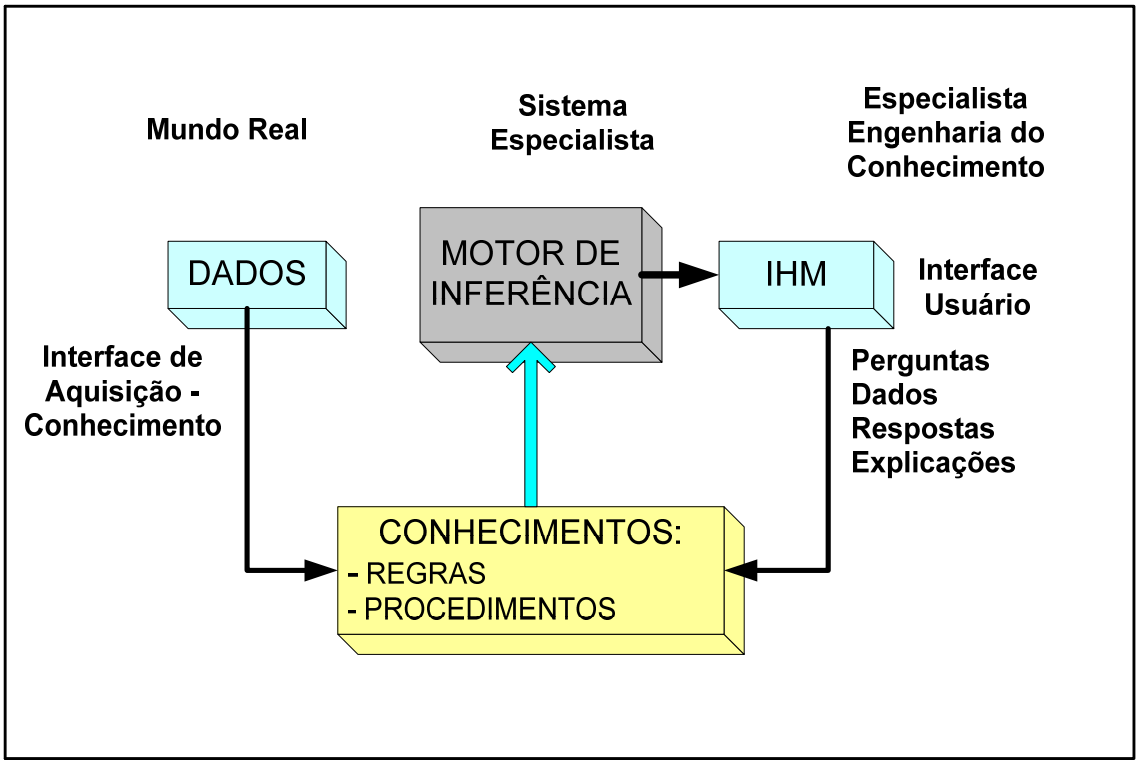


Figura 17 - Arquitetura de um Sistema Especialista Genérico – Fonte: Neves (2004)

a) Base do Conhecimento (BC): a BC contém o conhecimento especializado a ser utilizado nas decisões, e pode ser obtida por meio de entrevistas, questionários, bases de dados e literatura. A BC será composta conforme a técnica adotada de representação do conhecimento.

b) Motor de Inferência: o motor de inferência trabalha de acordo com o conteúdo da BC e da técnica de representação do conhecimento, gerando inferências.

c) Interface de Aquisição (Dados): parte do sistema que modifica e acrescenta novos conhecimentos à base, interagindo com os especialistas e engenheiros do conhecimento.

d) Interface do Usuário: Interface do Usuário: é onde toda a comunicação entre usuário e SE é realizada, num sistema de consulta e respostas.

Os S.E.s tentam, portanto, incorporar nos programas algumas das características associadas ao pensamento e à inteligência humana, tais como raciocínio, memória, capacidade de decisão e planejamento. Eles têm sido aplicados com sucesso para organizar, otimizar e disponibilizar uma grande quantidade de conhecimentos de certas áreas especificas.

Os benefícios advindos da utilização da técnica dos S.E.s são diferentes daqueles obtidos pelos sistemas tradicionais, por se tratar de sistemas elaborados sob um ponto de vista diferenciado. Um sistema convencional é baseado em um algoritmo, emite um resultado final e processa um volume de dados de maneira repetitiva. Já o S.E é baseado em uma busca heurística e, muitas vezes, trabalha com problemas para os quais não existe uma solução convencional, organizada de forma algorítmica disponível, ou, se existe, ela é muito demorada [21],[52],[56].

3.5.1 Principais Aplicações Práticas e Divisões dos Problemas Resolvidos pelos S.E.s

Segundo estudos e levantamentos [21] [56], as aplicações dos S.E.s encontram-se presentes em diversos campos de atividades humanas. Este levantamento indica uma forte tendência ao crescimento do uso dos S.E.s na área industrial e de negócios. Observa-se um enorme potencial de crescimento nesses setores, já que 70% dos custos de desenvolvimento de manufaturas e 90% dos custos das empresas prestadoras de serviços são atribuídos à tomada de decisões humanas, exatamente o aspecto em que os S.E.s podem auxiliar ou, em alguns casos, substituir.

A figura 18 ilustra as principais áreas de aplicação dos S.E.s com os números de suas implantações.

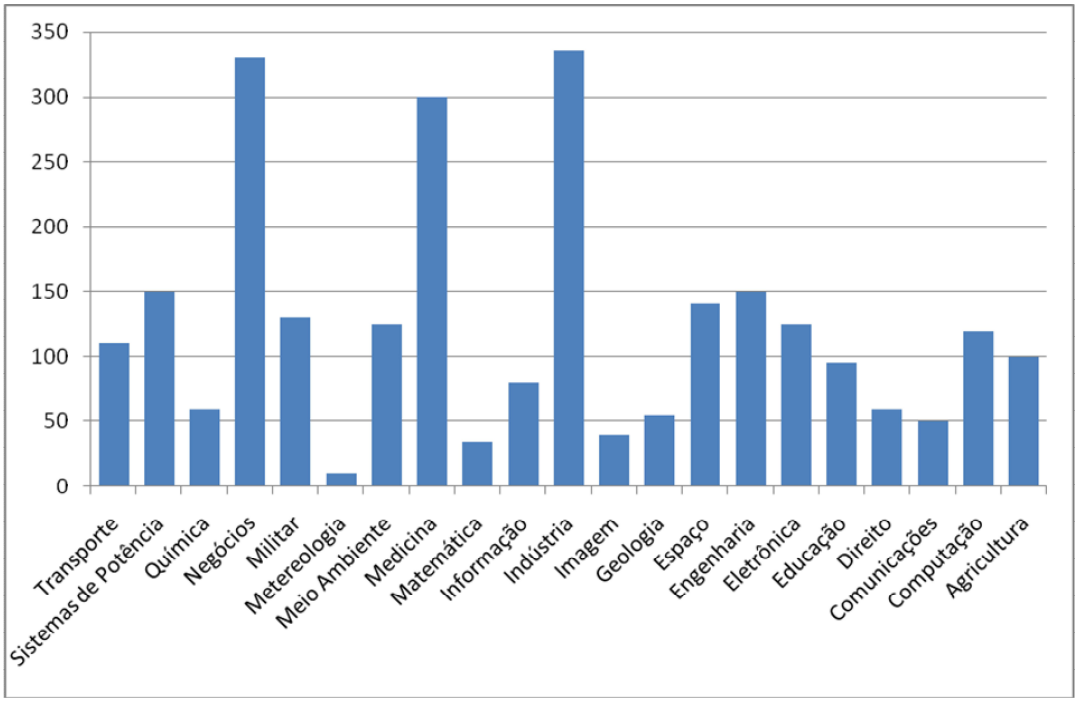


Figura 18 - Principais Áreas de Aplicação dos S.E.s – Fonte: Durkin (1994)

Ainda sobre o domínio do uso dos S.E.s na área de negócios, deve-se ter em mente que, do ponto de vista empresarial, os S.E.s inserem-se no contexto organizacional como ferramentas que aumentam a base de conhecimento da organização, ampliando sua capacidade de análise e a possibilidade de ver, distintamente, estratégias de sucesso. Outro motivo importante é a possibilidade de racionalizar a capacidade cognitiva da organização pela sistematização do conhecimento, dos dados e de incrementar o potencial da empresa para a geração de tais estratégias. Por capacidade cognitiva entende-se a capacidade para registrar, armazenar, usar e dotar de sentido os dados aquisitados [21]. Os S.E.s focam o processo de trabalho na geração das estratégias e sua implementação, diminuindo o risco da paralisação por análise, além da liberação das pessoas das tarefas mais rotineiras de inferência. Existem diferentes maneiras [21],[54],[56] de se classificarem os tipos de problemas em que os S.E.s são aplicados, como na figura 18, em que eles são

qualificados por campos de atividades humanas. Uma classificação mais abrangente é a elaborada a partir de diferentes tipos de problemas, e que aparece resumida na tabela 3.1

Tabela 3.1 - Principais Tipos de Problemas Resolvidos Pelos S.E.s [56]

Ponto de Vista para Solução do Problema	DESCRIÇÃO
Seleção	Identifica a melhor escolha de uma lista de possibilidades
Prescrição	Recomenda uma solução para uma falha de um sistema
Controle	Dirige o comportamento de um sistema para seguir especificações
Diagnóstico	Infere uma falha de um sistema por meio de observações
Predição	Infere consequências de dadas situações
Interpretação	Infere descrições de situações a partir de dados
Monitoramento	Compara observações com expectativas
Planejamento	Planeja uma série de ações de dado sistema
Simulação	Modela a interação entre os componentes de um sistema
Projeto	Configura objetos sob especificações
Treinamento	Transmite conhecimento e avalia aproveitamento estudantil

Ainda em relação ao levantamento realizado [56], as aplicações dos S.E.s, divididas por principais tipos de problemas, é resumida na figura 19, na qual estão presentes, quantitativamente, os principais problemas em que os S.E.s são utilizados. Esse levantamento indica uma forte tendência ao uso dos S.E.s para diagnóstico e interpretação.

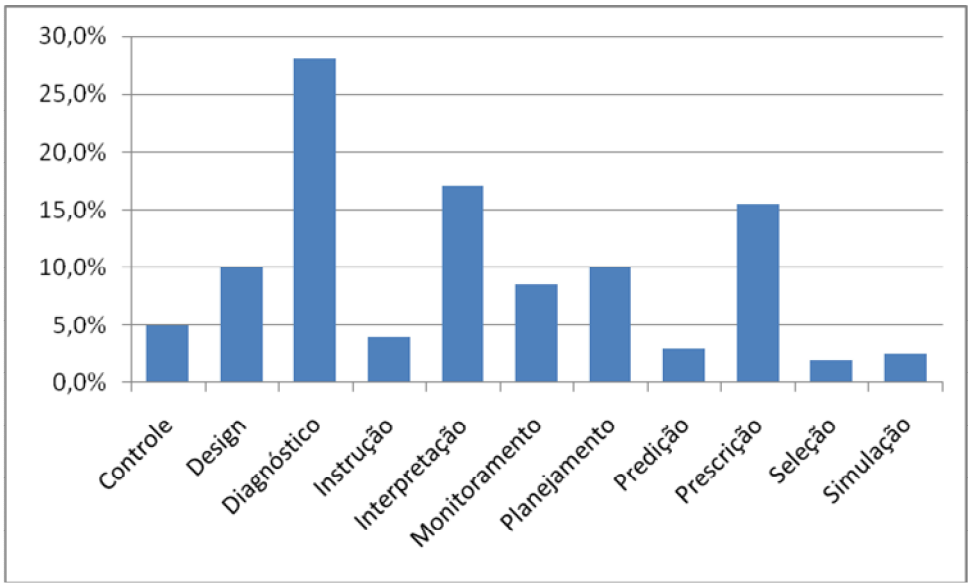


Figura 19 - Principais Campos de Aplicação dos S.E.s – Fonte: Durkin (1994)

Devido à importância e expressividade dos campos de Prescrição, Interpretação e Diagnóstico apresentados na figura 19, eles serão melhor detalhados nas explicações que se seguem.

Os Sistemas de prescrição recomendam ou executam soluções para funcionamentos incorretos de um dado sistema. Esses tipos de sistema, geralmente, incorporam um subsistema de diagnóstico para determinar a natureza do funcionamento incorreto.

Os Sistemas de interpretação são sistemas que inferem descrições de situações a partir da observação de fatos, fazendo uma análise de dados e

procurando determinar as relações e seus significados. Eles devem considerar as possíveis interpretações, descartando as que se mostrarem inconsistentes. Eles produzem um entendimento de uma situação a partir de informações avaliáveis. Essas informações consistem de dados, cujas fontes são sensores, instrumentos, resultados de testes etc.

Os Sistemas de diagnóstico são capazes de inferir falhas ou maus funcionamentos de sistemas a partir de informações de entrada. Eles possuem o conhecimento das possíveis causas das falhas e utilizam observações do sistema do qual tratam para realizar um diagnóstico. Alguns desses S.E.s trabalham em tempo real, ou seja, monitoram, continuamente, um sistema para diagnosticar seu funcionamento.

3.5.2 Metodologias Construtivas dos S.E.s

Existem diferentes metodologias [21],[56],[57] para se formalizarem as fases de desenvolvimento dos S.E.s. A fim de buscar o alcance do objetivo deste trabalho de pesquisa, é utilizada a metodologia apresentada na figura 20.

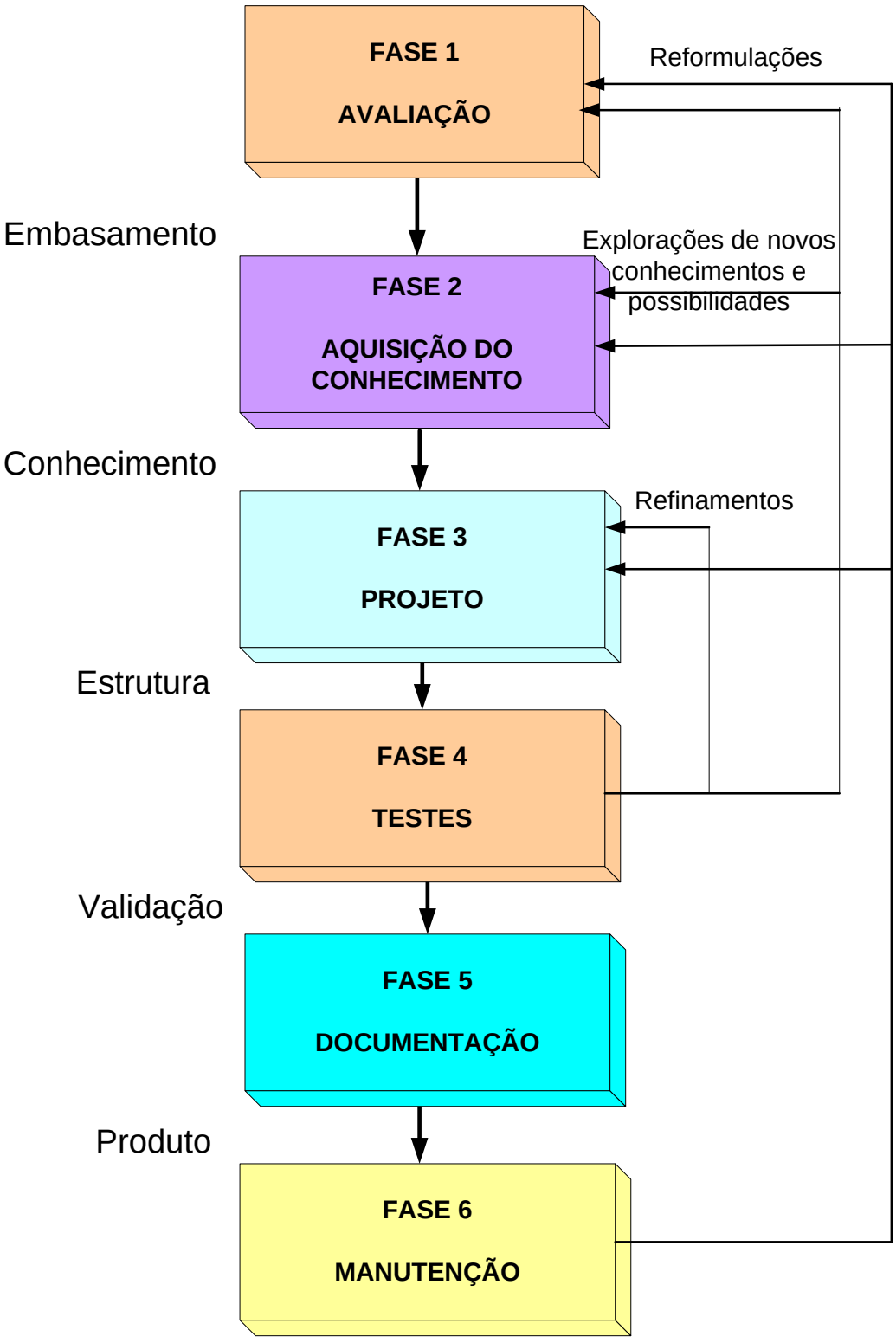


Figura 20 - Fases de Desenvolvimento de um S.E.s – Fonte: [21],[56]

a. Avaliação: durante esta fase, estudos são conduzidos para se determinarem a viabilidade e a justificativa do problema em questão. Seguindo esse estudo, o problema é examinado para a definição das metas do projeto. Esta fase é de suma importância para o escopo do projeto. Ela estabelece a necessidade de fontes de conhecimento para o projeto, incluindo especialistas e outras fontes, como manuais técnicos, por exemplo;

b. Aquisição do conhecimento: o objetivo é adquirir conhecimento a respeito do problema, que será utilizado como guia para o esforço de desenvolvimento. Este processo é considerado o mais decisivo para o sucesso ou não de um S.E;

c. Projeto: são definidas a estrutura e organização do S.E., assim como os métodos de processamento do conhecimento. Uma ferramenta computacional é escolhida para representar e tratar o conhecimento. Durante essa fase, muitas vezes, é construído um protótipo para se obter melhor entendimento do sistema, de forma mais ampla. Frequentemente, esse protótipo evidencia os pontos que exigem maior atenção do projetista;

d. Teste: esta fase, na verdade, não é uma tarefa à parte, adicional, mas integra um processo contínuo. O objetivo é validar a estrutura do sistema e o conhecimento nele contido;

e. Documentação: é feita a compilação de toda a informação útil do projeto, para os projetistas e usuários do S.E. Ela deve possuir instruções de como operar o sistema e a metodologia da engenharia de conhecimento utilizada durante o desenvolvimento do S.E. Entretanto, esta fase deveria ser colocada em prática em todas as demais do processo global, o que,

sem dúvida, muito auxiliaria qualquer processo de inspeção, reformulação, diagnóstico ou redefinição das metas originais;

f. Manutenção: após o S.E. ser desenvolvido e implementado, ele precisa passar por manutenções periódicas, pois, muitas vezes, o conhecimento do sistema tem de ser refinado ou reformado.

3.5.3 Técnicas de Aquisição de Conhecimento e Construção de Bases de Conhecimento

O objetivo da aquisição de conhecimento é adquirir a maior quantidade de informação a respeito do problema a ser resolvido pelo S.E. Um S.E. pode se basear em um ou vários métodos de aquisição de conhecimento, dependendo da complexidade do problema e da profundidade de resposta necessária. Todos esses métodos partem das mesmas fontes principais de conhecimento, que são [21] [56]:

a. Especialista: a fonte primária do conhecimento da maioria dos S.E.s. muitas vezes e, dependendo da complexidade do sistema, pode se constituir do cabedal de vários especialistas para o caso de o problema ter de ser subdividido em partes;

b. Usuário final: uma valiosa fonte de informações. Os especialistas tendem a ver os problemas centrados nos detalhes, enquanto o usuário final os vê segundo um prisma mais geral. Ele é de fundamental importância na fase de avaliação e também na manutenção dos S.E.s.

c. Literatura: podem ser livros, normas técnicas, notas de engenharia, entre outros.

Geralmente, a maior fonte são os especialistas no problema, que adquiriram esse conhecimento por meio da experiência. O processo de aquisição de conhecimento, a partir dele, é chamado de elicitação de conhecimento. Existem muitos métodos para descrever o conhecimento, os quais espelham os diferentes modos de abordagem. Como exemplos dos principais métodos, podem-se citar:

a. Redes Semânticas: descrevem relacionamento entre objetos;
b. Regras de Produção: descrevem o conhecimento em termos de regras que reagem aos eventos detectados;
c. Frames: são úteis para o tipo de problema que requer conjunto de informações a serem coletadas;
d. Taxonomias (teoria das classificações): podem descrever conjuntos de informação, como nos Frames, e podem descrever como a informação é inter-relacionada, como nas Redes Semânticas.

As técnicas de representação de conhecimento mais comumente usadas são: técnica baseada em frames, técnica baseada em regras e técnica de indução. Existe, atualmente, [21],[56] uma quantidade expressiva de S.E.s implementados. Nesses S.E.s pode-se observar que as áreas de diagnóstico, interpretação, controle e predicação têm seu conhecimento mais frequentemente representado por regras, que é a técnica consagrada por meio da experiência. Assim sendo, esta técnica é mais detalhada neste estudo.

3.5.4 Estruturação do Conhecimento em Regras

Um dos parâmetros para verificação da boa estruturação do conhecimento é a facilidade de se realizarem mudanças. O domínio do conhecimento é capturado em um conjunto de regras e introduzido na base de conhecimento do

sistema, que, então, usa-as juntamente com as informações contidas na memória de trabalho para resolver o problema. O processo de regras em um S.E. baseado em regras é administrado por um módulo conhecido como máquina de inferência.

Regras são [45] “Aquilo que regula, dirige, rege ou governa. Aquilo que está determinado pela razão, pela lei ou pelo costume; preceito, princípio, lei, norma” / *Matemática:* operação sobre números dados. / *Lógica:* elementos de metalógica que determinam as expressões admitidas em um discurso lógico (regras de formação) e as inferências legítimas (regras de demonstração). (As leis do discurso lógico podem ser transformadas em regras metalógicas; assim, a uma lei lógica, que é uma implicação, pode corresponder uma regra de demonstração.).

Uma regra é uma forma de conhecimento procedural. Sua estrutura alia um ou mais antecedentes (premissas) contidos na parte **SE**, para um ou mais consequentes (conclusões), contidos na parte **ENTÃO**. Os principais tipos de regras são: regras de relacionamentos, diretivas, de estratégia e heurísticas. É possível ser elaborada uma regra simples para cada objeto de um dado sistema, mas isso é ineficiente e de difícil manutenção. Para minimizar esses problemas existem as regras variáveis, úteis em algumas aplicações, quando é necessário desempenhar a mesma operação num grupo de objetos similares. Essas regras são largamente utilizadas em linguagens computacionais ou shells (programas para elaboração de S.E.s) disponíveis. A maioria dos shells utiliza o caso particular de regras variáveis, as chamadas regras “pattern-matching”. As regras “pattern-matching” são, também, muito empregadas em S.E.s baseados em frames, devido a sua flexibilidade.

Na tabela 3.2 ilustra uma regra simples e também um exemplo com a utilização das regras pattern-matching [21].

Tabela 3.2 - Exemplo de Regra Simples e Pattern – Matching

REGRA SIMPLES	REGRA PATTERN-MATCHING
SE; João Pedro é um empregado **E;** A idade de João Pedro é superior a 67 **Então;** João Pedro pode aposentar-se	**SE**; X é empregado **E**; X idade > 67 **ENTÃO**; X pode aposentar-se X= Pedro Pedro Idade = 68 Pedro pode aposentar-se.

Outra forma de regras empregadas em S.E.s são as regras incertas. Elas descrevem a situação real em que um especialista produz uma regra que estabelece uma associação inexata entre a premissa e a conclusão. Por exemplo:

SE; a pessoa é baixa
ENTÃO; quase certamente, a pessoa é leve

Para tornar essas regras mais práticas computacionalmente, é utilizado um valor (entre 0 e1) associado à certeza de convicção de uma declaração. Por exemplo: uma pessoa baixa tem 80% de certeza de ser, também, leve. As regras incertas aproximam o desenvolvimento dos S.E.s da chamada lógica nebulosa (vide item 3.4.1). Exemplificando:

Se a pessoa é baixa
ENTÃO a pessoa é leve
FC=08

As regras são uma forma muito usual de representação do conhecimento, tendo diversas vantagens. Contudo, apresentam também limitações, que estão resumidas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Vantagens e Limitações das Regras [21].

VANTAGENS	LIMITAÇÕES
Elas são comunicáveis, pois são uma forma natural de conhecimento. Cada regra, em geral, é independente das outras	Os engenheiros de conhecimento tendem a resumir todo o conhecimento em regras, deixando de buscar representações que possam ser mais apropriadas
Inferências e explanações são facilmente derivadas	Sistemas com muitas regras têm limitações ao se fazerem buscas
Modificações e manutenções são relativamente fáceis. Incertezas são facilmente combinadas	Para conhecimento complexo, são necessárias muitas regras. Isso pode causar problemas de desempenho e manutenção

3.5.5 Técnicas de Elaboração de Máquina de Inferência

Ao final da fase de elaboração da base de conhecimento, é de suma importância e necessidade resolver o problema da elaboração da máquina de inferência. Durante os contatos com o especialista é importante verificar como o conhecimento do sistema pode ser mais bem controlado. A decisão deverá estar focada na observação da técnica de inferência que melhor se adaptar ao

problema em questão e a forma com que o especialista o resolve. Existem duas técnicas de inferência consagradas [21],[56]:

a. O encadeamento para frente, que é mais apropriado se o especialista primeiramente coleta informações sobre o problema e verifica o que pode ser concluído;
b. O encadeamento para trás, quando o especialista primeiramente considera algumas conclusões ou objetivos e tenta alcançar as informações que os apóiam.

Existe [21],[56],[57] uma grande quantidade expressiva de S.E.s implementados empregando as duas técnicas de inferência, embora tanto o encadeamento para frente como o para trás tenham suas vantagens e desvantagens, dependendo do problema a que se proponham resolver (o que explica sua maior ou menor utilização em S.E.s já implementados). Assim sendo, suas vantagens e desvantagens são resumidas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Vantagens e Desvantagens do Encadeamento para Frente e para Trás fonte: [21]. [56]

	VANTAGENS	DESVANTAGENS
ENCADEAMENTO PARA FRENTE	• Ele é eficiente quando o problema tratado naturalmente começa pelo acúmulo de informações que serão analisadas para inferir fatos sobre elas; • Ele provê uma considerável quantidade de informações de relativamente poucos dados.	• O sistema não tem como reconhecer qual evidência é mais importante que as outras. O sistema fará todas as possíveis perguntas sobre um problema, mesmo que somente umas poucas já fossem suficientes; • O sistema fará perguntas desconexas para os usuários, o que pode confundi-los, não os encorajando a responder questões, segundo eles, fora de contexto.
ENCADEAMENTO PARA TRÁS	• Ele é eficiente quando o problema tratado naturalmente começa por formar uma hipótese que deve ser provada; • O sistema trabalha focado em dada meta. Isso produz uma série de questões dos tópicos relatados, que são confortáveis para o usuário; • Enquanto o encadeamento para frente infere todo o possível de uma dada informação, o encadeamento para trás procura somente a parte da base de conhecimento que é relevante para a solução do problema tratado.	• A principal desvantagem é que o sistema continuará a seguir uma dada linha de argumentação, mesmo se devesse mudar para outra.

3.5.6 Ferramenta Computacional para Elaboração de S.E.s

Após o desenvolvimento das etapas de construção da base de conhecimento envolvido na elaboração da máquina de inferência, o projetista de S.E.s tem que determinar a ferramenta computacional mais adequada para implementação do S.E.

Existem, basicamente, [21] duas abordagens computacionais para elaboração de S.E.s utilizando linguagens de computação: a de uso geral ou softwares específicos para essa elaboração, como, por exemplo, os SHEllS.

Todas as linguagens fornecem uma grande flexibilidade para o desenvolvimento de S.E.s, de acordo com as mais diversas especificações. Entretanto, elas também exigem que o projetista seja um programador na linguagem escolhida. Para diminuírem as dificuldades inerentes a essa necessidade, foram criadas as shells, cuja principal finalidade é simplificar a elaboração de S.E.s, reduzindo o esforço de desenvolvimento e acelerando a capacidade de realizarem-se protótipos do sistema. Os principais fatores para a tomada de decisão sobre qual software escolher são: custo, licença, treinamento / suporte e facilidade de desenvolvimento. Neste contexto, são descritas algumas vantagens e desvantagens no emprego de linguagens de uso geral e dos shells:

Linguagem software de Uso Geral - Vantagens

É utilizada quando a opção é desenvolver o sistema especialista a partir de uma linguagem como C++, PASCAL, SMALL TALK, dentre outras. Neste caso, a comunicação do sistema para obter os dados necessários de outros sistemas computacionais, assim como a interface com usuário e também o motor de inferência devem ser totalmente desenvolvidos. A vantagem desta abordagem é a liberdade de se desenvolver e implementar as diversas partes do sistema, como a interface com o usuário e o motor de inferência. Em geral,

neste caso, também se obtém uma velocidade final de execução maior, em função da otimização do uso da máquina e do fato de se usar o mínimo de funções necessárias ao problema em que o S.E se propõe a resolver.

Linguagem software de Uso Geral – Desvantagens

A desvantagem é a dificuldade futura de manutenção, que dependeria da qualidade do programador, assim como da documentação a ser gerada, sobretudo do tempo de desenvolvimento da programação do S.E.

Linguagem software específico – Vantagens

É utilizada quando a opção é o uso de uma linguagem de programação que já possui certos recursos para o desenvolvimento de S.E.s, como os Shells. Neste caso, do emprego de software especifico para o desenvolvimento de S.E.s, não é necessário desenvolver o motor de inferência. A vantagem desta abordagem é a velocidade com que se pode gerar uma aplicação, assim como permitir uma maior facilidade de padronização e manutenção, e, sobretudo pelo fato de acelerar a capacidade de realizarem-se protótipos do sistema.

Linguagem software específico – Desvantagens

A desvantagem está na necessidade de se ajustar a forma como os conhecimentos devem ser fornecidos ao programa e nas limitações da Interface Homem Máquina – IHM, que, portanto, podem não ser capazes de gerar as interfaces ótimas para configuração e operação do problema em questão.

Outra desvantagem está no fato de que esses programas podem ter um tempo de execução maior, já que o motor de inferência foi projetado para aplicações genéricas.

Mais recentemente, a crescente utilização da Internet e Intranet levaram ao desenvolvimento de S.E baseadas em “web”. O mecanismo de inferência na web pode ser implementado por meio do processo facilitado de busca, através dos “hyperlinks” e da associação deste com o conhecimento expresso nas mais diversas formas, que extrapolam a rígida estrutura de explicitação por meio de regras e procedimentos [47].

3.6 Estado da Arte do Emprego de Sistemas Inteligentes no Saneamento

A partir da pesquisa bibliográfica inicial, que se estendeu ao longo deste estudo, foi possível destacar alguns trabalhos na área de saneamento, empregando Sistemas Inteligentes associados à ciência e tecnologia da automação. Esses trabalhos visam à otimização e melhoria da gestão dos recursos hídricos. Seguem-se algumas citações:

Trojan F. [29] apresentou uma proposta de um desenvolvimento de Sistema de Monitoramento Especializado – SME, objetivando gerenciar e reduzir perdas de produto em sistemas públicos de abastecimento de água. Este sistema foi apresentado como complemento da Tecnologia de Automação e visa manter a sustentabilidade da produção, por técnicas de Tecnologia da Informação e inteligência computacional. Apoiado nos índices de desperdício de produto, demonstrou a importância da implantação do Sistema de Monitoramento Especializado para analisar e prescrever ações de intervenções e embasar as decisões de manutenção.

Rocha, A. M.P, [58] propôs o desenvolvimento de um sensor virtual para monitoramento de oxigênio dissolvido no tanque de aeração de uma Estação de Tratamento de Esgoto, por lodos ativados. Este trabalho foi desenvolvido

empregando sistemas inteligentes, técnica de modelagem Neuro- Fuzzy (vide 3.4.1).

Fonseca; Fabrício Ramos [30] apresentou um modelo de sistema de automação aplicado à setorização de redes de abastecimento hídrico. Visando subsidiar o desenvolvimento de técnicas para problemas enfrentados na setorização de redes de abastecimento hídricos. Por meio deste estudo são apresentadas, como contribuição original, soluções orientadas à utilização de recursos do protocolo digital “Foundation Fieldbus”, visando agregar ainda mais autonomia e disponibilidade às instalações do sistema de abastecimento hídrico, incorporando a este sistema características diferenciais como interoperabilidade, flexibilidade e redundância dos elementos críticos que o compõem.

V.M. Chowdary, Vinu Chandran. A. Jeyaram [59] – “Integrated Water Resource Development of Mayurakshi Watershed, India using Remote Sensing an GIS”. Este autor propôs um sistema de gerenciamento integrado das bacias hidrográficas, empregando o sensoriamento remoto e sistema de informação Georreferenciado. Este sistema tem como objetivo, demarcar e mapear as áreas essências do sistema de abastecimento para permitir a identificação de determinadas atividades e tipo de região, por exemplo; agrícola, rural, arenosa, floresta, rochoso, dentre outras. Esta distribuição espacial e identificação possibilitam efetuar uma gestão integrada e eficiente do lençol de água de determinado setor, bem como a exploração dos recursos hídricos em diferentes áreas.

Souza, Marcelo [25] apresentou uma proposta de um “Sistema de Gestão Empregando Instrumentação Inteligente e Redes de Campo na Automação do Processo de Tratamento de Água”. Este trabalho teve, como objetivo, propor uma nova sistemática de gestão no sistema de tratamento de água com base

nos atuais desenvolvimentos tecnológicos da instrumentação inteligente e das redes de campo, denominada de “AETAII – Automação da Estação de Tratamento de Água com Instrumentação Inteligente”.

4 METODOLOGIA DA ARQUITETURA DE HARDWARE E ARQUITETURA DE SOFTWARE DO SIGASI

4.1 Introdução

A proposta da metodologia de desenvolvimento da arquitetura de hardware e da arquitetura de software, bem como a metodologia operativa do SIGASI - (Sistema Integrado da Gestão Automatizada de Saneamento Inteligente) são apresentadas no presente capítulo. O SIGASI é uma nova proposta de metodologia automatizada, que propõe integração entre Sistemas Supervisórios e Sistemas Especialistas, buscando avanços na gestão do ciclo de saneamento. Sua macroarquitetura é detalhadamente apresentada, bem como as etapas de sua implementação por meio de simulações em testes virtuais, com os devidos resultados obtidos.

4.2 Metodologia da Arquitetura de hardware, software e Metodologia Operativa do SIGASI

Sistemas supervisórios (S.S.) e Sistemas Especialistas (S.E.) apresentam capacidades operacionais específicas que podem ser associadas para promover a otimização da gestão dos recursos hídricos. Os Sistemas supervisórios oferecem facilidade de interpretação, flexibilidade, estrutura do processo, geração de receitas, “scripts”, rastreabilidade de informações e facilidade de operação, enquanto os Sistemas Especialistas constituem uma poderosa ferramenta de engenharia para lidar com o conhecimento. Em vista disto, o SIGASI integra, na sua arquitetura, S.E. e S.S. com o intuito de aproveitar, ao máximo, as condições oferecidos pelos dois sistemas.

A metodologia de desenvolvimento do SIGASI contou com o estudo de Andrade [21], em que foi elaborada solução de software para funcionamento, em tempo real, de Sistemas Especialistas com Sistemas Supervisórios de automação industrial, intitulada de Sistema de Integração Sistemas Especialistas e Supervisórios (SISES). Este novo software tornou-se um dos módulos constituintes do SIGASI. A figura 21 deste trabalho de pesquisa mostra a macroarquitetura do SIGASI..

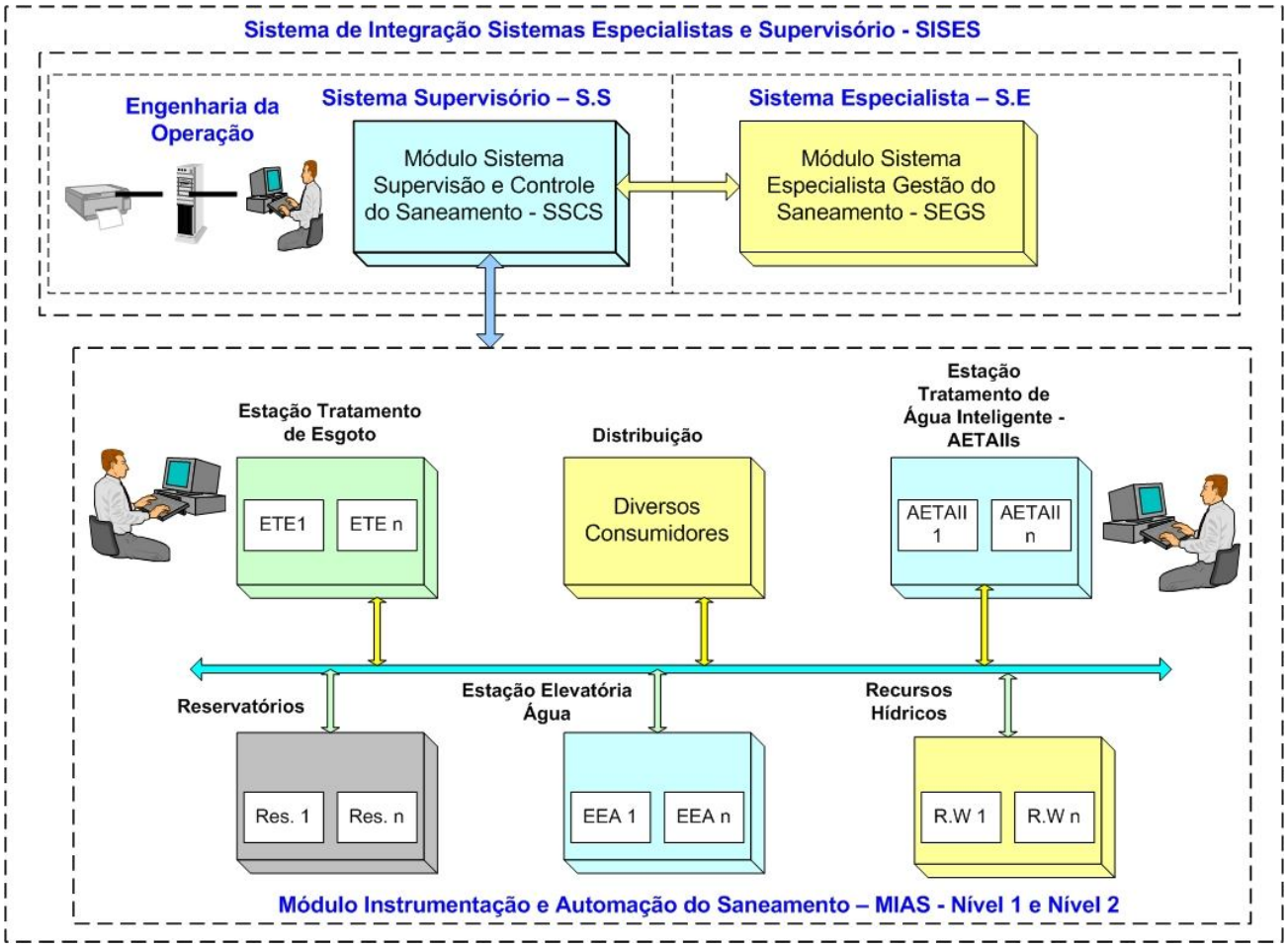


Figura 21 - **Macroarquitetura de Hardware do SIGASI**

Conforme ilustrado na figura 21, o SIGASI é constituído dos seguintes módulos:

a. MIAS – Módulo de Instrumentação e Automação do Saneamento;
b. SSCS – Sistema de Supervisão e Controle do Saneamento;
c. SISES – Sistema de Integração Sistema Especialista e Supervisório;
d. SEGS – Sistema Especialista e Gestão do Saneamento.

4.2.1 Módulo de Instrumentação e Automação do Saneamento – MIAS

O macrobloco do módulo de Instrumentação e Automação do Saneamento – MIAS - compõe, conceitualmente, os níveis 1 e 2 do modelo da pirâmide de automação (vide item 1.5), que consiste da Instrumentação e Controladores.

O nível 1 é composto pela instrumentação e pelos atuadores. A instrumentação é responsável por coletar as informações do processo produtivo enviadas por equipamentos sensores que monitoram todo o ciclo do saneamento, desde a captação em rios ou reservatórios até a distribuição para áreas residenciais, comerciais, industriais ou públicas. Cada um desses equipamentos fornece um tipo específico de informação para compor o sistema. Exemplificando: ao ligar a bomba de recalque de água no processo de captação, o sensor indicará a corrente elétrica na qual estará trabalhando. Na fase subsequente do processo, outro sensor indica a vazão de água captada do manancial, a qual é transferida pela tubulação para a estação de tratamento de água – ETA, e assim por diante. Os atuadores são responsáveis por agir diretamente no processo produtivo e são representados por inversores de frequência e elementos atuadores. Podem atuar na velocidade de motores e dosagem de produtos químicos, por meio das bombas dosadoras.

O nível 2 é composto, basicamente, por elementos Controladores, dispositivos capazes de desencadear ações segundo uma programação predefinida. Esse controle automático é responsável pela manutenção das

condições operacionais do processo dentro de parâmetros já determinados, sem a necessidade de intervenção humana. Ele lê as condições do processo por meio de instrumentos e atua nos sistemas de controle de posição de válvulas, velocidade de motores, dosagem de produtos químicos, níveis dos reservatórios, vazões e pressões do sistema. Todas as informações do nível1, ou seja, do processo produtivo, são concentradas nos Controladores Lógicos Programáveis - CLP, nível 2, que, por sua vez, disponibilizam, por meio da base de dados internos do CLP toda a informação do processo, através de rede de dados e sistema de comunicação, para o nível 3, onde encontra-se o Módulo do Sistema de Supervisão e Controle de Saneamento – SSCS.

4.2.2 Sistema de Supervisão e Controle de Saneamento – SSCS

O Sistema de Supervisão e Controle de Saneamento – SSCS - emprega a supervisão eletrônica, utiliza tecnologias de comunicação de dados e sistemas computacionais para concentrar todas as informações de um sistema, instalação ou conjunto de instalações em um único posto de operação. Por meio da supervisão eletrônica, um ou mais operadores operam grande quantidade de equipamentos distribuídos ao longo de uma extensa área. Este módulo opera o Sistema Supervisório, que recebe informações de dispositivos controladores como Controladores Lógicos Programáveis (CLP), inversores de frequência, válvulas de controle, etc. Os Sistemas Supervisórios possuem uma ferramenta para armazenamento das variáveis de maior relevância, relativas ao sistema produtivo (vide item 1.5).

Os S.S.s tornam acessíveis os dados históricos do sistema automatizado por meio de bancos de dados disponibilizados em formatos nos quais outros aplicativos possam utilizá-los. O armazenamento é feito em vários formatos, dentre eles: formato texto, Microsoft Excel, Microsoft Access, SQL Server®, Oracle®, Informix®, Sybase®. Os dados armazenados podem ser exibidos em

forma de tabelas ou gráficos que apresentam uma visão instantânea da evolução do processo. Estes sistemas operam como Interface Homem-Máquina (IHM), com os operadores e gestores do saneamento, para que os mesmos possam analisar, diagnosticar, inferir e tomar decisões no processo. Assim, reduz-se a necessidade de destacar operadores para todas as instalações do processo produtivo. A utilização de recursos gráficos e rotinas de alarme possibilita a visualização imediata do estado do processo e de falhas em equipamentos.

Devido à elevada quantidade de pontos de comunicação (troca de dados entre sinais de campo e controladores -, tags, como conhecidos na literatura técnica e comercial), torna-se cada vez mais complexa a tomada de decisão por parte dos gestores e operadores, em função da necessidade de manipular, simultaneamente, uma elevada quantidade de informações do processo produtivo (vide item 1.5); portanto, na arquitetura proposta neste trabalho de pesquisa, este módulo interage, em tempo real, com o Módulo Sistema Especialista de Gestão do Saneamento – SEGS - que tem, como objetivo, aconselhar/auxiliar, de forma automática, o operador e o gestor na tomada de decisão e/ou, se necessário, automatizar as funções por eles executadas.

4.2.3 – Sistema de Integração de Sistemas Especialistas e Supervisórios – SISES

O SISES (Sistema de Integração Sistemas Especialistas e Supervisórios) é uma ferramenta computacional ou um ambiente de desenvolvimento de Sistemas Especialistas que possibilita a comunicação com o Sistema Supervisório em tempo real. O SISES é composto de dois macroblocos: Módulo de Interface com Sistemas Supervisórios e Módulo Construção de Sistemas Especialistas. Esta ferramenta foi testada por meio de simulação e em campo por Andrade [21] [22].

Conforme ilustrado na figura 21, o SISES é empregado, neste trabalho, para integrar o SSCS e SEGS, permitindo, desta forma, a operacionalidade do SIGASI.

4.2.4 Sistema Especialista de Gestão do Saneamento – SEGS

O Sistema Especialista de Gestão do Saneamento – SEGS - é um Sistema Especialista dedicado a operar com S.S. em tempo real e com objetivo de auxiliar e/ou automatizar a tomada de decisão na gestão do ciclo de saneamento.

A figura 22 ilustra a macroarquitetura do SEGS.

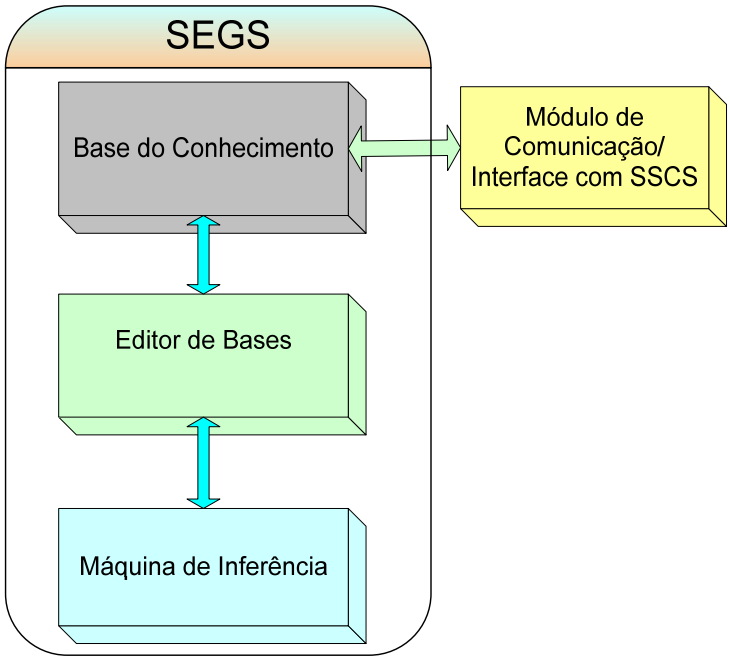


Figura 22 - Arquitetura Básica do Sistema Especialista Gerado no SEGS

a. Base de conhecimentos**:** trata-se da informação (fatos e regras) que um especialista utiliza, representada computacionalmente;

b. Editor de Base**:** é o meio pelo qual a *shell* (vide item 3.5.6) permite a implementação das bases desejadas;
c. Máquina de inferência: é a parte do S.E. responsável pelas deduções sobre a base de conhecimentos;
d. Módulo de Comunicação: é a parte do S.E. que permite a comunicação em tempo real com o Sistema de Supervisão e Controle do Saneamento – SSCS.

O SEGS emprega, em sua arquitetura, o SISES; portanto, para o desenvolvimento da base de conhecimento foi utilizada a mesma metodologia do SISES. O SISES caracteriza-se por ser um ambiente de desenvolvimento para S.E.s que se comunica com S.S.s.

De acordo com Andrade [21], o SISES é baseado em regras de produção, consideradas populares por possuírem as seguintes vantagens:

a. Modularidade: cada regra, por si mesma, pode ser considerada como uma peça de conhecimento independente;
b. Facilidade de edição (uma consequência da modularidade): novas regras podem ser acrescentadas e antigas podem ser modificadas, com relativa independência;
c. Transparência do sistema: garante maior legibilidade da base de conhecimentos.

Portanto, é preciso ter em mente que a modularidade de um sistema baseado nessa arquitetura permite a construção, passo a passo, da base de conhecimentos, ou seja, é possível realizar vários testes com apenas um subconjunto de regras concluído. Obviamente, sabe-se que menos regras implicam, geralmente, um menor número de casos abrangidos.

4.2.4.1 Exemplo de Regra Implementada na Base de Dados do SEGS

No SEGS, o sistema de regras implementado na base de dados obedece à seguinte síntese (regra de produção) [21]:

SE Entradas Analógicas AB > 200
E Entradas Digitais XY_1_BOMBA_A1

ENTÃO SEGS\PROBLEMA = "Abra a válvula principal
e verifique o motor da bomba 1; ele está muito quente!!!"

Neste exemplo, uma determinada entrada de um processo foi denominada entrada analógica AB e outra entrada digital, denominada XY_1BOMBA_A1. Ambas são premissas da regra. E as respectivas variáveis de saída (SEGS\PROBLEMA), denominada de variável objetivo, são consideradas as conclusões (então) da regra de produção.

Denominam-se os consequentes de uma regra, as cabeças, e os antecedentes, caudas, sendo que as conclusões encabeçam as cláusulas. Essa notação é proveniente da linguagem PROLOG (Programming in Logic), estruturada nos anos 70 com o intuito de resolver problemas por meio da utilização de sentenças lógicas. A ideia de utilizar o formalismo da lógica para construir programas foi pesquisada, principalmente, por R. A. Kowalski, que estabeleceu sua base teórica [21].

O SEGS emprega o SISES em sua arquitetura; portanto, para a criação das bases utilizaram- se os dois critérios para definições de assertivas:

1. A estrutura de cada cauda (premissa) deve obedecer ao modelo ilustrado na tabela 4.1

Tabela 4.1 – Modelo da Estrutura da Premissa – Fonte:[21]

<conectivo>	*<atributo>*	*<operador>*	*<valor>*

Conectivo é um dos seguintes elementos utilizados na lógica clássica: NÃO, E, OU. Sua função é unir a sentença ao conjunto de premissas que formam a seção de antecedentes de uma regra.

Atributo é uma variável capaz de assumir uma ou múltiplas instanciações no decorrer da consulta à base de conhecimentos. Cabe ao projetista do conhecimento definir seu tipo. Um atributo é uma entidade totalmente abstrata, capaz de armazenar listas de valores cujo significado depende do contexto da base. Por exemplo, a variável objetivo "SEGS\PROBLEMA" é capaz de ser instanciada a qualquer um ou vários elementos da lista de valores predefinida [String]. Números também podem ser atribuídos a variáveis.

Operador é um elo de ligação entre o atributo e o valor da premissa que define o tipo de comparação a ser realizada. São operadores relacionais: =, >, <=, <>, <,=>entre outros.

Valor é um item de uma lista que foi previamente criada e relacionada a um atributo. O SISES exige que os atributos sejam definidos antes de se criar uma regra que os utilize. No momento da criação de um atributo, também é possível que seja definida uma lista de valores que constituirá o universo ao qual suas instanciações devem, necessariamente, pertencer. As listas criadas podem ser utilizadas para construção de menus, caso o sistema especialista necessite efetuar uma pergunta ao usuário referente àquele determinado atributo ou, frequentemente, retirar os valores diretamente do S.S. por meio do módulo de comunicação. Um valor também pode ser um número, caso o atributo o permita.

2. A estrutura de cada cabeça (conclusão) deve obedecer ao modelo ilustrado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Modelo da Estrutura da Conclusão – Fonte: [21]

<atributo>	=	*<valor>*

Atributo equivale ao mesmo atributo usado em caudas.

"=" é um operador de atribuição e, não, de igualdade. Ou seja, o atributo, nas cabeças de regra, é sempre instanciado a um valor. Dependendo se a variável pode ou não acumular múltiplas instanciações, o novo valor substituirá o antigo ou será empilhado com os demais.

Valor equivale ao mesmo valor utilizado em caudas.

4.2.4.2 Variáveis Univaloradas x Variáveis Multivaloradas

Uma questão que deve ser levada em conta durante o acompanhamento da execução de um S.E. é que uma única variável pode receber vários valores em uma única consulta ao sistema. Ocorre, comumente, por exemplo, em sistemas de diagnóstico médico em que o paciente pode apresentar mais de uma doença; portanto, é importante saber lidar com variáveis que podem ter apenas uma instanciação (univalorada) ou múltiplas (multivaloradas). O SISES, torna simples a tarefa de definir qual o tipo de variável mais apropriada para determinada situação. A figura 23 ilustra o modo pelo qual, no SISES, as variáveis são tipificadas [21].

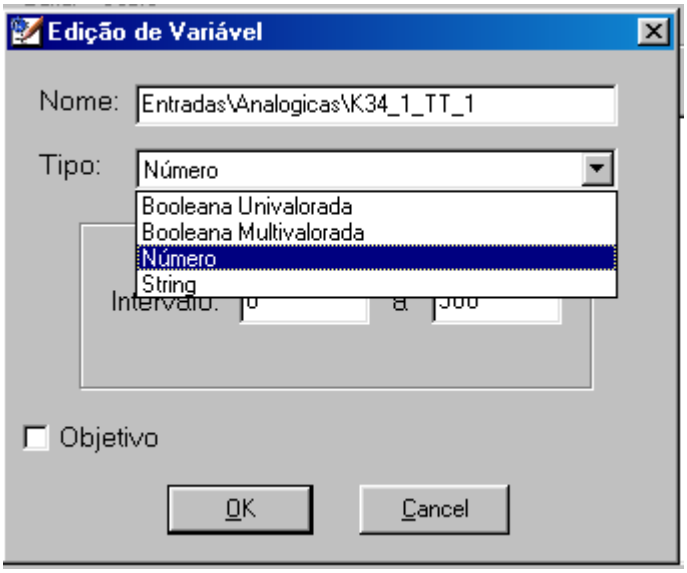


Figura 23 – Tipificação de Variáveis – Fonte [21]

Quando a máquina de inferência está no processo de encontrar instanciações para uma variável univalorada, o algoritmo da mesma faz uma busca até encontrar um valor ou esgotar todas as possibilidades da base de conhecimento. Se, por algum motivo, durante a busca de uma outra variável, uma variável univalorada receber um valor quando já havia outro, preexistente, esse valor antigo será descartado e o novo vigorará. As Variáveis numéricas são tratadas como univaloradas, sempre.

Os itens 4.2.4.3, 4.2.4.4, 4.2.4.5, 4.2.4.6 e 4.2.4.7 deste trabalho ilustram, em linhas gerais, a interface homem-máquina do SISES e o processo de desenvolvimento de um S.E [21].

4.2.4.3 Gerenciamento das Bases de Conhecimento

Como padrão, o SISES grava as bases de conhecimento geradas em arquivos *.ale. Para se abrirem bases preexistentes, basta utilizar o menu **Arquivo|Abrir Sistemas**, conforme ilustra a figura.24.

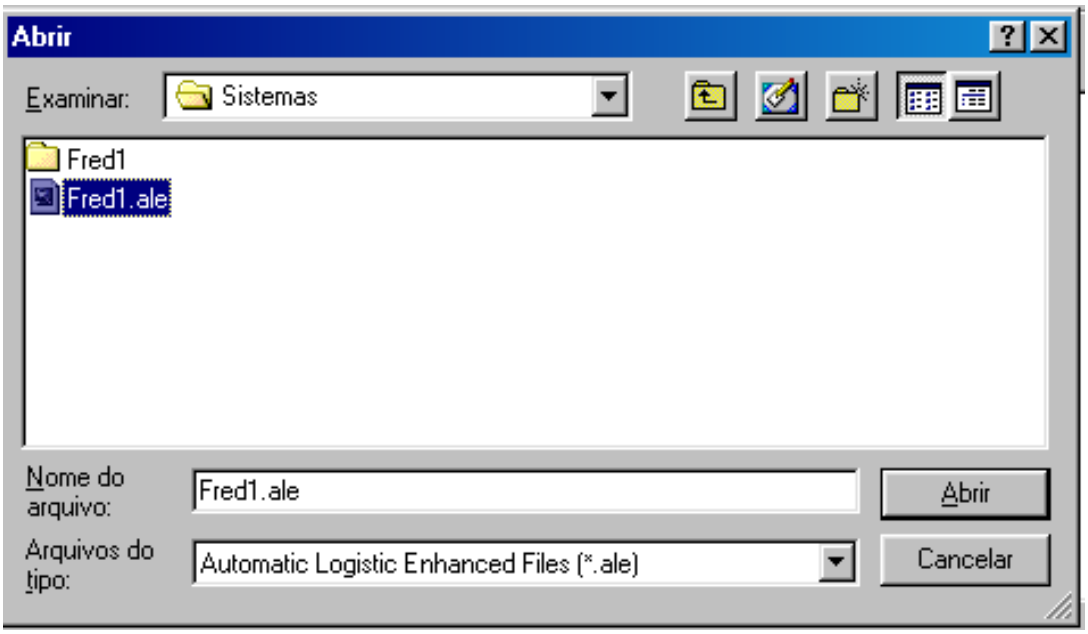


Figura 24 – Abertura de bases de dados preexistentes – Fonte: [21]

Para se criar uma base totalmente nova, usa-se o menu Arquivo|Novo Sistema. Imediatamente, uma nova base de conhecimento, vazia, será criada, conforme ilustra a figura 25.

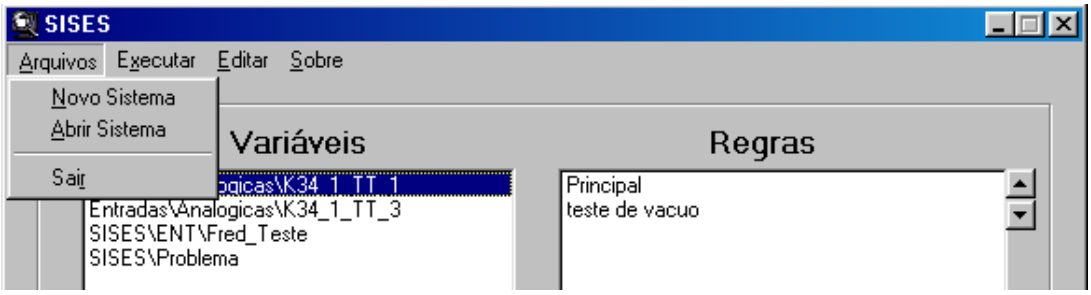


Figura 25 – Criação de sistemas novos – Fonte: [21]

4.2.4.4 Criação de Variáveis no SISES

Antes de as regras serem formuladas, é necessário criarem-se todas as variáveis utilizadas, bem como seus respectivos valores. Por meio desse mecanismo, a base fica organizada, fácil de manter, e as regras podem ser

criadas visualmente. Os dois passos necessários para criação e edição de variáveis e valores são:

a. A interface do SISES é dividida em duas grandes janelas, intituladas "Variáveis" e "Regras". Na janela “Variáveis”, clica-se com o botão direito do mouse, o que fará aparecer as seguintes opções "Nova Variável; Editar Variável; Apagar Variável", conforme ilustra figura 26;

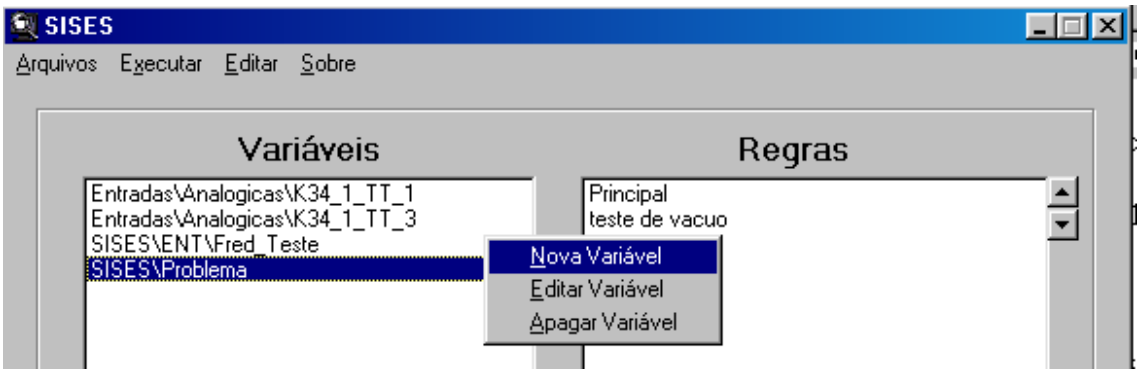


Figura 26 – Criação de novas Variáveis – Fonte: [21]

b. Uma vez escolhida a opção de “Nova Variável”, é aberta uma janela em que ela será nomeada e que possui uma caixa de listagem, em que se escolhe o tipo de variável. Deve-se especificar o intervalo para as variáveis numéricas e o tamanho para as variáveis tipo string (Texto), conforme ilustra a figura 27.

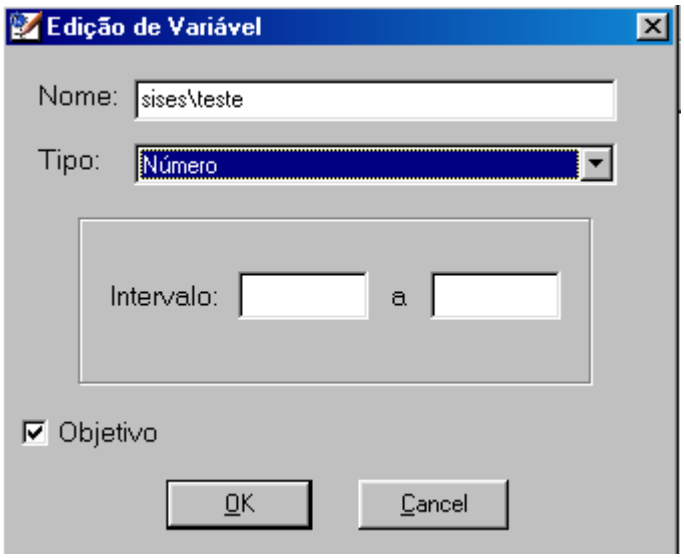


Figura 27 – Edição de novas Variáveis – Fonte: [21]

4.2.4.5 Definição do(s) Objetivo(s) do SEGS

O objetivo de uma consulta a um especialista é encontrar a resposta para um determinado problema. Assim também acontece com um S.E.. A diferença é que, no S.E., os "problemas" são representados por variáveis. Antes de executar um sistema pela primeira vez, é preciso que se definam quais são as variáveis (chamadas *variáveis objetivo*) que irão controlar o modo como a máquina de inferência se comporta.

Para tornar uma variável qualquer, um objetivo, basta clicar no campo objetivo que aparece em baixo, à esquerda, na janela de criação de variáveis (figura 27). Para fazer de uma variável comum uma variável objetivo e vice-versa, basta editá-la. As variáveis que tenham o mesmo tag (nome) de variáveis do S.S. estarão, automaticamente, em comunicação, quando ambos os sistemas estiverem rodando.

4.2.4.6 Elaboração de Regras

O SISES utiliza regras de produção [21] para modelar o conhecimento humano, o que o torna ideal para problemas de seleção, no qual uma determinada solução deve ser atingida a partir de um conjunto de opções. Para isso, na janela "Regras", deve-se clicar com o botão direito do mouse, para que apareçam as indicações de Nova Regra; Editar Regra e Apagar Regra, conforme ilustra a figura 28.

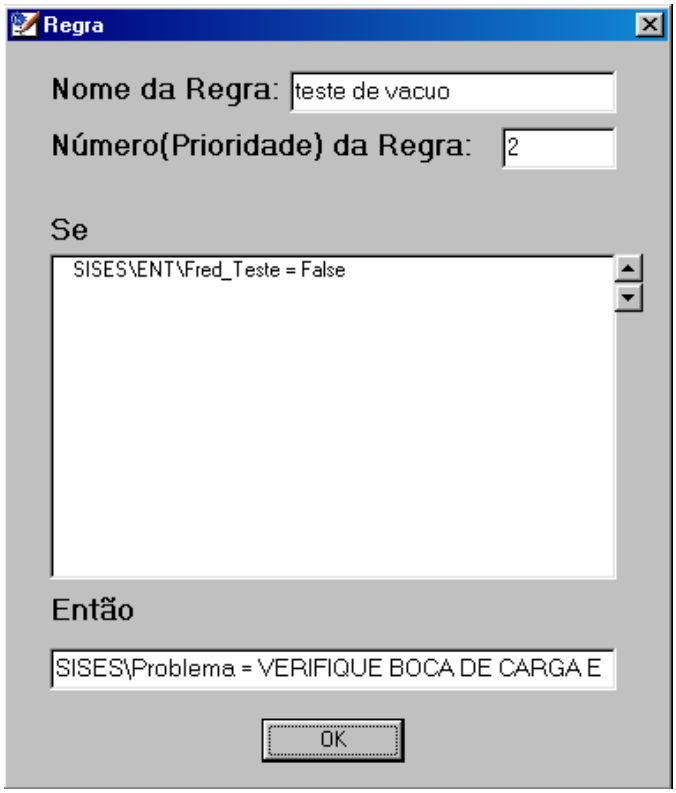


Figura 28 – **Edição de novas Regras – Fonte: [21]**

As figuras 29, 30, 31 e 32 ilustram exemplos de regras em suas caixas de diálogo. Deve-se atentar para a ordem das regras, pois ela influencia o encontro de soluções.

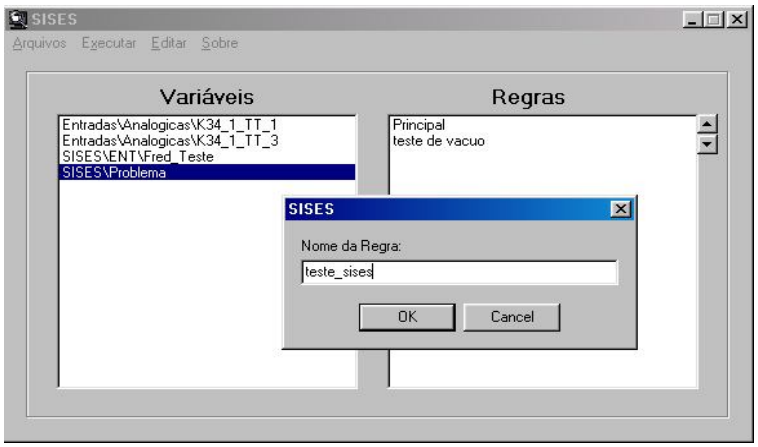


Figura 29 – Criação de novas Regras – Fonte: [21]

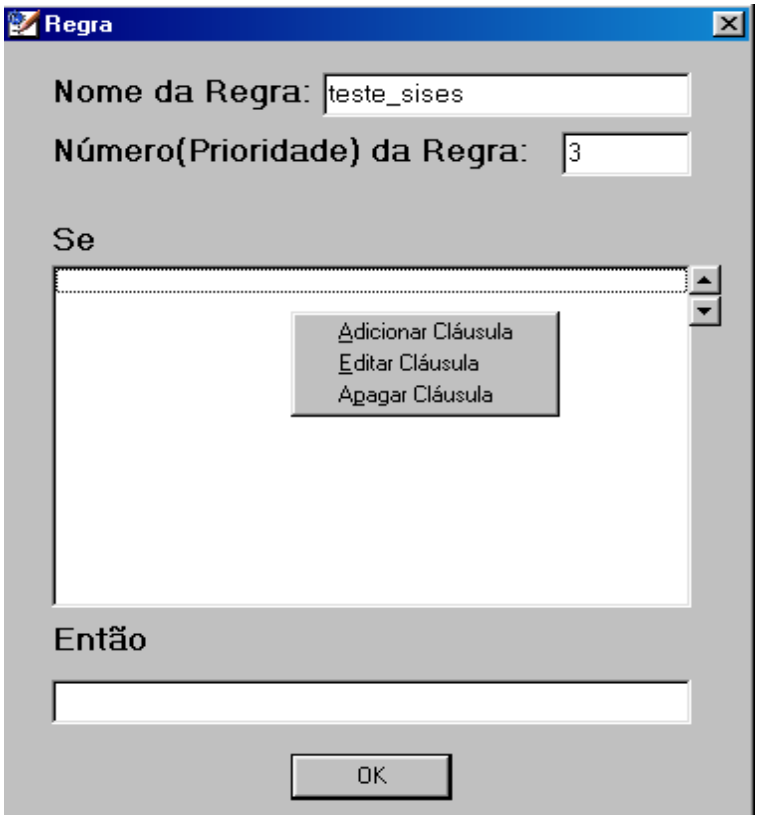


Figura 30 – Adição de nova cláusula à regra – Fonte: [21]

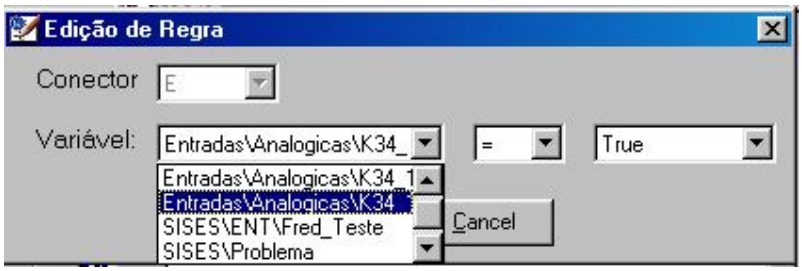


Figura 31 – **Escolha de variáveis para a regra – Fonte: [21]**

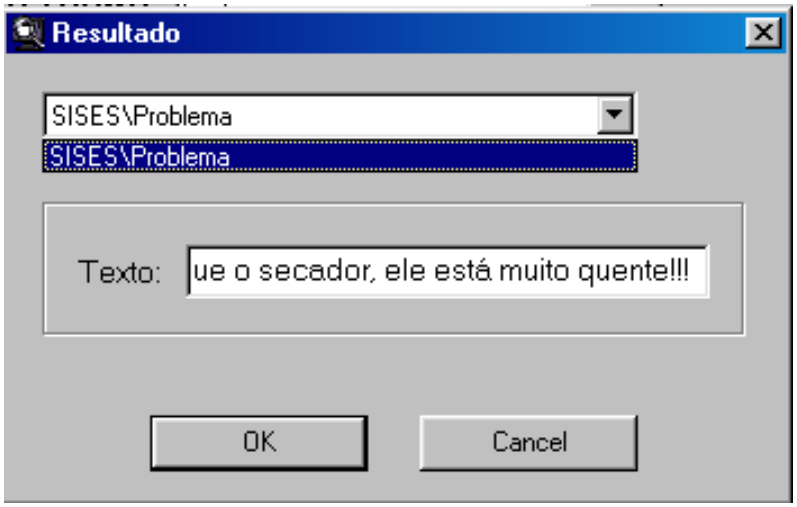


Figura 32 – **Escolha de variáveis objetivos para a regra – Fonte: [21]**

4.2.4.7 Interface com o Usuário

Um sistema especialista implementado com o SISES comunica-se com o usuário final por meio de menus, que podem ser uma tela com mensagem diretamente no S.S ou a alteração de uma variável desse S.S. Para o exemplo da simulação que será mostrado no item 4.3 (vide item 4.3.3.4) deste trabalho, foi utilizada uma tela que mostra mensagens de acordo com a variação dos parâmetros do S.S. Esse processo é dinâmico, ou seja, o SEGS fica o tempo todo monitorando o sistema, procurando validar suas variáveis objetivos que, ao serem valoradas, disparam, automaticamente, uma tela no S.S.

O desenvolvimento do módulo SEGS foi fundamentado em um amplo estudo e pesquisa sobre as principais variáveis monitoradas e controladas num sistema de saneamento. O estudo quantitativo e qualitativo dos impactos que as flutuações das variáveis controladas promovem no ciclo do saneamento foi relevante para o desenvolvimento do módulo SEGS.

4.3 Etapas para Implementação e Validação do SIGASI

Como primeira etapa de um projeto de longa e permanente duração, as fases definidas para este trabalho de pesquisa foram:

a. Definição das Metas e dos Subprocessos a serem Monitorados pelo SIGASI;
b. Desenvolvimento do Sistema Especialista;
    1. Atividade de Gestão do conhecimento
    2. Elaboração da Base do Conhecimento
    3. Elaboração da Máquina de Inferência
c. Desenvolvimento e Implementação do SIGASI Virtual;
d. Definição da Metodologia de Validação do SIGASI.

4.3.1 Meta e Subprocesso Monitorados pelo SIGASI

Neste trabalho de pesquisa foram definidas as macrometas para serem simuladas e monitoradas com a proposta do SIGASI, conforme segue:

a. Redução das despesas de energia elétrica com o bombeamento de água;
b. Redução do consumo de energia elétrica com o bombeamento de água;

c. Redução do índice de perda de água no sistema de abastecimento com o emprego de sistemas inteligentes;
d. Otimização dos quantitativos de insumos na produção de água;
e. Otimização e embasamento das ações de manutenção do Ciclo do Saneamento;
f. Geração de banco de dados em tempo real.

Para simular as regras e os procedimentos empregados em um sistema de abastecimento de água, inicialmente foi selecionada parte do subprocesso de um sistema de abastecimento de água, onde foi monitorado, pelo SIGASI, a Estação Elevatória de água – EEA. No item 4.3.1.1 deste trabalho, são descritos o processo de bombeamento de água, o hardware e o software empregados neste subprocesso do ciclo de saneamento.

4.3.1.1 Sistema de Bombeamento e Estação Elevatória de Água

De acordo com Tsutiya [2], Estações Elevatórias de Água são definidas como “conjunto das edificações, instalações e equipamentos, destinados a abrigar, proteger, operar, controlar e manter os conjuntos elevatórios (moto-bomba) que promovem o recalque da água”. Os sistemas de abastecimento de água possuem, normalmente, diversas estações elevatórias para o recalque de água bruta e de água tratada. Estes sistemas de abastecimento possuem um ou vários conjuntos de motobombas para bombear a água dos mananciais de superfície, rios, represas ou de poços profundos para outra unidade do sistema, como a ETA, o reservatório ou, diretamente, a rede que abastece os diversos consumidores, sejam eles residenciais, comerciais e industriais.

As estações elevatórias de água são compostas, basicamente, de:

a. sala das máquinas e dependências complementares;
b. poço de sucção;
c. tubulações e órgãos acessórios;
d. equipamentos elétricos e equipamentos de automação e controle;
e. dispositivos auxiliares.

As figuras 33 e 34 apresentam fotografias dos conjuntos de motobombas e sala de painéis elétricos da Estação Elevatória de Água Taubaté e Estação Elevatória de Água Consolação, respectivamente.

Figura 33 – **Fotografia dos Conjuntos Motobombas da EEA Taubaté – Fonte: Sabesp (2010)**

Figura 34 – **Fotografia da Sala de Painéis da EEA Consolação – Fonte: Sabesp (2010)**

4.3.1.2 Automação, Controle e Supervisão de uma EEA Genérica

Algumas estações elevatórias, dependendo da importância, contam, ainda, com os seguintes instrumentos e dispositivos auxiliares: medidor de vazão digital, medidor de nível digital, medidor de pressão digital, dispositivo para escorva da bomba, entre outros elementos que são empregados no processo de automação das elevatórias de água. Esses instrumentos e dispositivos são responsáveis por gerar as variáveis do processo. A figura 35 ilustra um diagrama de blocos com os módulos que constituem o processo controlado da EEA genérica de um sistema de abastecimento de água.

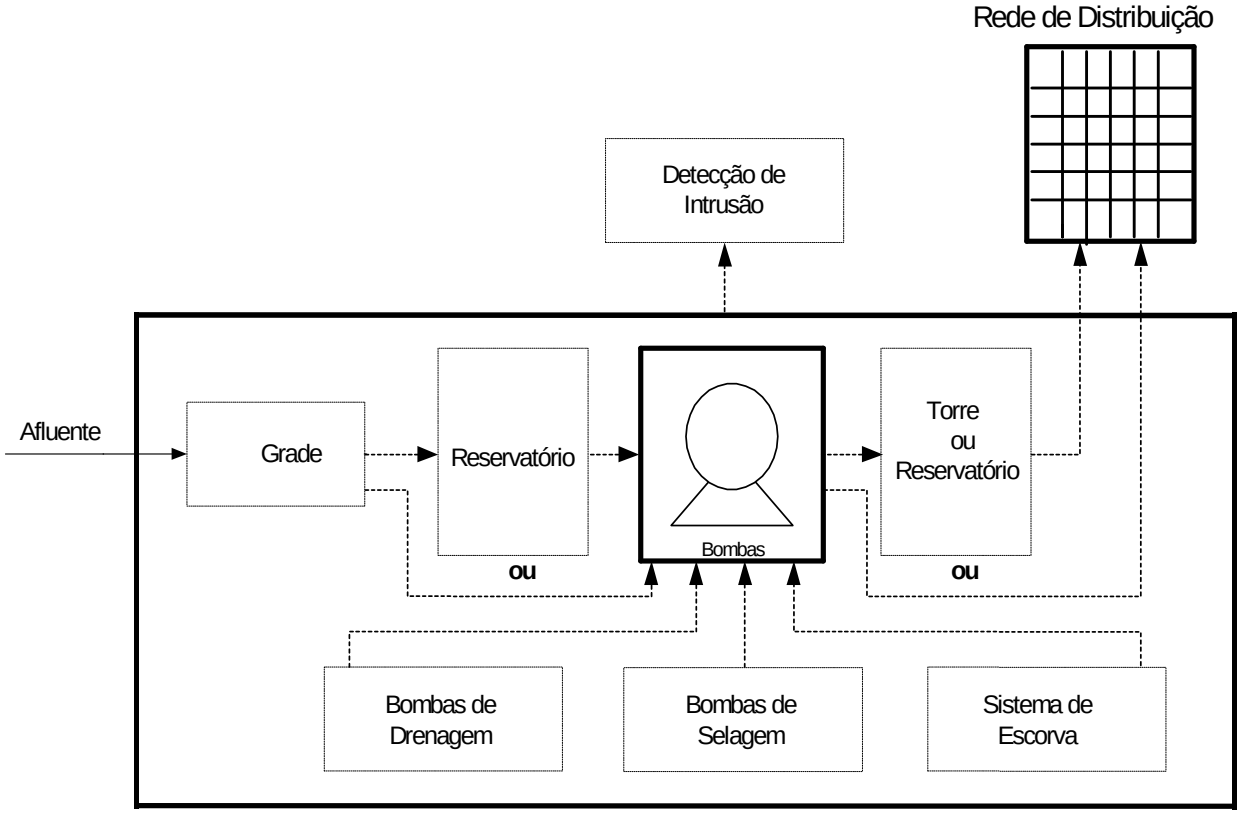


Figura 35 – Diagrama de Blocos de uma EEA Genérica - Fonte: Sabesp (2010)

A EEA genérica pode ser definida pela combinação das seguintes características:

– Entrada através de grade mecanizada (opcional);

– Conjunto de bombas afogadas, submersíveis ou não.

A metodologia operacional considerada em uma EEA consiste no acionamento escalonado das bombas (uma ou mais), de acordo com valor da variável de controle, que pode ser nível, pressão ou vazão ou, mesmo, a combinação destas. A decisão de quantas bombas devem operar em cada momento, bem como a implementação da metodologia de revezamento das bombas é objeto do projeto de cada EEA, em função da importância da estação no sistema de abastecimento de água, da capacidade dos equipamentos e da demanda contratada. Basicamente, existem dois tipos de sistemas operacionais empregados na utilização das bombas:

a. Sistemas Simétricos: os sistemas simétricos funcionam por períodos semelhantes. Este sistema operacional tem, como objetivo, homogeneizar os desgastes das bombas, distanciando, ao máximo, os períodos de manutenção dos conjuntos motobombas;

b. Sistemas Assimétricos: os sistemas assimétricos funcionam por períodos diversos entre si. Este sistema operacional tem, como objetivo, evitar coincidirem as manutenções de várias bombas do sistema de abastecimento.

A tabela 4.3 apresenta as principais características dos elementos de um sistema de automação de uma EEA genérica:

Tabela 4.3 – Elementos de um Sistema de Automação de uma EEA Genérica

Equipamento/Hardware	FUNÇÃO / CARACTERÍSTICA
Instrumentação	Conjunto de instrumentos que permitem monitorar parâmetros específicos da EEA, além de outros relacionados aos sistemas auxiliares e indicativos de estado dos equipamentos.
Painéis Locais	Conjunto de dispositivos que permitem monitorar os processos controlados e atuar sobre os mesmos. Contemplam elementos lógicos, tipicamente relés eletromecânicos, elementos de potência (disjuntores, fusíveis, contatores etc.) e equipamentos microprocessados (relé multifunção, “soft-starters”, inversores de frequência).
Controlador Lógico Programável	Controla e age sobre os painéis locais e sobre os processos controlados, tanto autonomamente, de acordo com rotinas preestabelecidas de automação, quanto reativamente, em resposta a comandos do operador, nos painéis locais, na interface ou no sistema supervisório.
Rede de Comunicação	Rede de protocolo aberto para troca de informações entre o Controlador Lógico Programável, o dispositivo de acionamento eletrônico do motor, o medidor multifunção e, quando utilizadas, as válvulas de controle microprocessadas.
Sistema Supervisório	Sistema computacional munido de programa aplicativo para controle de processos, devidamente configurado. É o recurso da operação usual da EEA, fornecendo informações dos estados e valores das variáveis do sistema e variáveis internas calculadas, possibilitando comandos e sequência de comandos sobre os elementos do processo e gerando relatórios de operação, de manutenção e gerenciais.

Em uma EEA as principais variáveis supervisionadas e controladas pelo sistema de automação estão disponíveis para o operador da EEA, por meio do sistema supervisório. Cabe ao operador ajustar os parâmetros de operação do sistema e também alterá-los em situações de contingência.

Os equipamentos, as variáveis supervisionadas e a sinalização de alarmes de uma EEA genérica e também a sua representação pictórica em um S.S. estão sumarizada nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 – Sumarização das principais variáveis supervisionadas e suas representações no S.S. de uma EEA Genérica - Fonte: Sabesp

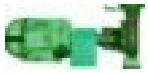
Equipamento	Estado	Representação pictórica na Tela do S.S
Motobombas	Ligado	
	Desligado	
	Sem comunicação	
Válvulas	Aberta	
	Fechada	
	Sem comunicação	
Medidor de vazão	Vazão >= 1 l/s	
	Vazão = 0	
	Sem comunicação	
Medidor de pressão	Pressão >= 1 mca	
	Pressão < 1	
	Sem comunicação	

Tabela 4.5 – Sumarização das principais sinalizações de alarmes e sua representação no S.S. de uma EEA Genérica - Fonte: Sabesp

Equipamento/ Local	Sinalização em Texto na Tela de Alarmes do S.S.	Representação pictórica na Tela do S.S.
Motobombas (poço seco)	Bomba “n”: Falta de Fase; Bomba “n”: Temp. Alta no Mancal da Bomba; Bomba “n”: Temperatura Alta no Enrolamento; Bomba “n”: Temp. Muito Alta no Enrolamento; Bomba “n”: Temp. Alta no Mancal do Motor;	
	Bomba “n”: Vibração Excessiva na Bomba; Bomba “n”: Vibração Excessiva no Motor; Bomba “n”: Mancal Bomba – lado do acopl.– Temp; Bomba “n”: Mancal Bomba – lado oposto ao acoplamento – Temperatura.	
Motobombas Drenagem	Drenagem: Bomba “n” Falta de Fase;	
	Drenagem: Bomba “n” Relé Térmico;	
Motobombas Escorva	Escorva: Bomba “n” Falta de Fase;	
	Escorva: Bomba “n” Relé Térmico;	
Válvulas Entrada da EEA	Válvula: Limite de torque ao fechar	
	Válvula: Limite de torque ao abrir	
Nível Poço Drenagem	Poço Drenagem: Nível Muito Alto	**Nível Muito Alto**
	Poço Drenagem: Nível Muito Baixo	**Nível Muito Baixo**
Sistema de Segurança/EEA	Intrusão nos equipamentos da casa de bomba: Porta dos quadros “n” aberta	**Porta Aberta**

Como em qualquer outro processo de automação industrial, as principais telas de um sistema de supervisão dedicado à automação do sistema de saneamento são representadas por:

a. Tela de sinóptica;
b. Tela de status;
c. Tela de histórico;
d. Tela de parâmetro.

As telas sinópticas possuem subtelas para os equipamentos controlados, onde são exibidos os gráficos de tendências das curvas das variáveis controladas. As figuras 36, 37 e 38 representam as principais telas utilizadas na supervisão de uma EEAT.

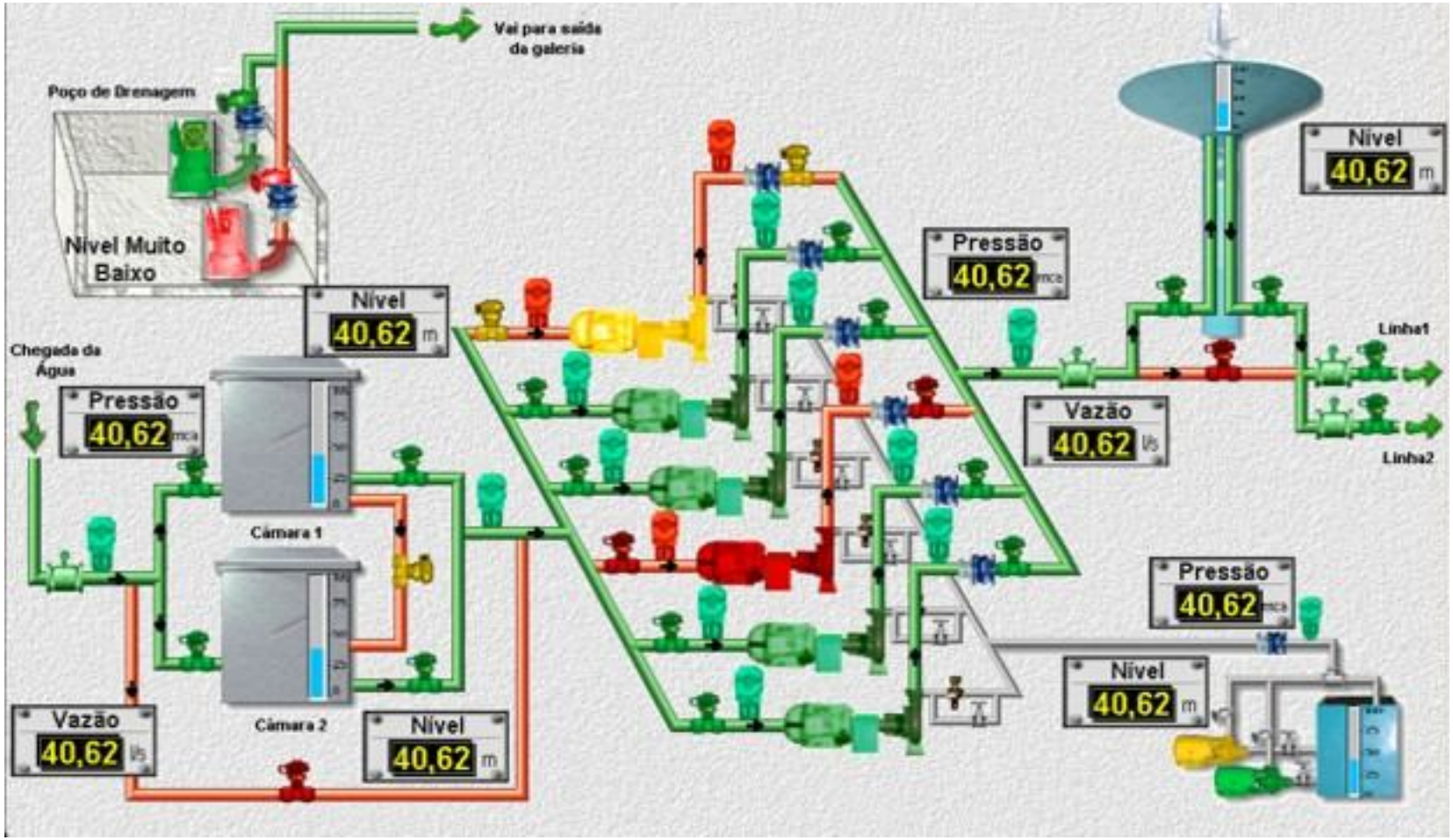


Figura 36 – **Tela do Sistema Geral de uma EEAT Genérica – Fonte: Sabesp**

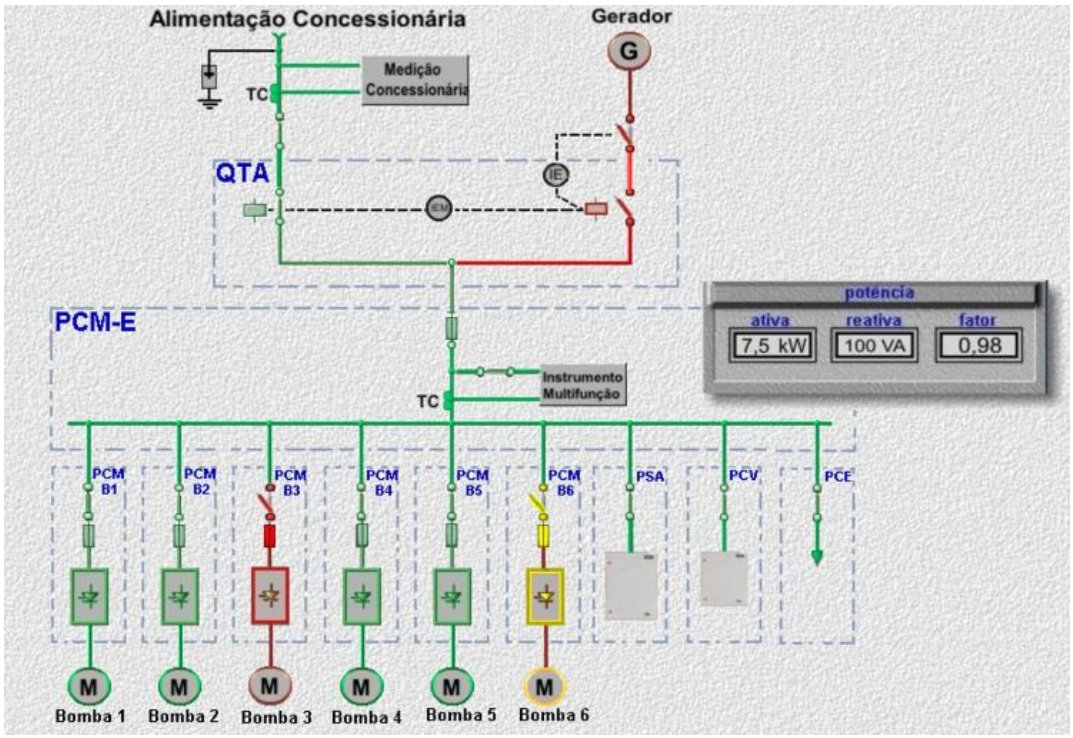


Figura 37 – **Tela do Sistema Elétrico da EEAT - Genérica – Fonte: Sabesp**

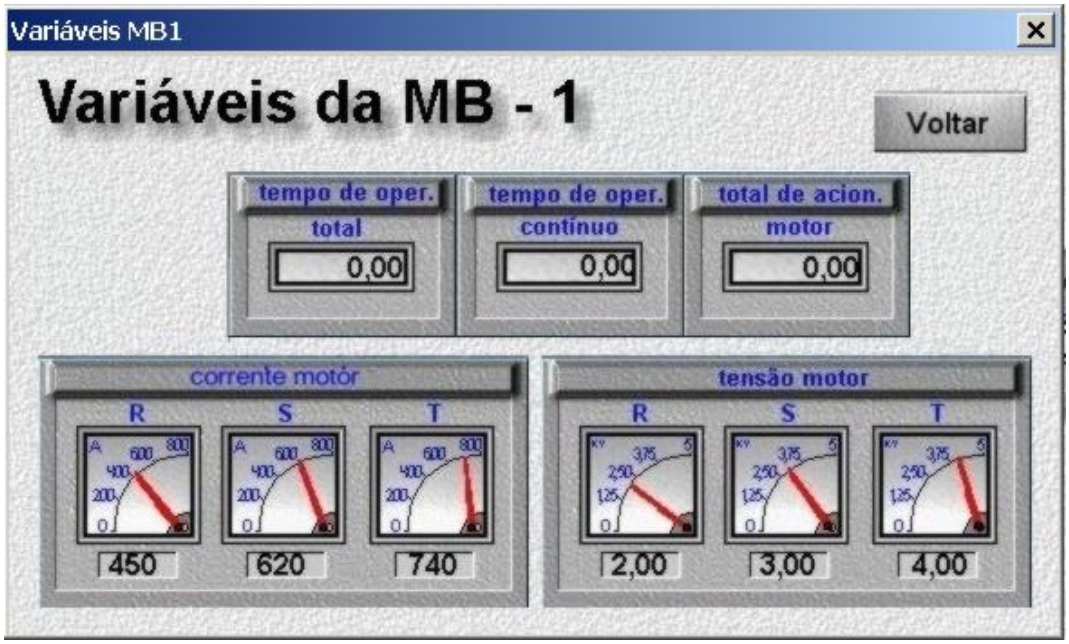


Figura 38 – **Tela das Variáveis do Conjunto Motobomba da EEA Genérica – Fonte: Sabesp**

As figuras 39 e 40 representam as principais telas utilizadas na supervisão de uma EEAB.

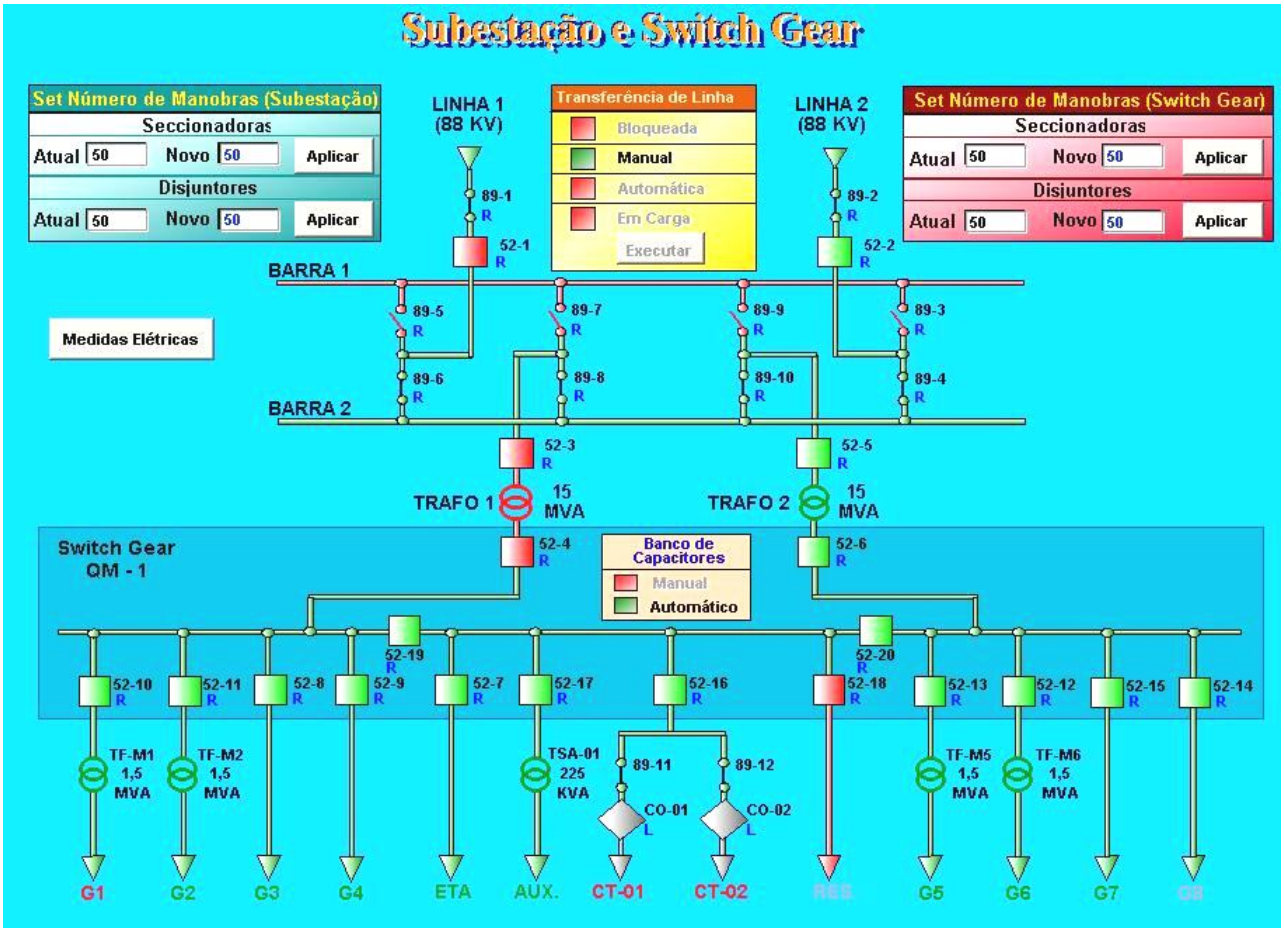


Figura 39 - **Tela Sinóptica do Sistema de Alimentação da EEAB Rio Grande - Fonte: Sabesp**

A tela ilustrada na figura 39 permite que o operador monitore e/ou comande disjuntores e seccionadoras da subestação e do swtich gear (QM1 – quadros motores). Esta tela também acessa e exibe a tela de monitoramento das grandezas elétricas de entrada das linhas de transmissão de energia e das entradas e saídas do QM1.

A tela ilustrada na figura 39 desempenha três funções básicas:

a) monitoramento do estado operacional dos seguintes equipamentos: disjuntores e seccionadoras (ligados/desligados e local/remoto); barras (energizadas ou não); transformadores (energizados ou não); transformadores rebaixadores de tensão das quatro bombas pequenas (energizados ou não); chaves a óleo (ligadas/desligadas e local/remoto);

b) comando de abertura ou fechamento de disjuntores, seccionadoras e chaves a óleo, através da tela de comando de cada equipamento;

c) configuração do número limite de manobras dos equipamentos. Se esse número for ultrapassado, uma letra “M” irá piscar ao lado do equipamento, comunicando a necessidade de manutenção. Neste caso, também será emitido um alarme.

Deve-se observar que a tela ilustrada na figura 40 está incompleta, porque a mesma não ilustra a tubulação de recalque de água; porém, deve-se salientar que todas as bombas estão conectadas à tubulação de recalque da EEAB.

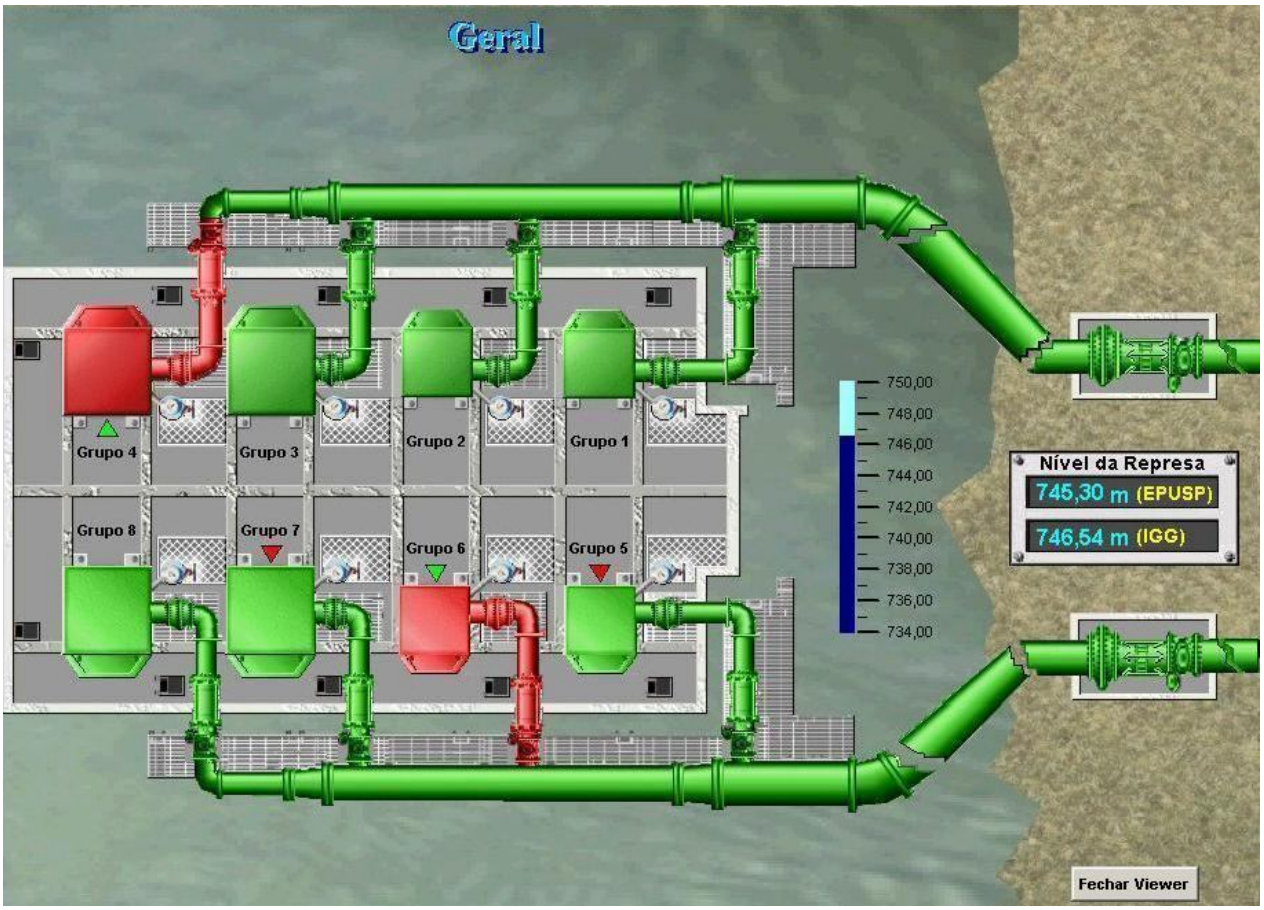


Figura 40 - **Tela Sinóptica do Sistema de Bombeamento da EEAB Rio Grande - Fonte: Sabesp**

A tela da figura 40 ilustra os equipamentos da casa das bombas que recalcam a água bruta para a ETA e também indica o nível da represa. Esta tela fornece diversas informações elétricas e hidráulicas de cada conjunto motobomba, após ser clicada a opção desejada. Eventuais falhas de comunicação são ilustradas por meio da mudança de cor do conjunto motobomba. Quando houver falha de comunicação entre a estação concentradora e alguma outra estação, somente os equipamentos referentes à estação com problemas ficarão de cor diferente das demais. Neste exemplo de tela, há falha de comunicação nos conjuntos motobomba 4 e 6.

O sistema de saneamento envolve diversos subprocessos (vide item 1.5), tornando relativamente complexa sua operação. O processo de EEA foi selecionado para realização da simulação deste trabalho de pesquisa, em função da sua ampla integração com os outros subprocessos. Entretanto, a validação do SIGASI neste subprocesso pode ser facilmente replicada para os outros do ciclo saneamento, por ser tratar de uma metodologia.

Para o adequado andamento de uma EEA, é necessário o uso de diversos equipamentos e variáveis controladas, trabalhando de forma integrada. Exemplificando, os anexos B e C deste trabalho de pesquisa apresentam, respectivamente, o fluxograma de engenharia de operação e o Diagrama e Processo de Instrumentação - P&ID da EEA genérica. Observe-se, neste exemplo, a complexidade de operação e a necessidade de interação entre os instrumentos, no processo de automação de uma EEA.

4.3.2 Desenvolvimento do Sistema Especialista

Para a implementação do Sistema Especialista e Gestão do Saneamento - SEGS (vide item 4.2.4) houve necessidade do desenvolvimento de três etapas básicas:

a. Atividade de Gestão do Conhecimento**:** esta etapa envolveu o desenvolvimento de atividades de engenharia do conhecimento. Nela foi realizada a coleta das informações dos especialistas, usuários finais e operadores do sistema. Teve, como objetivo, adquirir informações pertinentes sobre a operação do sistema de saneamento.

b. Elaboração da Base de conhecimento**:** esta etapa consistiu na sistematização das informações (fatos e regras) coletadas na etapa anterior. São utilizadas pelo especialista dos subprocessos de

saneamento para solucionar determinado problema do processo, e são representadas computacionalmente no S.E.. São sistematizadas nesta fase para que o sistema auxilie na tomada de decisões durante a operação do sistema de saneamento, quer seja feita pelo operador ou realizada de maneira automática.

c. Elaboração da Máquina de inferência: esta etapa consistiu na elaboração da máquina de inferência, parte do S.E. responsável pelas deduções sobre a base de conhecimentos, construída na etapa anterior deste trabalho de pesquisa.

4.3.2.1 Atividade de Gestão do Conhecimento

A atividade de gestão do conhecimento neste trabalho de pesquisa adotou a estratégia inicial de elaborar cinco questões e buscar as respectivas respostas. Esta atividade foi elaborada durante os meses de maio, junho e julho de 2011. As cinco questões são:

a. Quais são os procedimentos formais e práticos adotados pela companhia para o treinamento dos operadores?
b. Existe algum manual de operação disponível para os operadores e também para o treinamento dos mesmos?
c. Qual é o conhecimento que o operador tem do sistema?
d. Quais são as ações que o operador executa em condições normais de operação do sistema?
e. Quais são as ações que o operador executa em condições anormais de operação do sistema?

As respostas a estas cinco questões obtidas junto à gerência do Centro de Controle Operacional da SABESP, do município de São Paulo, permitiram

sistematizar o conhecimento de operação do sistema efetuado pela interação do operador, em função das informações disponíveis em tempo real pelo sistema supervisório.

A gerência do CCO informou que o treinamento para formação de um operador é constituído de duas etapas, totalizando um período de 12 meses:

a. Treinamento teórico, com aulas didáticas e com os próprios manuais de operação e manutenção do sistema;
b. Treinamento prático com visitas em campo e operação supervisionada por um operador experiente.

Em suma, os manuais de operação empregados nos treinamentos dos operadores consistem dos fluxogramas das necessidades de manutenção preventiva, manutenção corretiva ou outra manobra que afeta a operação do CCO e o Sistema de Gestão da Adução - SGA da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, que mantém o sistema de abastecimento de água operando conforme os parâmetros predefinidos. São três manuais, de uso restrito da companhia e de reprodução proibida, onde são também apresentados seis fluxogramas normativos das operações. Os fluxogramas são:

a. Fluxograma de acesso ao Sistema de Controle Operacional de Abastecimento;
b. Fluxograma de solicitação de criação e/ou parametrização do sistema;
c. Fluxograma de solicitação de customização/correção do sistema;
d. Fluxograma de programação de eventos no Sistema de Gestão da Adução. É o processo pelo qual o solicitante requer a abertura de um evento de manutenção no Sistema de Gestão da Adução, que pode afetar, diretamente, o sistema de abastecimento de água;
e. Fluxograma de planejamento de eventos programados no sistema;

f. Fluxograma de execução de acompanhamento de eventos programados.

Em vista do objetivo desta tese de doutorado, foram selecionados alguns procedimentos de contingência dos subprocessos do sistema de abastecimento de água para serem monitorados e controlados pelo SIGASI. Os respectivos procedimentos estão descritos:

a) Rompimento da tubulação de recalque do sistema de abastecimento: esta contingência pode ser identificada por meio da análise dos seguintes parâmetros monitorados:
   a. a pressão de recalque geral da EEA apresenta pressão inferior à pressão nominal, mesmo com a operação normal dos conjuntos motobomba;
   b. a pressão de recalque de cada conjunto motobomba também apresenta pressão inferior à pressão nominal;
   c. a vazão de saída geral da EEA apresenta vazão superior à vazão nominal.

b) Travamento da Válvula geral de Saída da EEA do Sistema de Abastecimento: esta contingência pode ser identificada por meio da análise dos seguintes parâmetros monitorados:
   a) a pressão de recalque do sistema de abastecimento de água apresenta pressão superior à pressão nominal;
   b) a vazão de saída geral da EEA apresenta vazão inferior à vazão nominal.

c) Falta de Energia Elétrica, conjuntos motobomba desligados: Esta contingência pode ser identificada por meio da análise dos seguintes parâmetros monitorados:

a) Variáveis de “grupo ligado” de todos os conjuntos apresentam nível lógico zero;

b) Variáveis de “defeitos da EEA” apresentam nível lógico zero.

d) Falha na Solicitação a distância para ligar os conjuntos motobomba da EEA: esta contingência pode ser identificada por meio da análise dos seguintes parâmetros monitorados;

a. variáveis “solicitação a distância” dos conjuntos motobomba apresentam nível lógico um;

b. variáveis dos conjuntos “motobomba ligado” apresentam, após um tempo predefinido, nível lógico zero, ou seja, as bombas não ligaram.

e) Baixa Pressão nos conjuntos motobomba da EEA: esta contingência pode ser identificada por meio da análise dos seguintes parâmetros monitorados:

a. a pressão de sucção do conjunto motobomba apresenta pressão inferior à pressão nominal;

b. a pressão de entrada geral da EEA apresenta pressão normal.

f) Alta Pressão de recalque nos conjuntos motobomba: esta contingência pode ser identificada por meio da análise dos seguintes parâmetros monitorados:

a. a pressão de recalque dos conjuntos motobomba apresenta pressão superior à pressão nominal;

b. a pressão de saída geral da EEA apresenta pressão inferior à pressão nominal.

g) Supervisão de falha nas entradas analógicas do sistema de automação da EEA: esta contingência pode ser identificada por meio da análise do seguinte parâmetro monitorado

    a. a variável “falha analógica” apresenta nível lógico um.

h) Solicitação simultânea de liga dos conjuntos motobomba: esta contingência pode ser identificada por meio da análise do seguinte parâmetro monitorado:

    a. variável “solicitação de liga” dos conjuntos motobomba apresenta nível lógico um. Esta solicitação a distância deve ser enviada uma a uma para o CLP, em função da demanda contratada e possível imposição de sobrepressão na tubulação de abastecimento de água. Assim, o operador deve aguardar o final de partida de cada conjunto motobomba e, somente após a primeira bomba ligar, enviar a solicitação do outro conjunto para o CLP; e assim por diante.

A tabela 4.6 apresenta o resumo das contingências trabalhadas para efeito da construção do SIGASI.

Tabela 4.6 – Resumo da contingência do processo de construção do SIGASI

Parâmetros Monitorados	Contingência Provável	Ações Prováveis do Especialista humano
• pressão de recalque geral; • pressão de recalque dos conjuntos • vazão de saída geral da EEA	Rompimento da tubulação de recalque do sistema de abastecimento	Desligar todos os conjuntos, imediatamente, e acionar a equipe de manutenção, para verificar possível rompimento na tubulação de abastecimento de água
• pressão de recalque geral • vazão de saída geral da EEA	Travamento da válvula geral de Saída da EEA do Sistema de Abastecimento	Desligar os conjuntos motobomba e enviar equipe de manutenção imediatamente, para verificar a válvula geral da saída do sistema de abastecimento de água, pois a mesma pode estar travada na posição fechada
• Variáveis de "grupo ligado" • Variáveis de "defeitos da EEA	Falta de Energia Elétrica, conjuntos motobomba desligados	Acionar a equipe de manutenção para fechar a válvula geral do sistema de abastecimento de água, pois a mesma não está automatizada, caso não fechar esta válvula em 30 minutos, ocorrerá golpe hidráulico na tubulação de abastecimento de água, causando danos significativos ao abastecimento de água desta região
• variáveis "solicitação a distância" • variáveis dos conjuntos "motobomba ligado"	Falha na Solicitação à distância para ligar os conjuntos motobomba da EEA	Retirar a solicitação de liga e enviar equipe de manutenção para verificar o problema no local
• pressão de sucção do conjunto • pressão de entrada geral da EEA	Baixa Pressão nos conjuntos motobomba da EEA	Desligar a bomba com pressão baixa e enviar equipe de manutenção, imediatamente, para verificar a válvula de sucção do conjunto, pois a mesma pode estar travada, na posição fechada
• pressão de recalque dos conjuntos • pressão de saída geral da EEA	Alta Pressão de recalque nos conjuntos motobomba	Desligar as bombas e enviar equipe de manutenção, imediatamente, para verificar as válvulas de recalque de cada conjunto, pois as mesmas podem estar travadas, na posição fechada
• variável "falha analógica"	Supervisão de falha nas entradas analógicas do sistema de automação da EEA	Enviar equipe de instrumentação/automação para sanar o problema no instrumento com defeito

4.3.2.2 Desenvolvimento da Base de Conhecimento

Para o desenvolvimento da base de conhecimento foram elaboradas as respectivas regras, conforme os procedimentos descritos na tabela 4.6. Essas regras foram desenvolvidas no próprio módulo SEGS (vide item 4.2.4) que é o módulo do SIGASI. Observe-se que esses procedimentos elaborados são os mesmos que um especialista humano da área do saneamento utilizaria para diagnosticar determinadas contingências do subprocesso do saneamento. As figuras 41, 42 e 43 ilustram a síntese da base do conhecimento elaborada para atender aos objetivos desta tese de doutorado.

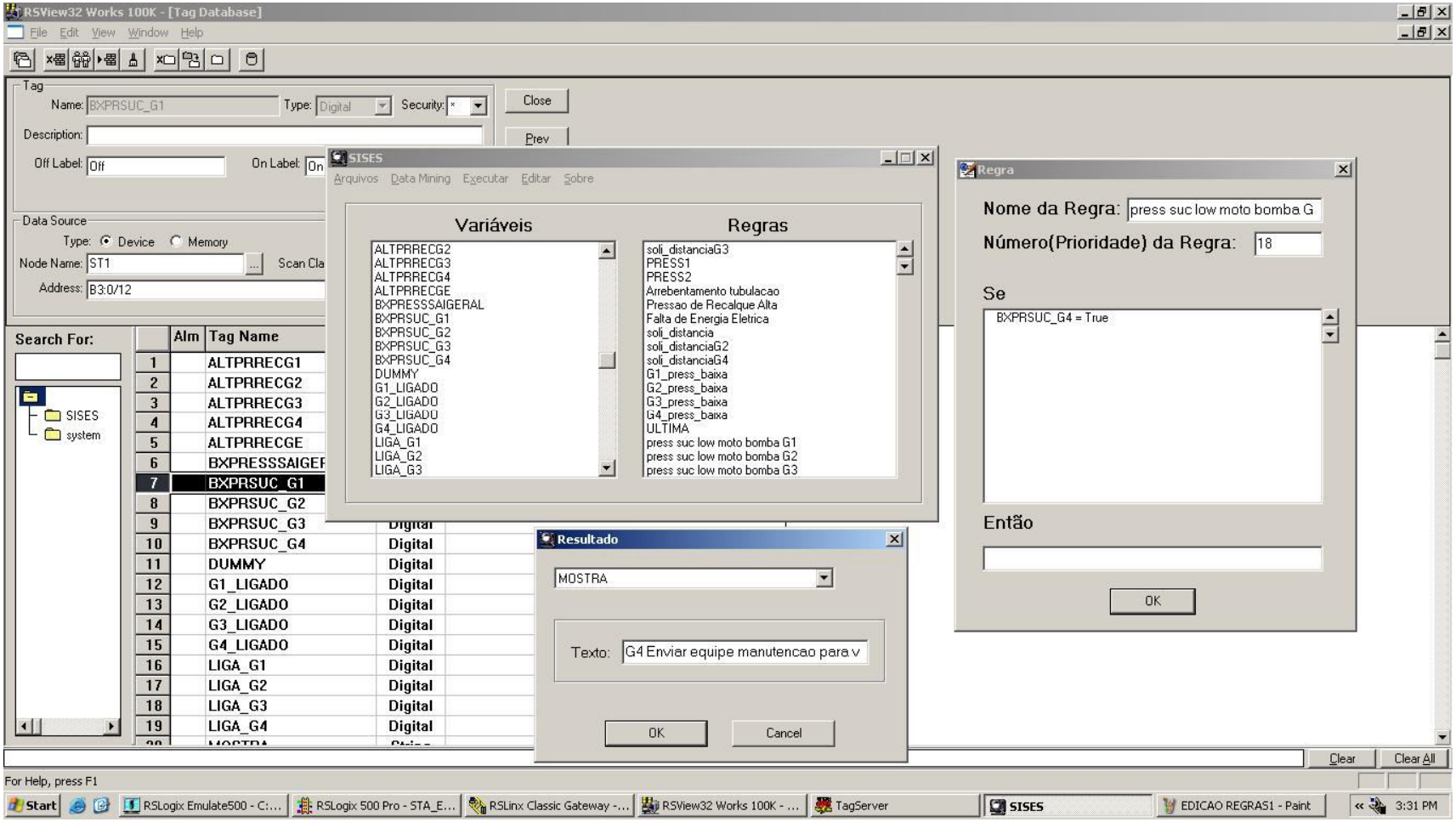


Figura 41– Elaboração da base do conhecimento do processo de saneamento

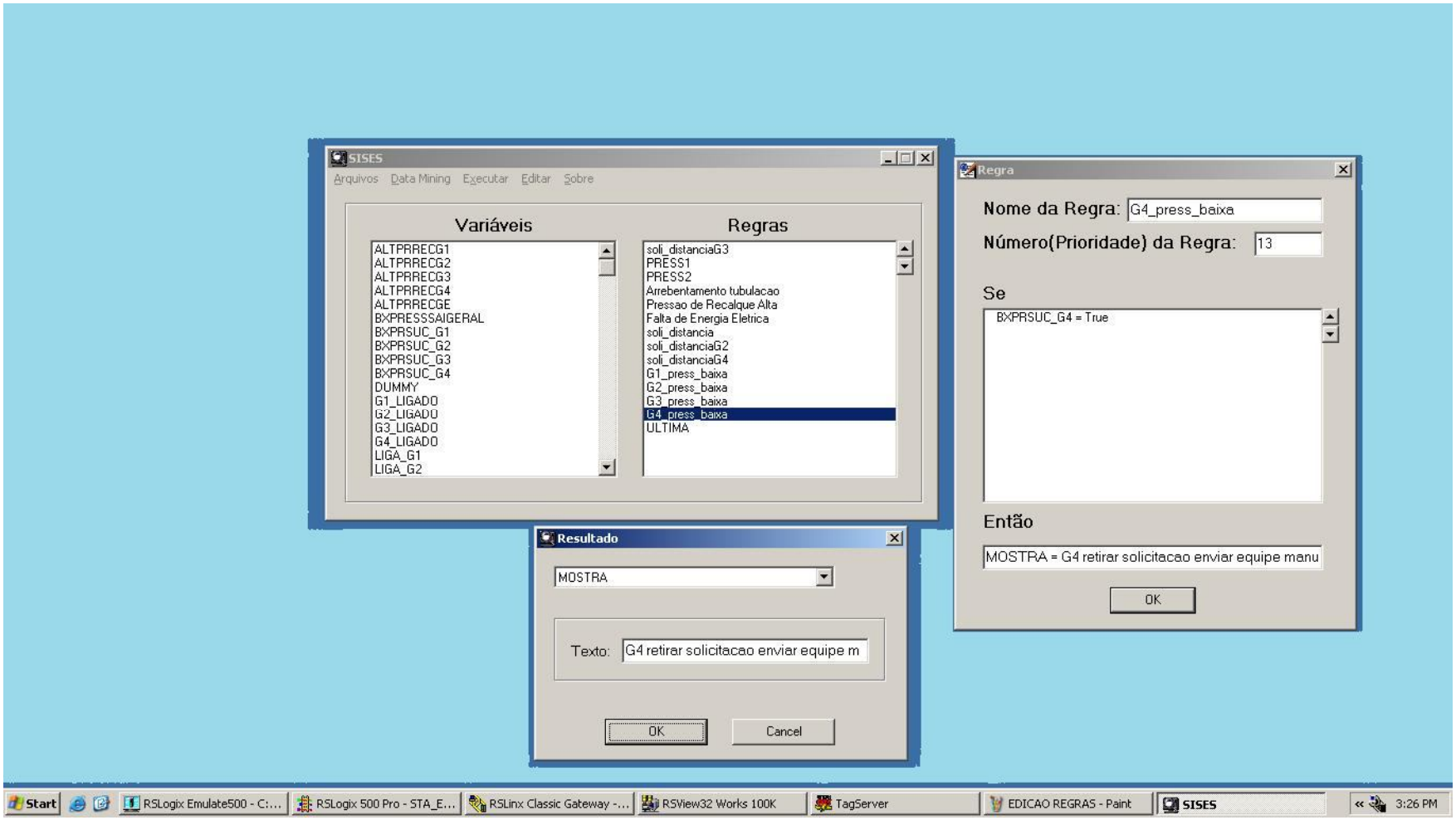


Figura 42 – Exemplo do desenvolvimento da base do conhecimento do Processo de Saneamento

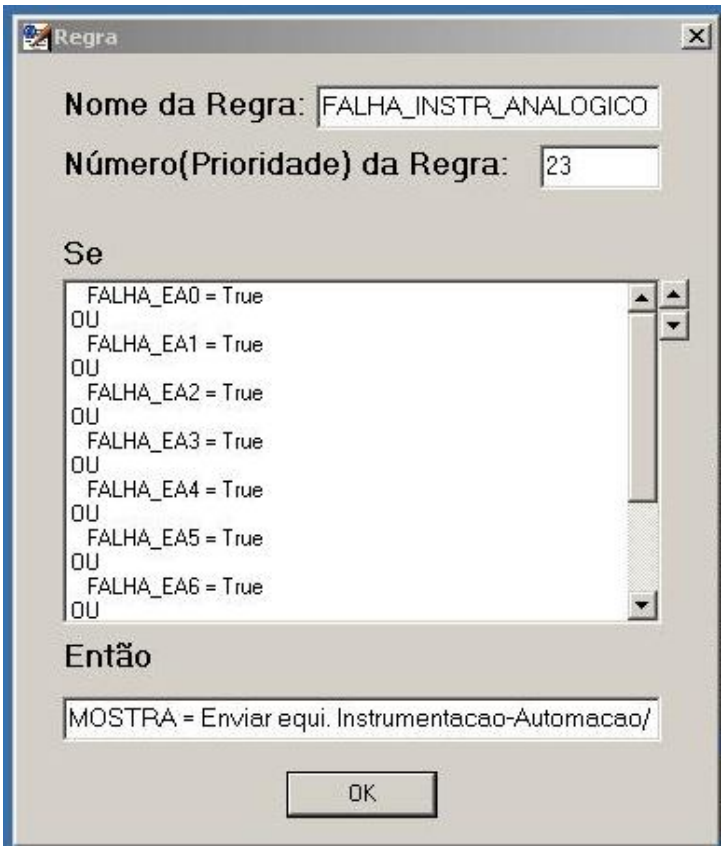


Figura 43 – Exemplo de elaboração das regras do Processo de Saneamento

Observe-se nas figuras 41, 42 e 43 que as regras desenvolvidas foram associadas com cada variável do processo da EEA, ou seja, o módulo SEGS fica, em tempo real, monitorando as variáveis da EEA. Essas variáveis são disponibilizadas pelo S.S.. Como premissa da metodologia de arquitetura deste estudo, as variáveis simuladas devem ter o mesmo nome no S.S e no SEGS. Em função da alteração destas variáveis, o sistema especialista auxilia o operador a tomar decisão ou, até mesmo, ele próprio o faz, em função daquela determinada contingência do processo do saneamento. Neste caso, o SEGS emite uma tela de mensagem para o S.S, auxiliando o operador a tomar decisão na gestão do saneamento (vide item 4.3.3.4).

A tabela 4.7 apresenta, para melhor explanação, as regras ilustradas na figura 43, que é o item contingência g, do subitem 4.3.2.1 deste trabalho.

Tabela 4.7 – Exemplo da regra elaborada do SEGS, conforme figura 43

Regra Elaborada (SE)	Contingência	Ação do SEGS (ENTÃO)
EA0=verdadeiro, ou EA1=verdadeiro, ou EA2=verdadeiro, ou EA3=verdadeiro, ou EA4=verdadeiro, ou EA5=verdadeiro, ou EA6=verdadeiro, ou EA7=verdadeiro, ou EA8=verdadeiro, ou EA9=verdadeiro	Falha no Instrumento Analógico da EEA do Sistema de Abastecimento de água	Enviar equipe de instrumentação e automação para verificar instrumento analógico com defeito

4.3.2.3 Desenvolvimento da Máquina de Inferência

Na ciência de I.A existem, basicamente, duas técnicas de inferência consagradas para elaboração de uma Máquina de Inferência (vide item 3.5.5). A estratégia de inferência empregada neste trabalho de pesquisa é a regra de encadeamento para trás, a mesma utilizada por Andrade [21] no desenvolvimento do SISES.

A regra de encadeamento para trás é caracterizada pelo fato de o especialista, primeiramente, considerar algumas conclusões ou objetivos e tentar alcançar as informações que apóiam tais objetivos. A técnica de encadeamento para trás é definida como uma técnica de inferência que tenta provar uma hipótese pela busca de evidências que satisfarão ou contradirão essa hipótese.

Um sistema de encadeamento para trás é baseado em uma meta para se provar. Ele segue as seguintes etapas:

a. Primeiramente, verifica a memória de trabalho para ver se a meta foi previamente adicionada. Este passo é necessário, pois outra base de conhecimento pode já ter provado a meta;
b. Se a meta ainda não foi provada, o sistema realiza uma busca procurando por uma ou mais regras que contenham a meta na parte **então**. Esse tipo de regra é chamado de regra alvo;
c. Ele verifica se as premissas da regra alvo estão listadas na memória de trabalho. Premissas não listadas podem tornar-se novas metas a serem provadas;
d. Este processo continua de maneira recursiva até que o sistema encontre uma premissa que não seja concluída por nenhuma regra;
e. Este tipo de premissa é chamado de **primitiva.** Ao encontrar uma primitiva, o sistema realiza um questionamento ao usuário, cujas respostas são colocadas na memória de trabalho.

O processo continua até que todas as metas e submetas tenham sido procuradas. Nesse ponto, a memória de trabalho conterá todas as informações inseridas pelo usuário e inferidas pelo sistema. Parte dessa informação será usada para se determinar a meta inicial como verdadeira ou falsa [21].

A figura 44 ilustra, de maneira simplificada, como se dá esse processo.

Fluxograma do Algoritmo de “Backward Chaining”

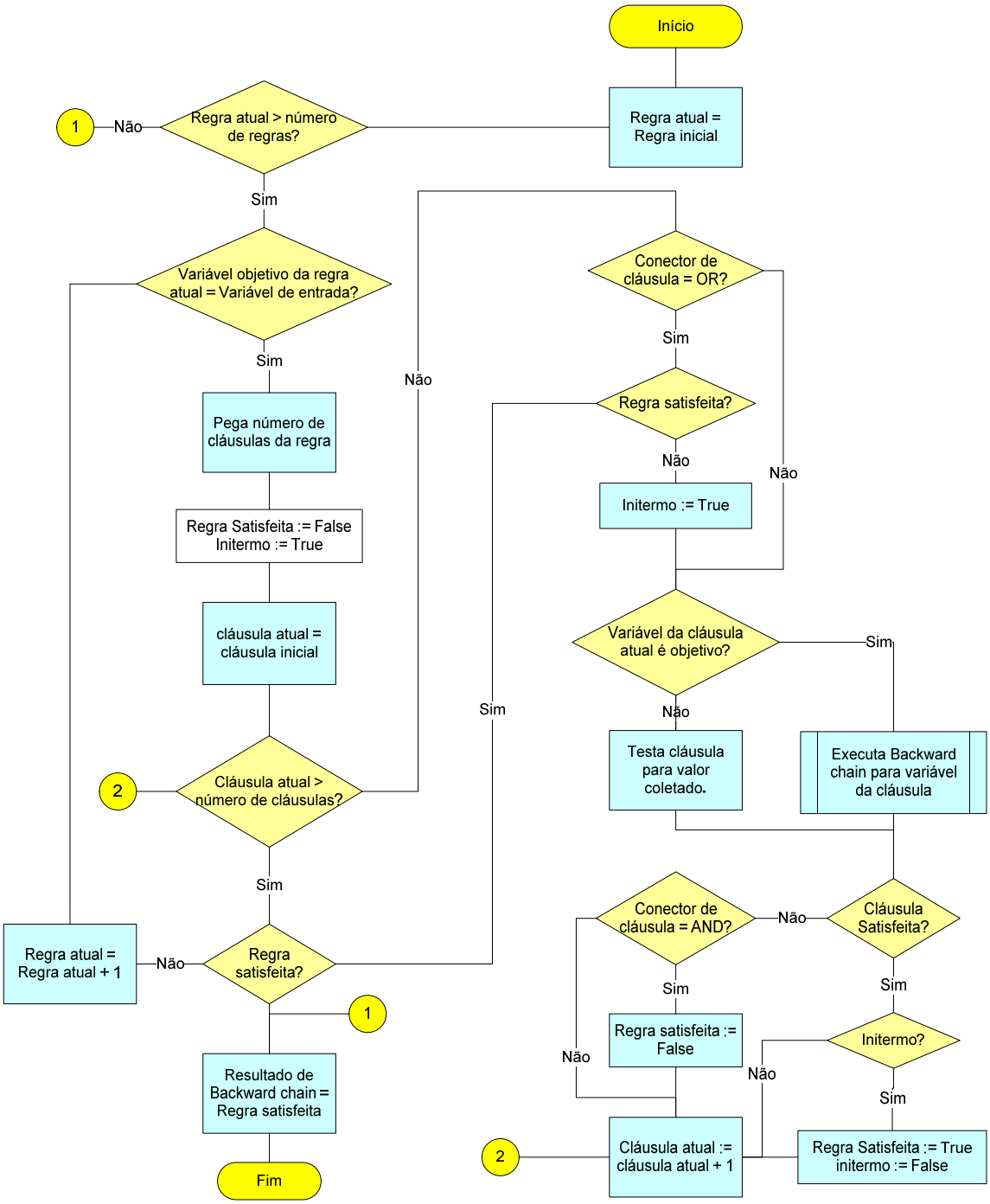


Figura 44 - Processo de encadeamento para trás - Fonte: [21], [56]

4.3.3 Desenvolvimento e Implementação do SIGASI Virtual

Este item apresenta o desenvolvimento e implementação da aplicação prática do SIGASI para o sistema de saneamento descrito nos itens 4.3.1.1, 4.3.2.1, 4.3.2.2 e 4.3.2.3.

Essa etapa do trabalho apresenta o desenvolvimento e os testes realizados, utilizando as ferramentas de geração do SEGS, um S.E. capaz de observar a variação dos parâmetros do S.S. do sistema de saneamento, e nele interferir em tempo real. Esse S.E. dispõe mensagens sobre as inferências resultantes da interação com o S.S.. O Módulo SEGS permite, também, que as inferências resultem em ações no S.S. para permitir a operacionalidade do SIGASI.

Para o cumprimento desta etapa foi elaborada uma estratégia, conforme ilustra a figura 45.

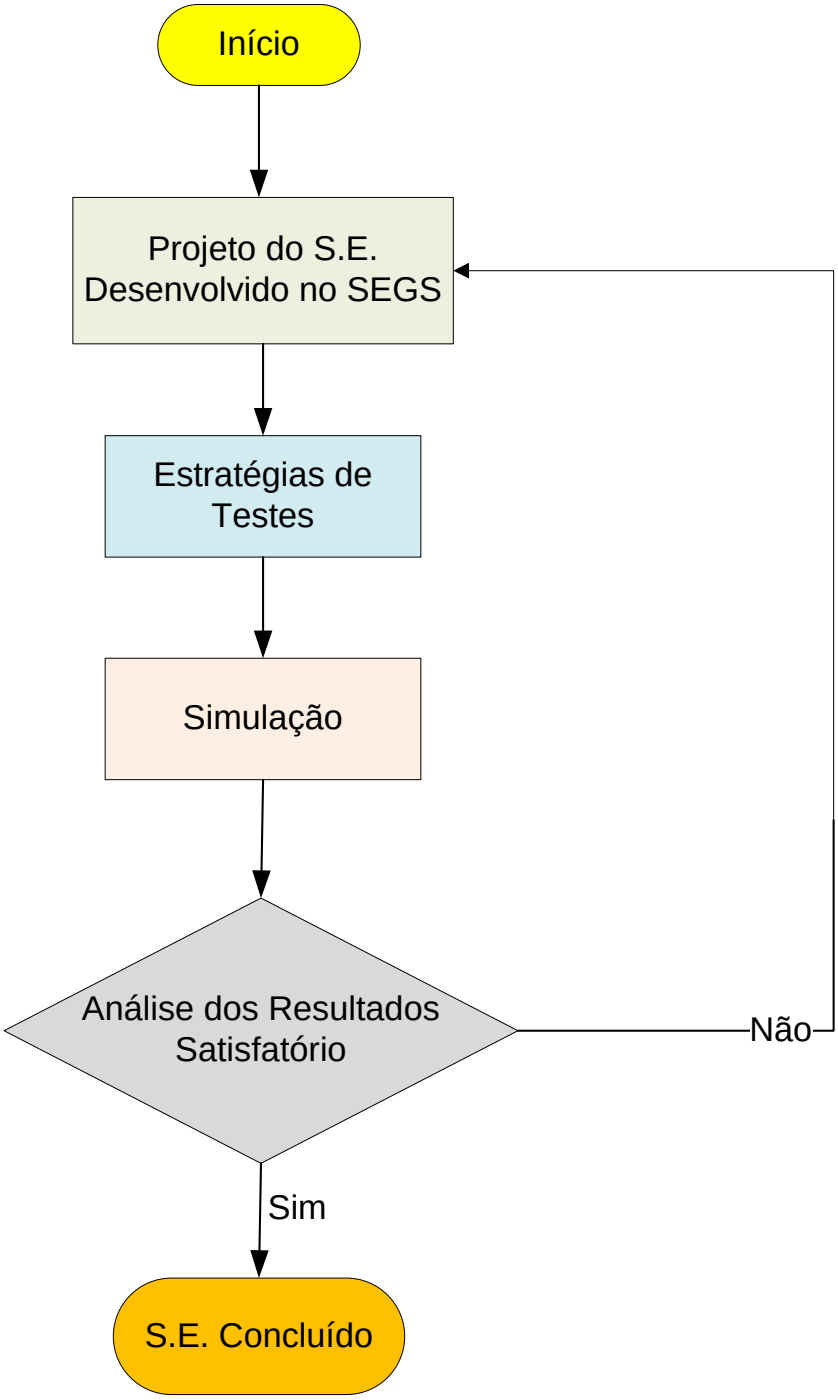


Figura 45 - Estratégias para elaboração de S.E. no SEGS

4.3.3.1 Metodologia de Validação do SIGASI Virtual

O SIGASI foi validado por meio de simulação. Para tanto, foi programado o módulo SEGS que operou em um laboratório com um Sistema Supervisório, onde as variáveis de um processo de saneamento foram manipuladas, conforme a necessidade de promover uma contingência simulada. Para realização dos testes foi empregado um emulador de CLP, um sistema supervisório desenvolvido de forma semelhante aos atuais sistemas de uma Companhia de saneamento como a SABESP, COPASA, SANEPAR, entre outras..

O emulador de CLP tem, por função, alimentar os dados do sistema supervisório, que, por sua vez, se comunica em tempo real com o S.E. Assim, por simulação, parte de um sistema de saneamento está replicado virtualmente. A macroestrutura do hardware virtual deste modelo é ilustrado na figura 46.

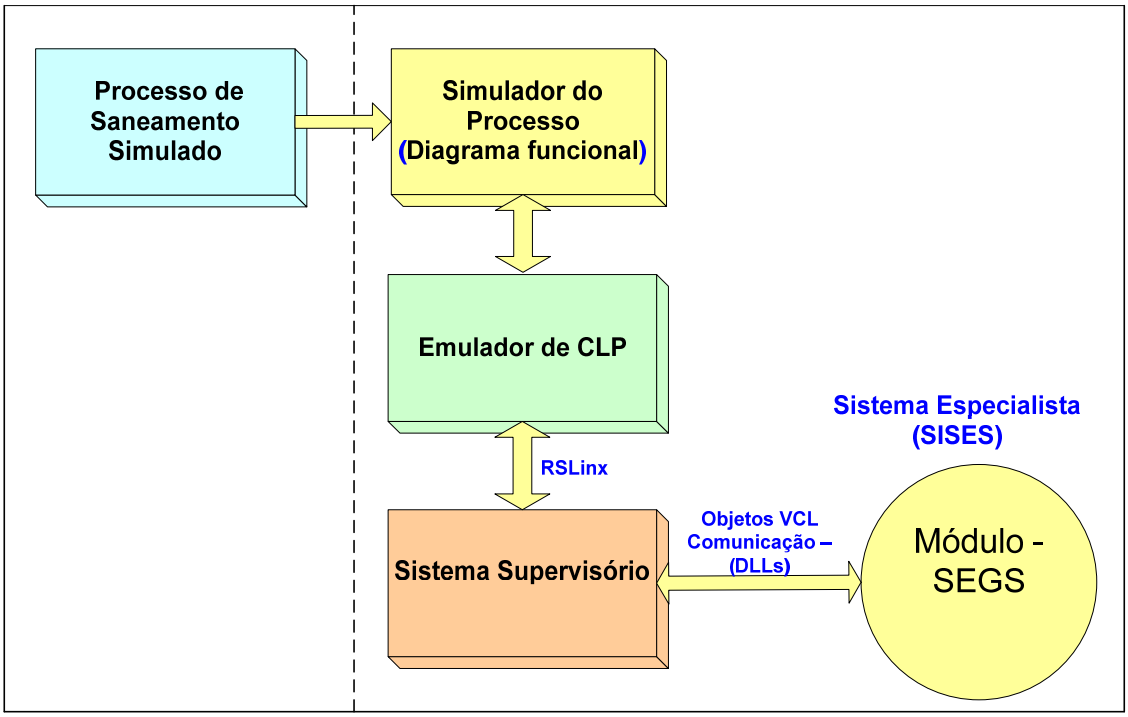


Figura 46 – Macroarquitetura do Hardware Virtual do Modelo de Validação do SIGASI

Deve-se notar, na figura 46, que os sinais de campo são "virtuais", ou seja, gerados pelo simulador do processo. O emulador sozinho não é suficiente para a simulação porque não é capaz, por si só, de reproduzir as respostas de campo; ele precisa do simulador do processo.

4.3.3.2 Plataforma de Simulação da Arquitetura do SIGASI

O software empregado para a simulação do emulador de CLP e o software do processo foi o RSLogix Emulate 500 da Rockwell Software [60], devido a suas características técnicas que permitem uma simulação de processos complexos fiéis à realidade de um processo a ser simulado. Esse software possibilita emular CLPs da empresa Allen Bradley da família SLC (“Small Logic Controller”), tendo, por base, os programas que serão rodados nos CLPs reais; ou seja, ele processa as linhas de ladder [59] ou os blocos de um SFC (“Sequential Flow Chart”) [59]. Esse emulador, da mesma maneira que os CLPs Allen Bradley, utiliza, como meio de troca de dados, o software de comunicação RSLinx da Rockwell [61], que gerencia toda a troca de dados, sendo, inclusive, o responsável por aquela que acontece entre os CLPs e o S.S. Entre o SISES e o S.S. (RSView) a comunicação é efetuada por duas DLLs, denominadas objetos VCL; são pequenos programas característicos do Windows. A figura 46 ilustra esta macroarquitetura. As figuras 47 e 48 ilustram, respectivamente, a visão geral da plataforma de software da validação do SIGASI e as linhas sumarizadas do programa (ladder) empregado no CLP.

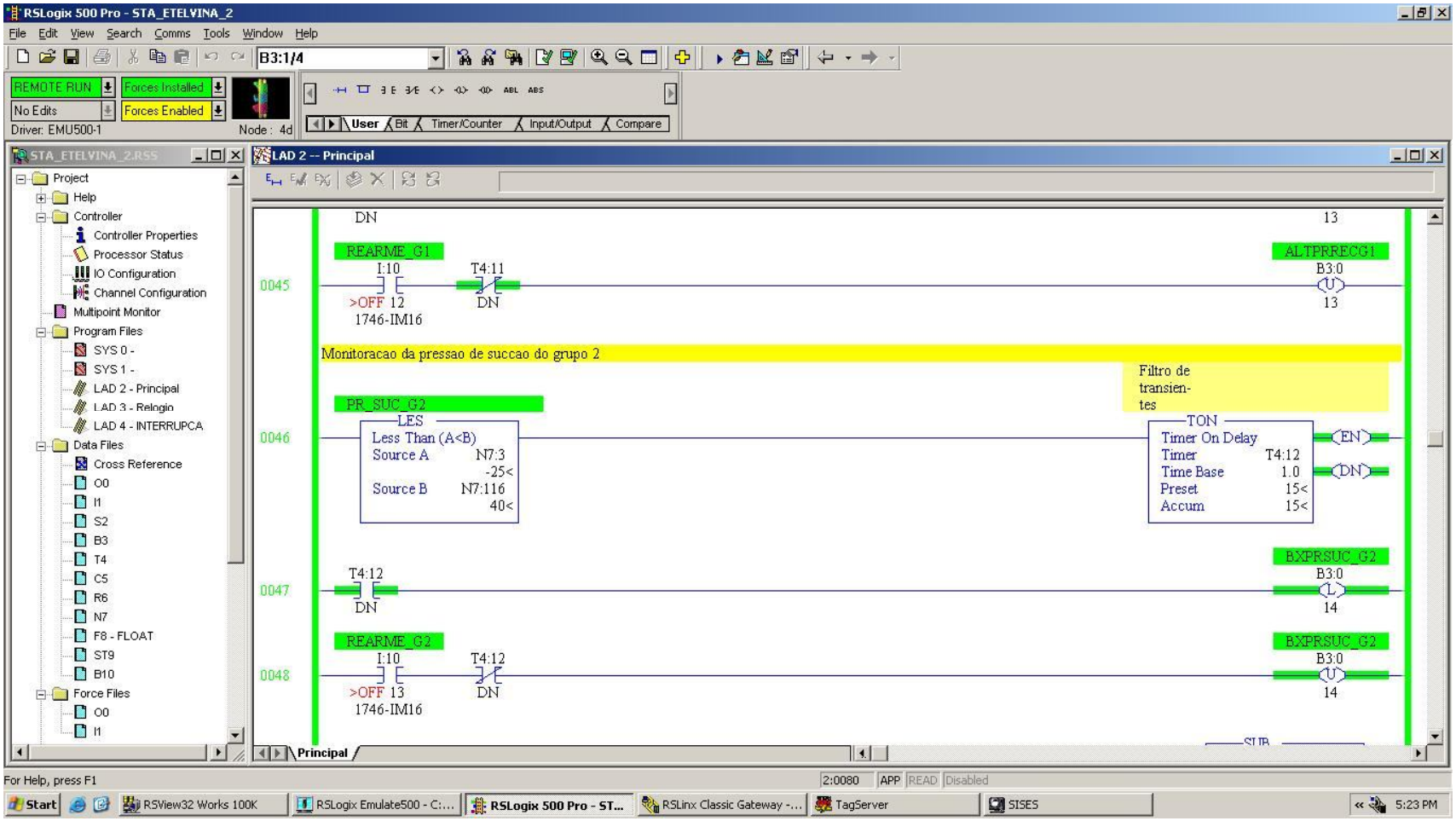


Figura 47 – Visão geral da plataforma de software da validação do SIGASI

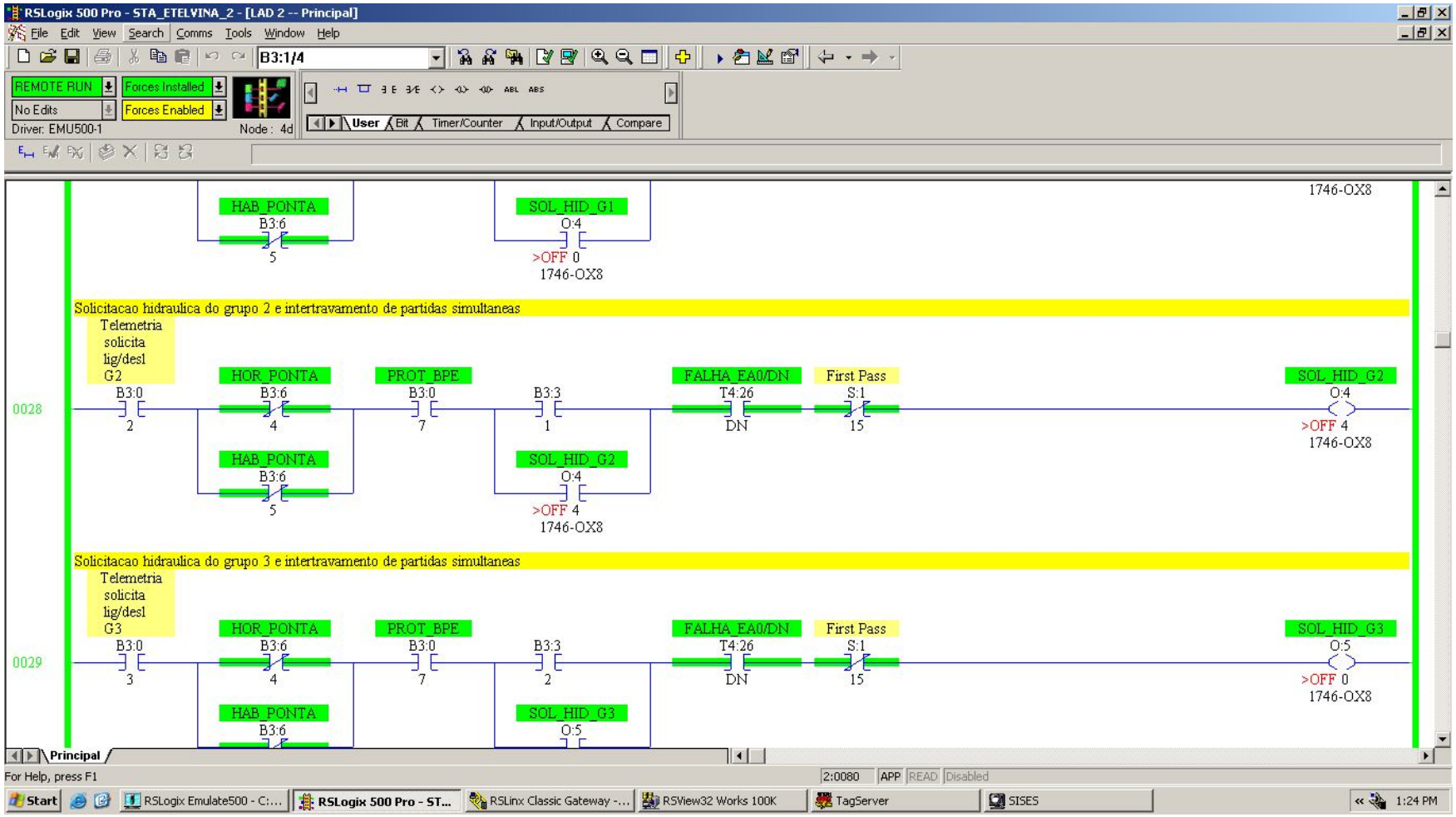


Figura 48 – Linhas sumarizadas do programa (ladder) do CLP empregado no processo de automação da EEA

4.3.3.3 Critérios de Validação do SIGASI

Para se validarem os testes de simulação do SIGASI virtual foi adotada e considerada a mesma estratégia empregada por Andrade [21], [22], de acordo com os seguintes critérios:

a. *Performance global do sistema*: o sistema como um todo deve funcionar a contento;
b. *Performance do S.S.*: o S.S. não deve sofrer queda apreciável de performance;
c. *Tempo de execução*: o tempo para o S.E. chegar a uma conclusão não pode ser de uma ordem de grandeza superior aos tempos padronizados que os operadores humanos têm para atingir as mesmas conclusões;
d. *Compatibilidade*: o S.E. não pode requerer tantos recursos do sistema operacional (Windows) de tal forma que prejudique sua performance;
e. *Assertividade:* o S.E. tem de chegar a resultados corretos.

4.3.3.4 Testes e Análise de Desempenho do SIGASI

Durante a fase de testes, os resultados corretos, as mensagens claras e objetivas que eram fornecidas pelo SEGS demonstraram atender aos objetivos deste estudo. O SEGS apresentou as conclusões a respeito de ações que os operadores deveriam tomar em tempos de, aproximadamente, segundos, tornando-o bem mais rápido que os tempos normais para se tomarem as mesmas decisões que podem, frequentemente, ser da ordem de minutos. O desempenho do SEGS foi satisfatório em todos os critérios de testes. As figuras

49 e 50 ilustram exemplos de telas de mensagens geradas pelo SEGS, durante os testes da arquitetura de hardware e software do SIGASI.

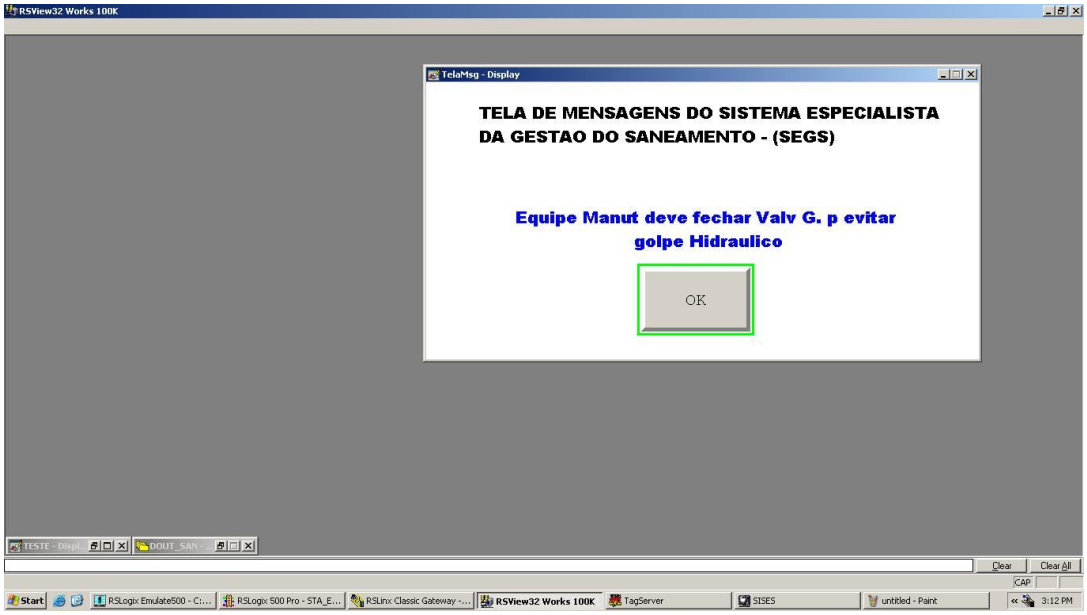


Figura 49 – Exemplo de Tela gerada pelo SEGS no processo de teste da automação da EEA

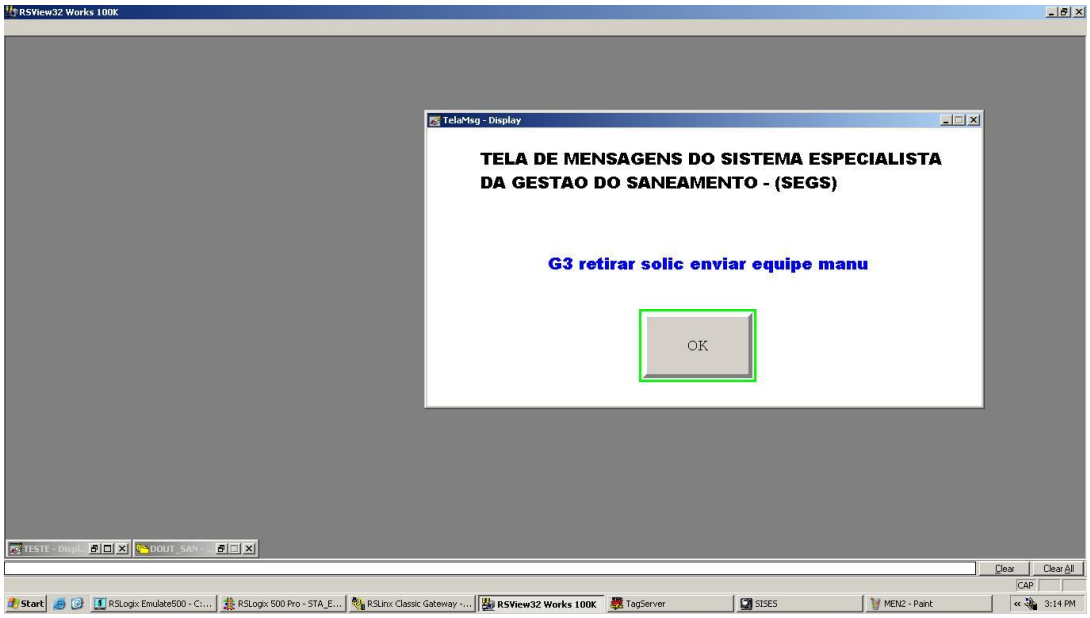


Figura 50 – Exemplo de tela gerada pelo SEGS no processo de teste da automação da EEA

Observe-se que as mensagens geradas pelo SEGS são obtidas por meio das heurísticas, fornecidas pelos especialistas do processo de saneamento, as quais foram transformadas em regras no SEGS (vide item 4.3.2.2). A mensagem enviada para o S.S. deve ser reconhecida pelo operador do subprocesso, por meio da tecla “Ok”, para permitir o reconhecimento da contingência informada pelo SEGS, bem como para a operacionalidade do próprio S.E..

Outra constatação relevante a ressaltar durante os testes do SIGASI foi a capacidade de o SEGS mapear, por meio de um diagrama de árvore de decisão, a sequência de como ele chegou à solução de determinada contingência do processo de saneamento. As figuras 51 e 52 ilustram exemplos da árvore de decisão, obtidas durante a simulação do SIGASI.

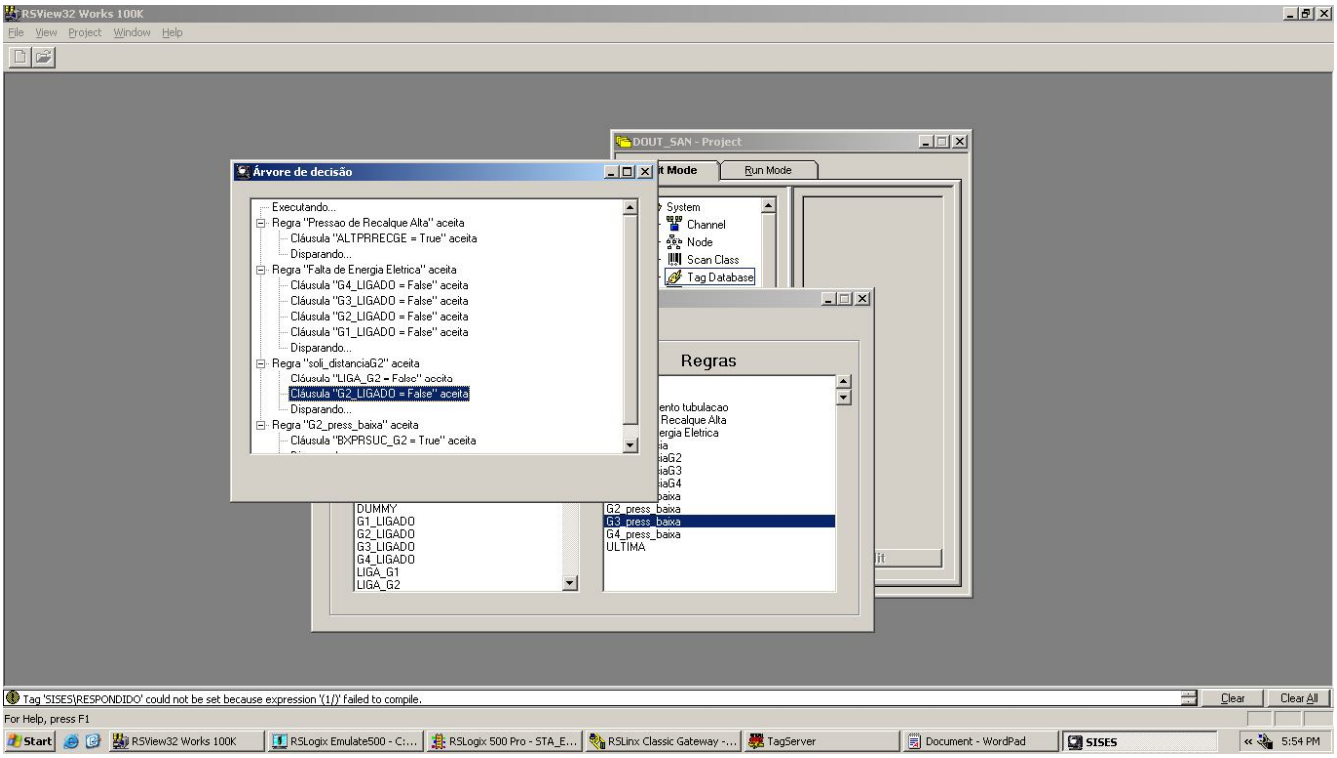


Figura 51 – Vista geral da árvore de decisão gerada pelo SEGS

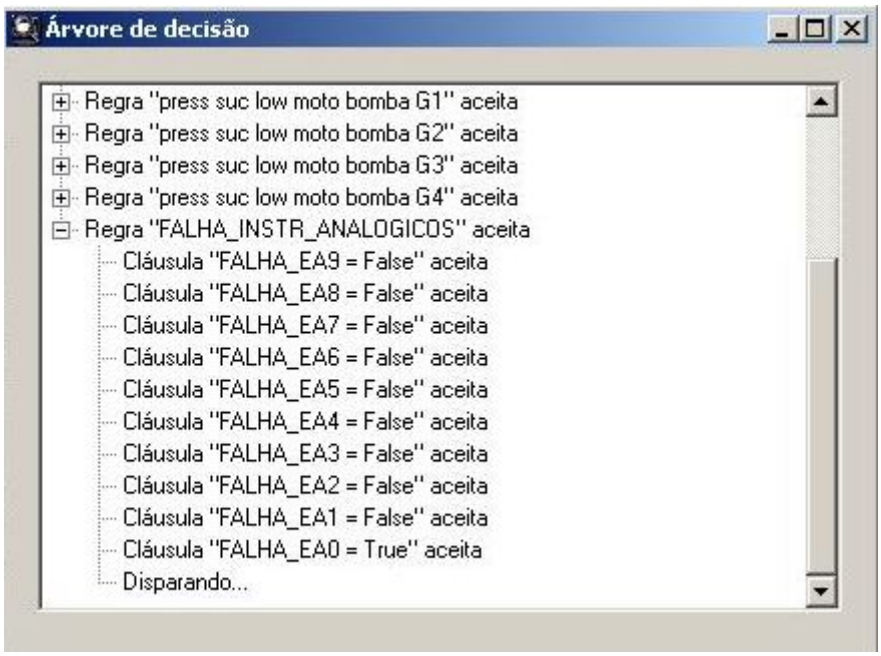


Figura 52 – Detalhe da árvore de decisão gerada pelo SEGS

Observe – se que nas figuras 51 e 52 a árvore de decisão fornece a sequência dos eventos (regras) e indica o modo como o SEGS chegou à solução de determinada contingência do processo de saneamento. Esta função do SEGS é muito útil e importante na operação do sistema, principalmente em processo em que há um número significativo de tags, a exemplo do ciclo de saneamento (vide item 1.5). Certamente, o especialista humano teria muitas dificuldades para descrever, de forma sistemática, como chegou à solução de determinado problema. Assim, pode-se concluir que, com esta função do SEGS é possível sistematizar, ao longo do tempo, a tomada de decisão em determinada contingência do processo de saneamento, por meio de procedimentos e regras. Desta maneira, permite-se a transferência sistematizada do conhecimento para diversos operadores, alguns, até, com menor grau de informações a respeito dos subprocessos de saneamento, além, é claro, do próprio registro do que foi armazenado em teoria e na prática por profissionais bastante experientes e que estão próximos à aposentadoria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este trabalho de doutorado foi desenvolvido no período de Fevereiro de 2007 a Outubro de 2011, no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP.

O campo de pesquisa abrangido foi amplo. Abarcou o estudo do sistema de saneamento, metodologia de automação, suas principais variáveis, formas de monitoração e controle, dado que as flutuações de tais variáveis promovem impactos significativos no ciclo do saneamento. Também estendeu-se à pesquisa em tópicos da área da Inteligência Artificial para se verificarem as possibilidades de interligação entre sistemas inteligentes de automação em processo de saneamento. Neste estudo, os S.E.s revelaram que, devido as suas características de manipulação de conhecimento, seriam de extrema utilidade para projetos de automação em processo de saneamento, quanto à tomada de decisões, sistematização e preservação dos conhecimentos do setor, principalmente se tivessem a capacidade de interação em tempo real com o próprio processo, de forma a permitir uma gestão integrada e otimizada.

Pelas condições apresentadas, os S.E.s tornaram-se a linha mestra do desenvolvimento do trabalho. Este buscou interligar um Sistema Supervisório de automação de saneamento com o Sistema Especialista, unindo, dessa maneira, a realidade dinâmica do processo de automação de saneamento com o conhecimento acumulado no S.E., de forma a capacitar o sistema resultante a tomar inferências sobre o conjunto do ciclo de saneamento e, até mesmo, executar ações neste conjunto. Para isto foi escolhida uma ferramenta computacional denominada SISES, desenvolvida por Andrade [21], que possibilita comunicação em tempo real com os sistemas supervisórios e possui, em seu desenvolvimento, software próprio, permitindo, desta forma, o

desenvolvimento das arquiteturas de hardware e software propostas neste trabalho de pesquisa.

A proposição de uma arquitetura de hardware e uma arquitetura de software para efetuar a gestão integrada do ciclo do saneamento foi denominada, neste estudo, de Sistema Integrado da Gestão Automatizada do Saneamento Inteligente (SIGASI). A mesma foi testada e validada em um laboratório, replicando, virtualmente, algumas condições de um processo de saneamento real.

Esta metodologia, empregando S.E.s., apresenta uma vantagem relevante em comparação aos sistemas de automação convencional: o fato de permitir deliberar ações de tomada de decisão, em tempo real, sobre ocorrências envolvendo equipamentos do processo de saneamento que ainda, por algum motivo, não estão inseridos no processo de automação. Por meio de regras programadas e mensagens na tela do S.E., é possível, por exemplo, o operador receber um conselho via mensagem do S.E: “fechar a válvula de entrada de um determinado sistema de abastecimento de água, devido a uma sobrepressão, causada pela falta de energia elétrica na região. Caso esta válvula não seja fechada, poderão ocorrer danos significativos na tubulação”. Mesmo a válvula não sendo parte do sistema de automação, é possível, ainda assim, estabelecer ações por meio do S.E..

Em suma, o que se conclui é que o SIGASI pode trazer muitos benefícios técnicos e econômicos em comparação ao sistema de gestão empregado, atualmente, pelos gestores das empresas de saneamento do país. Permite, por exemplo, ações de manutenção mais embasadas, rápida resposta às perturbações do processo e também sistematização dos procedimentos que um operador utiliza em situações de contingências; ou seja, acumula o conhecimento dos especialistas dos subprocessos do ciclo de saneamento.

Por se tratar de uma metodologia, este estudo pode ser, facilmente, replicado para os outros subprocessos do saneamento. Essa nova metodologia de gestão, proposta ao setor de saneamento, contribuirá para a melhoria da automação, e, consequentemente, para a gestão dos recursos hídricos.

Quanto às macrometas definidas no item 4.3.1, o SIGASI demonstrou atender, de forma qualitativa, a todos os seis quesitos levantados, principalmente devido à identificação rápida dos problemas operacionais, o que evita um enorme desperdício no processo produtivo do saneamento, tanto de água, como de insumos empregados na sua produção, assim como no consumo e nas despesas de energia elétrica com o processo de bombeamento de água.

Assim sendo, a automação, associada com os sistemas inteligentes, surge como uma poderosa ferramenta na gestão do sistema de saneamento.

Como possibilidades de futuros aprimoramentos, destacam-se:

a. Continuidade das pesquisas e implementação do SIGASI para a quantificação precisa dos indicadores e das relações prescritas no item 4.3.1 deste trabalho;
b. Inclusão do fator tempo nas heurísticas, de forma a melhor ponderar uma eventual ação do SEGS;
c. Melhoria da I.H.M., tornando a operação ainda mais fácil para seus usuários;
d. Pesquisa em novas técnicas de I.A. para melhorar a abrangência e assertividade do SEGS;
e. Pesquisa em novas técnicas de I.A. para desenvolver metodologias e ferramentas de construção do SIGASI e S.E.;

f. Pesquisa em novas técnicas de softwares para aprimorar o SISES;
g. Implementação da proposta deste trabalho de pesquisa em uma instalação do saneamento, durante um período de teste para validação, perante os gestores e operadores do saneamento.

Dado o objetivo inicial desta pesquisa, o desenvolvimento da proposta e sua validação, conclui-se que este estudo atingiu o propósito definido. A proposta do SIGASI constitui-se em abertura para novas frentes de investigação no campo da gestão do saneamento, dos recursos hídricos e do meio ambiente, com o emprego da tecnologia de automação associada a sistemas inteligentes.

Este estudo, ao buscar uma gestão mais eficiente e otimizada do ciclo de saneamento, pretende ampliar sua contribuição no sentido de que a disponibilização e utilização da água, um dos mais importantes recursos naturais do planeta, sejam feitas de forma mais racional, melhorando as condições de sustentabilidade do desenvolvimento humano.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRANDÃO, B. L.J. **Modelo para Operação de Sistema de Reservatório com Usos Múltiplo**s. São Paulo, 2003. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[2] TSUTIYA, M.T.; **Abastecimento de Água.** São Paulo: Provo e Gráfica, 2004.

[3] Barreto M. L, Carmos E. H. **Mudanças de Padrão de Morbimortalidade:** conceitos e métodos. In: Monteiro, C. A. Velhos e novos males no Brasil: a evolução do país e suas doenças. São Paulo: Hucitec, Nupens/USP, 2000.

[4] Informações de Saúde (DATASUS). Disponível em www.datasus.org.br. Acesso em 27de Março de 2004.

[5] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Disponível em www.ons.org.br. Acesso em 27de Março de 2008.

[6] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Disponível em www.aneel.org.br. Acesso em 27de Março de 2008.

[7] ANDERSON, Y. Yong B, Studahl. **Waterborne Campylobacter in Sweden:the cost of an outbreak**, Wat Sci. Tech . Vol. 35, n 11-14. Great Britain. Elsevier Science Ltd. IAWQ.1997.

[8] LAHTI K, Hiisvirta L. **Causes of waterborne outbreaks in community water systems in Finland**: 1980 –1992. Wat. Sci Tech. Vol. 31. n° 5-6, p33-36. Great Britain. Science Ltd. IAWQ.1995.

[9] PAYMEN P. **Epidemiology of Endemic Gastrointestinal and Respiratory Diseases**: Incidence, Fraction Attributable top water and costs to society Wat Sci. Tech. 1997;35 (7/10).

[10] Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 (WHO-UNICEF).

[11] KINGDOM, B. LIEMBERGER, R. MARIN P. **The Challenge of Reducing Non-revenue Water in Developing Countries.**, EUA, The World Group, Paper nº 8, 2006.

[12] MASCARENHAS, F. José. **A Infra-Estrutura no Brasil,** Conselho de Infra-Estrutura, Brasília, 2005.

[13] Infraestrutura econômica no Brasil : **diagnósticos e perspectivas para 2025**, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. – Brasília : Ipea, 2010. v.1 (586 p.).

[14] BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Visão do Desenvolvimento**, 12 fev. 2007. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/conhecimento/visao/visao_24.pdf>. Acesso em 31 de março de 2009.

[15] SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo: Relatório Mensal de Acompanhamento dos Gastos com Energia Elétrica, Dezembro 2010.

[16] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) - Censo brasileiro; Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/default.php#> Acesso em 15 de Agosto de 2010.

[17] PEREIRA, S. L. **Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoferroviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação**, tese (doutorado), EP-USP, 1995.

[18] PEREIRA, S. L. “Ecoeconomia Tecnológica Cooperativa**” Uma Proposta Conceitual: Ciência e Tecnologia da Automação como Ferramentas de Inclusão Social e de Suporte ao Desenvolvimento Sustentável**, São Paulo, 2009. tese (Livre Docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[19] WEBB J. K. **Industrial Control Electronics**. Maxwell Macmillan International Editions, 1992. 593p.

[20] CASTRUCCI, P. L., MORAES C.C. **Engenharia de Automação Industrial**. LTC 2ª ed. - p.358, 2007.

[21] ANDRADE, A. ACÁCIO. **Emprego de Sistemas Especialistas em Sistemas Supervisórios de Automação Industrial**. São Paulo, 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[22] ANDRADE, A. ACÁCIO. **Desenvolvimento de Sistema Especialista com Operacionalidade de Aprendizado para Operar em Tempo Real com Sistemas Especialistas Industriais Automatizados** . São Paulo, 2007. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[23] ORSINI, E.Q. **Sistema de Abastecimento de Água** -1998. Apostila PHD 412.

[24] DI BERNADO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água** Vol.1-1997.

[25] SOUZA, MARCELO DE **Proposta de um Sistema de Gestão Empregando Instrumentação Inteligente e Redes de Campo na Automação do Processo de Tratamento de Água.** São Paulo, 2006. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[26] UNIVERSIDADE DA ÁGUA **Estação de Tratamento**. Disponível em www.uniagua.org.br. Acesso em 27de Fevereiro de 2006.

[27] MINISTÉRIO DA SAÚDE – **Portaria nº 518**, de 25 de março de 2004.

[28] SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo: **Programa Corporativo de Redução de Perdas de Água**, Agosto 2010.

[29] TROJAN, F. **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento Especializado Integrando-o aos Processos de Gestão de uma Empresa de Abastecimento Público de Água Visando a Redução de Perdas do Produto**. Dissertação (Mestrado), Engenharia Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2006.

[30] FONSECA, Fabrício Ramos da. **Modelo de Sistemas Automação Aplicado à Setorização de Redes de Abastecimento Hídrico**. 2011. 155 p. (Doutorado) - ESCOLA POLITÉCNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

[31] TUNDISI, J. G. - **Recursos Hídricos – MULTICIÊNCIA**, Revista Interdisciplinar dos Centros e Núcleos da Unicamp, 2005.

[32] PHILIPPI JR, A. – **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri, São Paulo: Manole, 2005.

[33] ONU, **World Resources Institute**, 1999.

[34] F. MÁRIO - **Automação no saneamento básico: diferentes necessidades para um mesmo objetivo**. Revista Controle & Instrumentação, ed. 61, São Paulo, SP, 2001.

[35] IWA – International Water Association em SNIS 2002.

[36] ANA - Agência Nacional das Águas - **A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasi**l. Edição comemorativa do dia mundial das águas, 2002, 64 p..

[37] ABEAS – Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior – **Água, Meio Ambiente e Vida**. 1ª ed. A&A&A – Abeas, 1998.

[38] SNIS – **Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, 2008. Brasília, DF. Disponível em: http://www.snis.gov.br/diag_2008.

[39] BRASIL ECONÔMICO - **Distribuição de água potável e saneamento também é disigual**. Disponível em www.brasileconomico.com.br. Acesso em 01de junho de 2010.

[40] RICH, E., KNIGHT, K. **Inteligência Artificial**. Brasil: Ed. MCGraw-Hill Ltda., 1994.

[41] LUGER, G.F; STUBBLEFIELD, W.A. **Artificial intelligence**: **structures and strategies for complex problem solving**. 2ª ed. Redwood: Benjamim/Cummings, 1993.

[42] SCHALKOFF, R.J. **Artificial Intelligence**: **an engineering approach**. New York: McGraw-Hill, 1990.

[43] KURZWEIL, R. **The age of intelligent machines**. Cambridge: MIT Press, 1990.

[44] ZADEH, L.A, 1973 “**Outtline of a New Approach to the Analysis Of Complex Systems an Decision Process”**. IEEE Trans Systems, Man and Cybernetics, 3, 28-44.

[45] Ferreira A. B de H. **Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa.** Ed. Nova Fronteira, 1988, p.212 e 955.

[46] CARRARA, V., Rios A.N. **Redes Neurais para Controle de Atitude de Satélites**; Anais EPUSP, IV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, p.77-82, 1999.

[47] SAIKO, K.,CAMPOS, **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processo.** Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2004.

[48] Goldberg, D.E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning** USA, Addison Wesley, Inc., 1989.

[49] BAPTISTA B.D.F., CABRAL E.L.L: **Controle de um Manipulador Bi-Articulado com uma Rede Neural de Cantatos Multi-sinápticos.** Anais EPUSP. IV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, p.119-124, 1999.

[50] LOPES H. S., NASSAR S.M., RAMIREZ A., LIMA W. C. **Arquiteturas Híbridas Integrando Paradigmas Conexionistas e Simbolistas.** Anais EPUSP. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, v.1, p.10-18, 1993.

[51] Russell S. Norvig P. **Artificial Intelligence a Modern Approach**. Prentice Hall 2ª ed. – 200 p.384.

[52] NEVES, H.R.A. **Implementação de um sistema especialista para determinar elegibilidade e prioridade em transplante de medula óssea**.

2004. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

[53] MITCHELL., T.M., **Machine Learning.** McGraw-Hill, 1997, 52p.

[54] BARRETO, J.M., **Inteligência Artificial no Liminar do Século XXI:** Abordagem Híbrida, Simbólica, Conexionista e Evolutiva**,** 2 ª ed**.,** Florianópolis, 1999.

[55] RABUSKE, R.A., **Inteligência Artificial,** Florianópolis: Ed. UFSC, 1999.

[56] DURKIN, J., **Expert Systems Design and Develepoment,** Prentice Hall, 1994. 800p.

[57] TURBAN, E. **Decision Support and Expert Systems,** Prentice Hall: 1995. 4ª ed. 887p.

[58] ROCHA, Alexandre Magno Parente da. **Identificação Nebulosa da Concentração de Oxigênio Dissolvido do Tanque de Aeração de uma Estação de Tratamento de Esgotos por Lodos Ativados**. 2003. 82 p. (Mestrado) - ESCOLA POLITÉCNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

[59] V.M.Chowdary·D.Ramakrishnan·Y.K.Srivastava Vinu Chandran.·A.Jeyaram - "**Integrated Water Resource Development Plan for Sustainable Managementof Mayurakshi Watershed, Indiausing Remote Sensing and GIS"**. Water Resour Manage, 2008.

[60] Michel G. **Programmable Logic Controllers** , John Wiley & Sons, 1990. 330p.

[61] Rockwell Software Inc.. RSLogix Emulate 500 – User's Getting Results Guide - USA, 2004. 28p.

[62] Rockwell Software Inc.. **RSLinx – User's Guide** Milwaukee -USA, 2001. 63p. Disponível em: http://www.ab.com/manuals/swrsi/9398LINXTD.pdf

ANEXOS

ANEXO A – TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR NO TRANSCORRER DA PESQUISA

Produção bibliográfica

Artigos publicados em periódicos (Completo)

1. SOUZA, M., PEREIRA, S. L, Fontana, C. F, Dias, Eduardo Mário. **Integrated Management and Optimization of the Sanitation Cycle Using Intelligent Automation Systems and Commnication Networks**. WSEAS Transactions on Systems and Control, v3, p.321-331, 2008.

2. SOUZA, M., PEREIRA, S. L. **Instrumento Inteligente Empregada na Gestão de Sistemas de Tratamento de Água e Análise de Benefícios e Vantagens,** Revista C&I Controle e Instrumentação, v117, p. 58-66, 2006.

Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)

1. SOUZA, M., PEREIRA, S. L., DIRANI, E.A. T.,CAMPOS, L.C. **Emprego da Tecnologia da Informação na Automação de Estações de Saneamento Básico para a Contribuição do Desenvolvimento Sustentável** In: SIMPEP – Simpósio da Engenharia da Produção, 2010, Bauru – SP. **XVII – SIMPÓSIO DA ENGENHARIA DA PRODUÇÃO, 2010**.

2. SOUZA, M., PEREIRA, S. L, Dias, Eduardo Mário, Fontana, C.F **Automation and Management Using Intelligent Instrumentation and Field Networks in the Water Treatment Process Automation** in 7th WSEAS International Conference on Applied Computer & Applied Computational Science**,** 2008, p.585 – 591 ACACOS 08 Hangzhou – China.

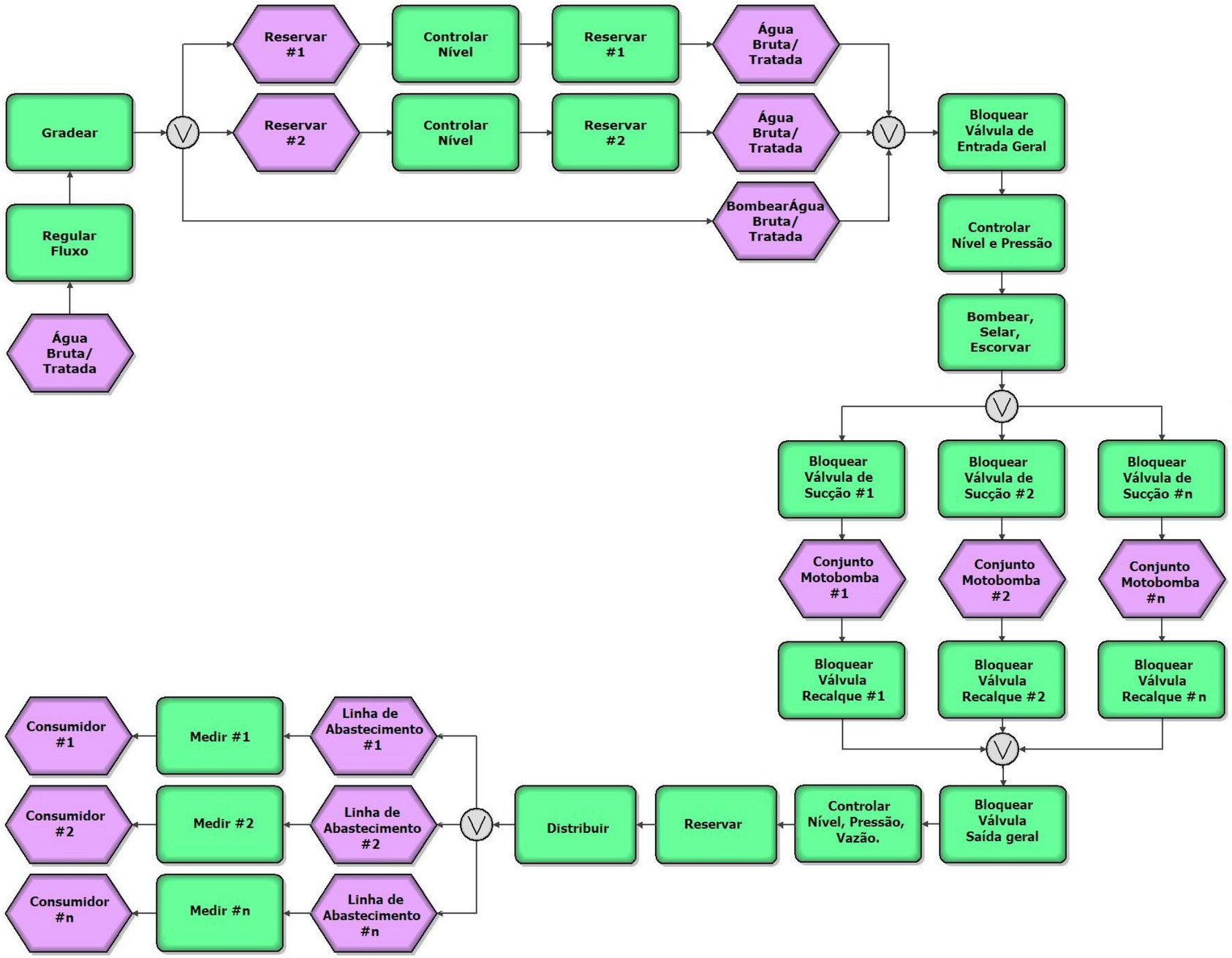
3. SOUZA, M., PEREIRA, S. L, Dias, Eduardo Mário, Fontana, C.F: **Information Technology as a Management Tool in Automation Processes of Sanitation Facilities,** Communications & Information Technology Information, NAUN International Conferences, 2008, p.201 – 206, Marathon Beach, Greece.

4. SOUZA, M., PEREIRA, S. L. **Proposta de um Sistema de Gestão Empregando Instrumentação Inteligente e Redes de Campo na Automação do Processo de Tratamento de Água**, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, Juiz de Fora, MG, 2008. CBA 2008 Anais. Campinas: Book Editora, 2008. p.1-6.

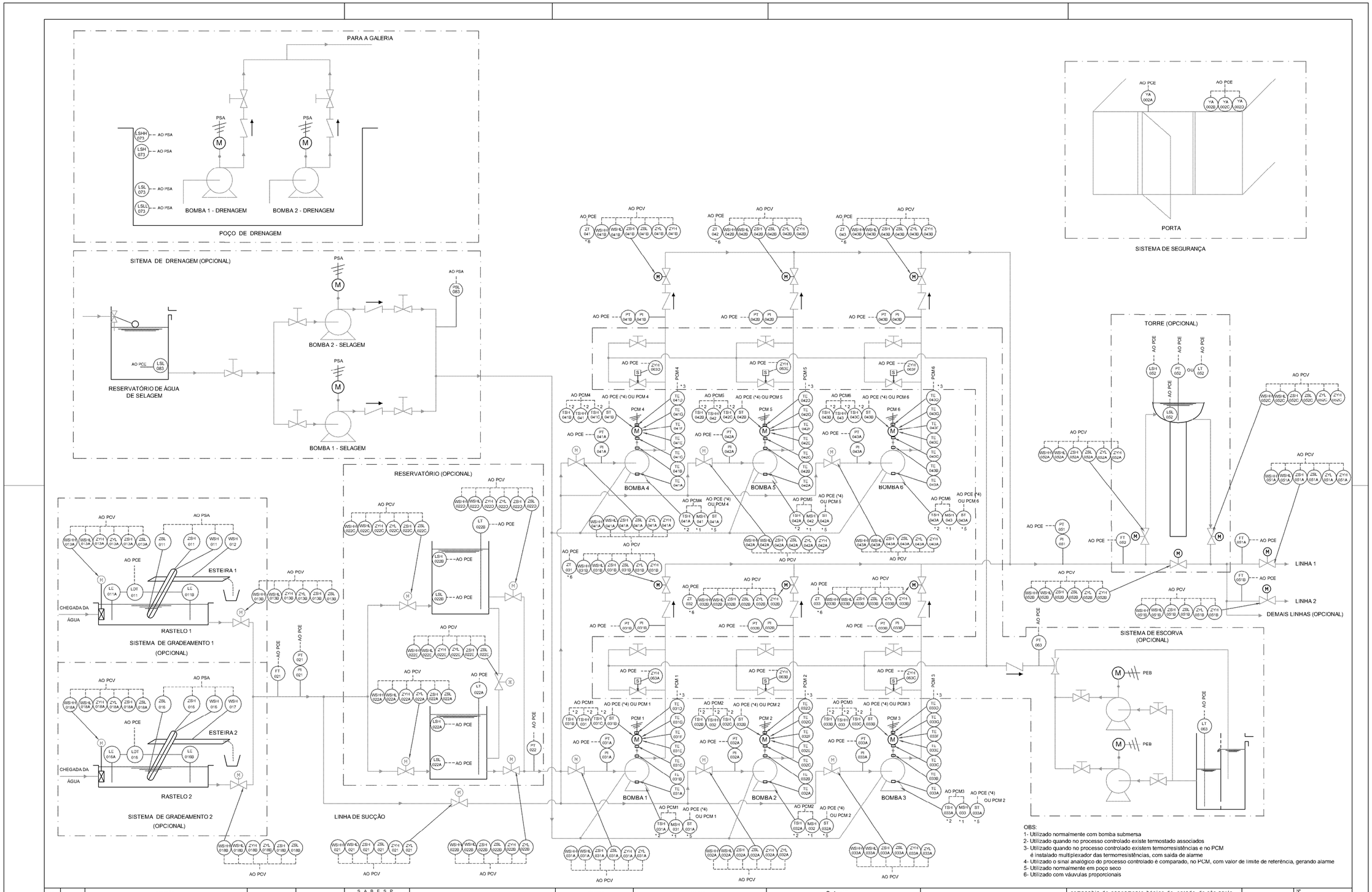
5. SOUZA, M., PEREIRA, S. L. **Tecnologia da Informação Como Ferramenta de Suporte a Decisão e Gestão nos Processos de Automação das Instalações de Saneamento**. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, Poços de Caldas, 2008, **INDUSCON Anais**. New York: IEEE, 2008. p.1-6.

6. SOUZA, M., Pereira, S.L. **Instrumentos Inteligentes em Sistema de Abastecimento de Água e Análise de Benefícios e Vantagens,** ISA Show South America 2005, 5º Congresso Internacional de Automação, Sistema e Instrumentação.

ANEXO B – MACROFLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA GENÉRICA



ANEXO C – DIAGRAMA E PROCESSO DE INSTRUMENTAÇÃO – P&ID - ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA GENÉRICA



OBS:
1- Utilizado normalmente com bomba submersa
2- Utilizado quando no processo controlado existe termostado associados
3- Utilizado quando no processo controlado existem termorresistências e no PCM é instalado multiplexador das termorresistências, com saída de alarme
4- Utilizado o sinal analógico do processo controlado é comparado, no PCM, com valor de limite de referência, gerando alarme
5- Utilizado normalmente em poço seco
6- Utilizado com válvulas proporcionais

Nº	DATA	REVISÃO	EXECUTADO	APROVADO	SABESP ACEITO	SABESP DATA	DESENHOS DE REFERÊNCIA	NÚMERO	NOTAS
00	17.01.03	Emissão Inicial	Jolio Luiz Bertagna	Carlos Alberto M. da Silva					

Sabesp
VISTO E ACEITO
ESTA ACEITAÇÃO NÃO ISENTA A CONTRATADA DAS RESPONSABILIDADES E OBRIGAÇÕES ESTABELECIDAS NO CONTRATO

ANALISADO	/ /	
APROVADO	/ /	
ASS.	/ /	

S A B E S P
EDIÇÃO APROVADA PELA Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico - CD
ASS. / /

companhia de saneamento básico do estado de são paulo

PROJETO TÍPICO DE AUTOMAÇÃO DE EEAS

FLUXOGRAMA DE INSTRUMENTAÇÃO

ÁREA PROJ. CD
SUB-ÁREA PROJ. CDGA

sabesp

Nº PTA-EEA-DES-01
R 00 FL 1 de 1
Nº CONTRATADA
ESCALA